



УДК 612.82

EDN LPUNMI

<https://doi.org/10.33910/2687-1270-2026-7-1-77-88>

Обзор отечественных и мировых подходов к пониманию механизмов реализации эффектов транскраниальной стимуляции постоянным током

И. Б. Сиваченко ¹, О. А. Любашина ¹

¹Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

Сведения об авторах

Иван Борисович Сиваченко, SPIN-код: 4049-8950, Scopus AuthorID: 55882139900, ResearcherID: AAC-8883-2022, ORCID: 0000-0001-8548-8823, e-mail: avans_d@mail.ru

Ольга Анатольевна Любашина, SPIN-код: 5257-4057, Scopus AuthorID: 6505777191, ResearcherID: A-6241-2017, ORCID: 0000-0002-6296-4628, e-mail: lyubashinaoa@infran.ru

Для цитирования: Сиваченко, И. Б., Любашина, О. А. (2026) Обзор отечественных и мировых подходов к пониманию механизмов реализации эффектов транскраниальной стимуляции постоянным током.

Интегративная физиология, т. 7, № 1, с. 77–88. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2026-7-1-77-88> EDN LPUNMI

Получена 27 сентября 2025; прошла рецензирование 4 ноября 2025; принята 7 ноября 2025.

Финансирование: Работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН (№ 1021062411784-3-3.1.8).

Права: © И. Б. Сиваченко, О. А. Любашина (2026). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях [лицензии CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Аннотация. Понимание механизмов модуляции центральной нервной системы с помощью процедур транскраниальной электрической стимуляции является важной задачей современной физиологии и психофизиологии. Среди конкретных методов неинвазивной стимуляции транскраниальная стимуляция постоянным током (tDCS) вызывает неуклонно растущий интерес ученых, клиницистов и общественность в связи с расширяющимся использованием в качестве инструмента в фундаментальных и прикладных исследованиях, а также клинических испытаниях. Масштаб и широта исследований с применением процедур tDCS требуют тщательного рассмотрения механизмов, а именно физиологических изменений, вызванных стимуляцией. Это необходимо в том числе для лучшего понимания его применения в качестве инструмента исследования или лечения. Использование сведений о механизмах наблюдаемых эффектов tDCS поможет разработать оптимальные протоколы стимуляции, что приведет к улучшению результатов применения метода, а также к росту доверия к его клиническому использованию. В данной статье рассматриваются основы метода модуляции нейрональной активности посредством транскраниальной стимуляции постоянным током. В обзоре собраны сведения из отечественных и зарубежных исследований о механизмах реализации эффектов транскраниальной стимуляции постоянным током с добавлением сведений последних пяти лет.

Ключевые слова: транскраниальная стимуляция постоянным током, микрополяризация, модуляция активности нейронов, потенцирование мембраны нейронов, нейромодуляция, эффект поляризации

Review of domestic and international approaches to understanding the mechanisms of transcranial direct current stimulation (tDCS) effects

I. B. Sivachenko ¹, O. A. Lyubashina ¹

¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

Authors

Ivan B. Sivachenko, SPIN: 4049-8950, Scopus AuthorID: 55882139900, ResearcherID: AAC-8883-2022, ORCID: 0000-0001-8548-8823, e-mail: avans_d@mail.ru

Olga A. Lyubashina, SPIN: 5257-4057, Scopus AuthorID: 6505777191, ResearcherID: A-6241-2017, ORCID: 0000-0002-6296-4628, e-mail: lyubashinaoa@infran.ru

For citation: Sivachenko, I. B., Lyubashina, O. A. (2026) Review of domestic and international approaches to understanding the mechanisms of transcranial direct current stimulation (tDCS) effects. *Integrative Physiology*, vol. 7, no. 1, pp. 77–88. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2026-7-1-77-88> EDN LPUNMI

Received 27 September 2025; reviewed 4 November 2025; accepted 7 November 2025.

Funding: The study was supported by state funding allocated to the Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences (No. 1021062411784-3-3.1.8).

Copyright: © I. B. Sivachenko, O. A. Lyubashina (2026). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY License 4.0.

Abstract. Understanding the mechanisms by which transcranial electrical stimulation procedures modulate the central nervous system is a crucial task in modern physiology and psychophysiology. Among the specific methods of non-invasive stimulation, transcranial direct current stimulation (tDCS) continues to attract steadily growing interest from scientists, clinicians, and the general public, given its expanding use as a tool in basic and applied research, as well as in clinical trials. The scale and breadth of research employing tDCS procedures necessitate careful consideration of the underlying mechanisms — specifically, the stimulation-induced physiological alterations — to enhance the understanding of its utility as a research or therapeutic tool. Understanding the mechanisms underlying the observed effects of tDCS will aid in the development of optimal stimulation protocols, leading to improved outcomes and greater confidence in its clinical application. This article reviews the fundamentals of neuronal activity modulation via tDCS. The review synthesizes findings from both Russian and international studies on the mechanisms underlying tDCS effects, incorporating data from the last five years.

Keywords: transcranial direct current stimulation (tDCS), micropolarization, neuronal activity modulation, neuronal membrane potentiation, neuromodulation, polarization effect

Введение

Возможность модулировать электрическую активность нейронов десятилетиями привлекает к себе внимание многих учёных-физиологов. В последние годы, как в клинических, так и в доклинических научных исследованиях (Jackson et al. 2016; Jung et al. 2020; Notturmo et al. 2014; Rizzo et al. 2014; Wu et al. 2020), значительно возрос интерес к транскраниальной стимуляции постоянным током — методу лечения различных неврологических симптомов.

Предположительно электрические воздействия могут помочь в создании временных или отчасти постоянных желаемых функциональных изменений. На протяжении многих лет разрабатывались различные способы достижения этих целей, часть из которых основана на стимуляции постоянным током.

Транскраниальная стимуляция постоянным током (transcranial direct current stimulation или «tDCS») — методика неинвазивного воздействия током малой силы на корковые проекции головного мозга (Князева и др. 2019). Ряд авторов показал эффективность применения метода tDCS как для восстановления функций при патологических процессах (Князева и др. 2019; Кожухов, Должич 2017; Чайванов, Чудина 2011), так и для функционального улучшения протекания внутримозговых процессов в норме (Брагина и др. 2018; Каркищенко и др. 2011, 2017; Чайванов, Каркищенко 2011).

Отмечен высокий потенциал влияния tDCS на внимание, память и моторику здоровых добровольцев (Липатова и др. 2018; Braun 2016; Joys et al. 2020). Также было исследовано опосредованное tDCS повышение работоспособности здоровых лиц. В исследованиях Д. Б. Чайванова

и Ю. А. Чудиной (Чайванов, Чудина 2011) отмечено, что использование метода tDCS способствует снижению тяжести симптомов синдрома хронической усталости; нормализует процессы вегетативной регуляции (сосудистого тонуса, артериального давления; стимуляции гуморального и клеточного иммунитета); нормализует психофизиологическое состояние; оказывает антистрессорный и антидепрессивный эффекты; повышает работоспособность, снижает утомляемость, улучшает настроение и др.

Метод транскраниальной стимуляции постоянным током широко применяется в зарубежных странах. На Западе и в странах Азии при работе с патологиями процедуры предполагают ток силой 1–3 мА (длительность процедуры 30–45 минут, курс 7–10 ежедневных сеансов), тогда как к здоровым добровольцам применяется ток до 2 мА (процедура длится до 20 минут, обычно достаточно одного-двух сеансов) (Каркищенко и др. 2011; Чайванов, Чудина 2011).

В отечественной практике метод tDCS носит название «транскраниальная микрополяризация» (ТКМП) поскольку используются токи меньшей силы — 0,15–0,35 мА при том же времени экспозиции (Филимонова, Борсуков 2009). В экспериментальных исследованиях показано, что при ТКМП эффективны токи малой силы 0,1–3 мА при рабочей поверхности электродов 0,5–1 см².

Физиологические механизмы tDCS

Однако несмотря на пристальное внимание со стороны научного сообщества к методу tDCS, механизмы регистрируемых в клинике эффектов продолжают оставаться не в полной мере раскрытыми. Так, остаётся под вопросом факт потенцирования мембраны нейронов коры головного мозга при воздействии постоянного тока слабой силы (Малыгин 2009; Мухина 2007; Zhao et al. 2017).

Предполагается, что физиологический механизм, лежащий в основе эффектов tDCS, заключается в изменении нейропластичности (Jung et al. 2020; Kronberg et al. 2017). Существуют работы, в которых продемонстрировано, что tDCS может усиливать нейропластичность различных структур мозга посредством иммуномодуляции (Liu et al. 2019; Pikhovych et al. 2016; Zhao et al. 2017), активирования микроглии (Pikhovych et al. 2016), нейрогенеза (Bikson et al. 2016; Pikhovych et al. 2016), нейротрофической поддержки (Jooyoung et al. 2019; Winkler et al.

2017), восстановления нейротрансмиссии, изменения содержания внеклеточных элементов, влияния на синаптическую активность (Jackson et al. 2017).

Согласно отечественным представлениям о механизмах воздействия, токи малой силы приводят в первую очередь к оптимизации функционального состояния нервной ткани.

По результатам экспериментальных исследований и сформулированных на их основе теоретических представлений можно выделить две взаимосвязанные категории явлений, развивающихся в головном мозге при транскраниальном воздействии слабым постоянным током (Мухина 2007; Филимонова, Борсуков 2009; Чайванов, Каркищенко 2011). К первой категории относятся физико-химические изменения, которые обеспечиваются механизмами избирательной ионной проводимости, преимущественно в местах аппликации тока. Физико-химические процессы в зонах аппликации тока являются своего рода триггерами запуска изменений ионного состава близлежащих тканей и физиологических жидкостей и развертывания каскада дистантных физиолого-биохимических изменений в головном мозге.

Вторая категория явлений — физиолого-биохимические преобразования в центральной нервной системе, которые носят системно-селективный характер (Филимонова, Борсуков 2009). Дистантные биохимические и физиологические изменения лежат в основе структурно-функциональной реорганизации и интеграции мозговых систем обеспечения приспособительных функций и высшей нервной деятельности.

Эффект поляризации

Так как tDCS является неинвазивным методом, то следует учитывать, что живые ткани оказывают сопротивление постоянному току. Заряженные частицы движутся в основном по выводным потокам потовых желез и волосяных фолликулов через межклеточные пространства эпидермиса, в меньшей степени дермы. Из глубоко расположенных тканей максимальный ток отмечается в жидких средах организма — периневральные пространства, кровь, лимфа (Чайванов, Каркищенко 2011).

Под электродом, располагающимся на поверхности головы, создаются поляризационные эффекты (Мухина 2007; Чайванов, Каркищенко 2011). В биологических системах нарастает электродвижущая сила противоположного направления. Под электродом возникает ток проводимости, положительно заряженные ионы движутся к катоду, а отрицательные — к аноду.

Na^+ , K^+ и Cl^- — основные носители заряда в тканях организма (Мухина 2007; Чайванов, Каркищенко 2011; Gardner-Medwin 1983). Значение критического потенциала не изменяется. Порог деполяризации, характеризующий возбудимость биосистемы, изменяется за счет сдвига мембранного потенциала покоя. При длительном воздействии подпорогового постоянного электрического тока изменяется не только мембранный потенциал, но и значение критического потенциала.

Под катодом происходит локальное изменение концентрации ионов, что влияет на возбудимость тканей. Происходит смещение уровня критического потенциала в сторону деполяризации, что свидетельствует об увеличении числа инактивированных натриевых каналов. Под анодом же происходит активация при стабильной деполяризации, что приводит к гиперполяризации мембраны и возрастанию возбудимости тканей.

В результате под катодом возбудимость снижается (катодическая депрессия Вериги); под анодом возбудимость повышается (анодическая экзальтация) (Мухина 2007; Чайванов, Каркищенко 2011).

Раздражающее действие постоянного электрического тока описывается полярным законом, содержание которого можно охарактеризовать следующими положениями (Мухина 2007).

1. Постоянный электрический ток оказывает раздражающее действие в момент включения и выключения тока (или резкого увеличения и уменьшения силы электрического тока).

2. При включении раздражающее действие проявляется только под катодом, при размыкании — под анодом.

3. Эффект катодного включения превышает действие анодного выключения. Увеличение значения тока до пороговой величины приведет к тому, что при замыкании цепи под катодом будет возникать возбуждение, т. е. генерация потенциала действия. Во время замыкания произойдет сложение пассивной деполяризации и активной деполяризации. Через некоторое время при размыкании под катодом пассивные изменения исчезнут, не будет достигнут критический уровень деполяризации и потенциал действия не возникнет. При длительном действии тока смещение критического уровня под анодом может быть существенным и достигать первоначального значения мембранного потенциала покоя. Выключение тока приведет к тому, что пассивная гиперполяризация мембраны исчезнет, мембранный потенциал покоя вернется к первоначальному значению, а это соответ-

ствует величине критического потенциала, возникнет потенциал действия (анодно-размыкательное возбуждение). Однако амплитуда потенциала действия при размыкании под анодом меньше, чем при генерации потенциала под катодом при замыкании (Мухина 2007).

Хотя эта теория может объяснить краткосрочные эффекты tDCS, она не может дать адекватного объяснения долгосрочному эффекту tDCS (Zhao et al. 2017).

Модуляция синаптической активности

Было высказано предположение, что tDCS также может индуцировать синаптические изменения, регулируя силу синаптической передачи, механизм аналогичен длительной потенциации и длительной депрессии (Zhao et al. 2017).

В начале 1980-х гг. в Институте физиологии им. И. П. Павлова РАН коллективом исследователей под руководством В. П. Лебедева было продемонстрировано явление селективной активации структур антиноцицептивной системы ствола головного мозга под влиянием тока определенных характеристик (Липатова и др. 2018; Малыгин 2009; Bikson et al. 2004). Дальнейшие исследования показали связь эффектов стимуляции ствола головного мозга через покровы черепа с активацией эндогенной опиоидергической системы и подтвердили строгую зависимость эффектов от способа наложения электродов и применяемых характеристик тока. Основные эффекты обусловлены усилением продукции β -эндорфина и сопутствующими изменениями продукции других нейротрансмиттеров: дофамина, норадреналина, серотонина, ГАМК и других (Yamada, Sumiyoshi 2021).

Эффект пролонгированного действия слабых токов на мозговые механизмы при транскраниальной стимуляции связывают со следовыми изменениями синаптических потенциалов, которые не только сохраняются в течение месяцев, но и усиливаются при повторных воздействиях (Филимонова, Борсуков 2009; Barbati et al. 2022; Zaehle et al. 2010). Этот эффект определяется как феномен долговременной потенциации. Под влиянием транскраниального воздействия слабым током возникают значительные структурные перестройки, свидетельствующие о повышении синаптической активности (Мухина 2007; Филимонова, Борсуков 2009).

Посредством транссинаптических и кортикофугальных связей изменения возбудимости происходят также и в дистантно расположенных структурах (Чайванов, Каркищенко 2011; Fritsch et al. 2010). Ионные изменения, происходящие в зоне аппликации, запускают изменения

в близлежащих структурах, а физиологические жидкости распространяют эффект далее.

Изменения синаптически опосредованных вызванных реакций считаются надежными признаками долговременных пластических изменений. В большинстве современных исследований на животных рассматривались длительные изменения синаптической активности при воздействии tDCS. Были продемонстрированы модулирующие эффекты на скорость возбуждения и время синаптической передачи (Fregni et al. 2018; Nitsche et al. 2000; Notturmo et al. 2014). Классические исследования на животных показали, что слабой стимуляции постоянного тока достаточно, чтобы вызвать синаптические изменения.

Переосмысление основных механизмов влияния tDCS на нейрональную активность за последние пять лет

Проведен обзор литературы последних пяти лет с целью освещения динамики научного понимания механизмов, лежащих в основе эффектов tDCS, в широко представленных научных публикациях.

До недавнего времени регуляторные механизмы tDCS в отношении различных функций описывались в первую очередь действием мембранной поляризации и трансмембранного потенциала (Dadgar et al. 2022). Отмечалось последующее влияние на системы нейротрансмиссии, синаптическую передачу и нейрональную реорганизацию и нейрогенез (Barbati et al. 2022; Yamada, Sumiyoshi 2021). В целом, прямые или косвенные эффекты изучали на различных уровнях, включая нейрохимический и электрофизиологический.

Однако классические эффекты tDCS, основанные на возбудимости нейронов (т. е. тормозящая катодная стимуляция, по сравнению с возбуждающей анодной), не следует принимать в качестве общего принципа, поскольку некоторые условия могут превратить возбуждающие эффекты в тормозные или наоборот (Dadgar et al. 2022; Tanaka et al. 2020). В исследовании Танака с соавторами (Tanaka et al. 2020) показано, что как анодный, так и катодный tDCS могут увеличивать активность нейронов в коре головного мозга крысы под стимулирующим электродом.

В некоторых исследованиях (Milighetti et al. 2020) систематического влияния условий стимуляции tDCS (плотность тока 9,8 А/м² при 0,4 мА) на частоту или характер нейрональных импульсов не обнаружено. Эти результаты подтверждают, что при обычно используемых в ис-

следованиях характеристиках tDCS на людях или животных наблюдаемые эффекты стимуляции, вероятно, реализуются через механизмы, отличные от прямой деполяризации нейронов.

В последнее время находят подтверждение сведения (Dadgar et al. 2022; Milighetti et al. 2020; Sánchez León et al. 2021; Tanaka et al. 2020), что локальное воздействие электрического поля на нервную структуру очень сложно и зависит от ориентации оси аксона и его расстояния до источника воздействия. Показано (Sánchez León et al. 2021), что чисто деполяризующей или чисто гиперполяризующей стимуляции не существует. Ориентация аксонов может определять (Dadgar et al. 2022; Sánchez León et al. 2021), являются ли электрические поля тормозящими или возбуждающими. Считается (Dadgar et al. 2022), что синаптические окончания аксонов в два-три раза восприимчивее к эффектам поляризации, чем продолжительность аксона. В то же время ориентация дендритов может влиять на степень эффектов tDCS, но не на их направления. Сообщалось (Tanaka et al. 2020), что дендриты и сома одного нейрона по-разному реагируют на tDCS и что апикальные и базальные дендриты также демонстрируют дифференциальные ответы на tDCS.

В исследованиях (Sehatpour et al. 2020) показано, что модель «анодального возбуждения, катодного торможения», хотя и может применяться для простых типов задач двигательного ответа, неприменима для прогнозирования эффекта tDCS в случае сложного моторного обучения или сложно-совмещённых процессов. В последнее время растёт интерес к взаимосвязанности мозговых структур. Комплексные связи между нейронами определяют, как поток информации протекает через нейронные пути и, следовательно, как функционируют эти пути. В некоторых работах (Barbati et al. 2022; Dadgar et al. 2022) было обращено внимание на способность tDCS модулировать кросс-влияния между различными областями мозга, имеющими общие нейрональные системы-сети. Индуцированные электрические поля могут иметь значительную роль в синхронизации функциональных связей в различных нейронных сетях коры и лежащих ниже структурах (Dadgar et al. 2022).

Почти все клетки, ткани и органы подвергаются воздействию электрического тока, и, таким образом, стимуляция постоянным током может также вызывать важные изменения в ненейрональных структурах мозга, таких как лимфоциты, глиальные эндотелиальные клетки (Dadgar et al. 2022). Эти ненейрональные механизмы не были в достаточной степени изучены.

Существуют другие точки зрения. Поскольку tDCS наносится непосредственно на кожу, локализованные периферические нервные окончания подвергаются воздействию гораздо более сильного электрического поля, чем подлежащие корковые слои (Majdi et al. 2023; Van Boekholdt 2021; Vanneste et al. 2020). Стимуляция постоянным током может влиять на нейронные области опосредованно, т. е. через периферические нервы. В серии исследований (Vanneste et al. 2020) было показано, что стимуляция постоянным током может вызвать активацию большого затылочного нерва и улучшить память через восходящие волокна затылочного нерва к голубому пятну, способствуя высвобождению норадреналина. Этот норадренергический путь может иметь большое значение в управлении активностью гиппокампа путем изменения функциональных связей, поддерживающих консолидацию событий памяти (Vanneste et al. 2020). В другой работе (Majdi et al. 2023) отмечалось, что транскраниальная стимуляция постоянным током косвенно влияет на активность мозга через пути черепных нервов, особенно тройничного нерва. Эти ядра осуществляют контроль над центрами ствола мозга, регулирующими высвобождение нейротрансмиттеров, таких как серотонин и норадреналин, потенциально влияя на глобальную активность мозга (Majdi et al. 2023).

Тем не менее потенциальный вклад периферических механизмов в возникновение эффектов tDCS на данный момент (Van Boekholdt 2021) недостаточно систематически исследован.

Открытые вопросы и дискуссии

Однако остается много открытых вопросов и дискуссий о влиянии tDCS на отдельные нейроны.

Во-первых, дихотомии анодный — катодный, возбуждающий — ингибирующий не являются точными (Bikson et al. 2004; 2016). Модуляция мембранного потенциала не приводит непосредственно к увеличению/уменьшению возбудимости, поскольку эти понятия связаны с желаемым эффектом стимуляции. Например, деполяризация мембраны может привести к генерации потенциала действия — эффекту, который можно считать возбуждающим. Однако деполяризация дендритов может быть неблагоприятной для постсинаптических нейронов. Вероятно, увеличение мембранного потенциала снижает синаптический ответ постсинаптических нейронов, поскольку уменьшает движущую силу. Учитывая, что мембрана нейрона испытывает

специфический эффект поляризации, нельзя предполагать, что электрические поля всегда оказывают результирующее возбуждающее или тормозящее действие. Нельзя исключать, что поляризация аксонов и дендритов может быть в разной степени эффективной в модуляции клеточных функций (Rahman et al. 2013).

По мнению некоторых авторов (Bikson et al. 2004; 2016; Monai et al. 2016), исследований на экспериментальных животных *in vivo* недостаточно. Возможно, общее состояние мозга влияет на проводимость отдельных нейронов и, таким образом, на итоговые эффекты применения стимуляции.

Во время как влияние слабых электрических полей на одиночные нейроны хорошо описано как экспериментально, так и теоретически, общая структура для популяций нейронов все еще отсутствует. Вызванные ответы могут быть двусторонне модулированы слабыми электрическими полями как *in vitro*, так и *in vivo*. Эффекты могут зависеть не только от мембранной, но, возможно, и от терминальной поляризации. Стимуляция постоянным током увеличивает или уменьшает мощность гамма-колебаний, предположительно влияя на скорость возбуждения одиночных нейронов. При применении стимуляции к большим популяциям нейронов воздействие на отдельные нейроны может усиливаться динамикой нейрональных сетей.

Ряд авторов утверждает, что эффекты tDCS в отношении поляризации могут быть сильно дифференцированы от изменений порога потенциала действия на мембране отдельных нейронов до изменений активности на уровне нейрональных сетей (Radman et al. 2007), а также в отношении изменений синаптической передачи (Bikson et al. 2004), пластичности (Kris et al. 2019) и морфологических и молекулярных изменений (Pelletier, Cicchetti 2014).

Поляризация мембраны — не единственный механизм эффектов tDCS.

Согласно мнению западных авторов, еще не полностью изучено влияние электрических полей на клетки ненейронального типа (Monai et al. 2016). Например, роль в данном ракурсе глиальных клеток слабо изучена. Эти типы клеток имеют решающее значение для функции нейронов и, по-видимому, опосредуют некоторые длительные эффекты применения tDCS.

Стимуляция постоянным током может способствовать росту клеточных структур, что необходимо для реабилитационного эффекта при органических поражениях мозга. Широко используется tDCS для коррекции нарушений

речи у детей, для детей с гиперактивностью, при детском церебральном параличе и болезни Паркинсона. При воздействии микротоков, сопоставимых с физиологическим, оптимизируется морфофункциональное состояние нервного субстрата (Чайванов, Каркищенко 2011). Таким образом, корректируются нарушенные функции.

В отечественных исследованиях последних лет (Брагина и др. 2018) показано, что анодная tDCS вызывает пролонгированную дилатацию церебральных артериол и увеличение объёмного кровотока через артериолы, что усиливает капиллярный кровоток и улучшает метаболизм митохондрий вследствие улучшения доставки кислорода к тканям в интактном и травмированном мозге мыши. Механизмом tDCS-индуцированной дилатации церебральных артериол является активация eNOS и увеличение синтеза NO.

Идея о «поляризующем токе» может быть хоть и основным механизмом, рассматриваемым на данный момент, но не единственным. Вместе с тем все остальные возможные механизмы сегодня считаются вторичными по отношению к эффектам поляризации мембраны.

Заключение

В качестве заключения необходимо осветить вопрос о безопасности процедур tDCS. В настоящее время нет доказательств наличия рисков, связанных с применением транскраниальной стимуляции постоянным током.

На сегодняшний день, исходя из более чем 33 000 сеансов применения tDCS (Bikson et al. 2016) и более 1000 участников исследований, прошедших процедуру tDCS, нет никаких доказательств в пользу появления нарушений, вызванных сеансами, проведенными по стандартным протоколам в широком диапазоне

параметров стимуляции (≤ 40 мин, ≤ 4 мА, ≤ 7 сеансов).

Эти сведения также согласуются с другими работами в области безопасности применения метода (Liu et al. 2019; Moffa et al. 2017; Woods et al. 2015).

Отсутствие доказательств риска не отменяет того, что для любого протокола tDCS важна осторожность применения. Мониторинг безопасности по-прежнему является важнейшим компонентом проведения процедур. Как и в случае любого клинического исследования, необходима осторожность и ответственное отношение к применяемым коррекционным и экспериментальным методам.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Вклад авторов

а. Сиваченко Иван Борисович — идея работы, сбор данных, обработка данных, написание и редактирование рукописи;

б. Любашина Ольга Анатольевна — написание и редактирование рукописи.

Author Contributions

а. Ivan B. Sivachenko — conceptualization, data collection, data processing, manuscript writing and editing;

б. Olga A. Lyubashina — manuscript writing and editing.

Литература

- Брагина, О. А., Семячкина-Глушковская, О. В., Брагин, Д. Е. (2018) Анодная транскраниальная стимуляция постоянным током увеличивает церебральный кровоток, оксигенацию тканей и снижает неврологические нарушения у мышей в норме и в позднем посттравматическом периоде черепно-мозговой травмы. *Известия Саратовского университета. Серия: Химия. Биология. Экология*, т. 18, № 3, с. 354–360. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-3-354-360>
- Каркищенко, Н. Н., Вартанов, А. А., Чудина, Ю. А., Чайванов, Д. Б. (2017) Алгоритм расчета variability и величины воздействия электрического тока на основе математической модели растекания тока при транскраниальной микрополяризации по данным стереотактических координат. *Биомедицина*, № 1, с. 4–9.
- Каркищенко, Н. Н., Чайванов Д. Б., Чудина Ю. А. (2011) Перспективы применения биологического управления для повышения эффективности электрической стимуляции мозга. *Биомедицина*, № 4, с. 19–30.

- Князева, О. В., Белоусова, М. В., Прусаков, В. Ф., Зайкова, Ф. М. (2019) Применение транскраниальной микрополяризации в комплексной реабилитации детей с расстройством экспрессивной речи. *Вестник современной клинической медицины*, т. 12, № 1, с. 64–69. [https://doi.org/10.20969/VSKM.2019.12\(1\).64-69](https://doi.org/10.20969/VSKM.2019.12(1).64-69)
- Кожухов, А. А., Должич, А. В. (2017) Роль транскраниальной микрополяризации в лечении детей с амблиопией. *Медицинский вестник Юга России*, т. 8, № 2, с. 12–18. <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2017-8-2-12-18>
- Липатова, А. С., Каде, А. Х., Трофименко, А. И., Поляков, П. П. (2018) Коррекция стресс-индуцированных нейроиммуноэндокринных нарушений у самцов крыс с низкой устойчивостью к стрессу применением транскраниальной электростимуляции. *Человек и его здоровье*, № 3, с. 58–68. <https://doi.org/10.21626/vestnik/2018-3/09>
- Малыгин, А. В. (2009) Определение оптимальных параметров транскраниальной электростимуляции на основе математической модели нейронных структур. *Биотехносфера*, № 5 (5), с. 25–32.
- Мухина, И. В. (2007) *Физиология и биофизика возбудимых систем*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 105 с.
- Чайванов, Д. Б., Каркищенко, Н. Н. (2011) Математическая модель биофизических процессов при транскраниальной микрополяризации. *Биомедицина*, № 3, с. 6–11.
- Чайванов, Д. Б., Чудина, Ю. А. (2011) Применение нейромодуляции для коррекции психофункциональных состояний в процессе транскантного анализа. *Вестник Российского университета Дружбы Народов. Серия: Психология и педагогика*, № 4, с. 38–43.
- Филимонова, А. Е., Борсуков, А. В. (2009) Использование транскраниальной электростимуляции в клинике (обзор литературы). *Вестник Смоленской медицинской академии*, № 1, с. 130–133.
- Barbati, S., Podda, M., Grassi, C. (2022) Tuning brain networks: The emerging role of transcranial direct current stimulation on structural plasticity. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, vol. 16, article 945777. <https://doi.org/10.3389/fncel.2022.945777>
- Bikson, M., Grossman, P., Thomas, C. et al. (2016) Safety of transcranial direct current stimulation: Evidence based update. *Brain Stimulation*, vol. 9, no. 5, pp. 641–661. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.06.004>
- Bikson, M., Inoue, M., Akiyama, H. et al. (2004) Effects of uniform extracellular DC electric fields on excitability in rat hippocampal slices in vitro. *The Journal of Physiology*, vol. 557, no. 1, pp. 175–190. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.055772>
- Braun, R., Klein, R., Walter, H. et al. (2016) Transcranial direct current stimulation accelerates recovery of function, induces neurogenesis and recruits oligodendrocyte precursors in a rat model of stroke. *Experimental Neurology*, vol. 279, pp. 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2016.02.018>
- Dadgar, H., Majidi, H., Aghaei, S. (2022) Biological and neurobiological mechanisms of transcranial direct current stimulation. *Iranian Journal of Psychiatry*, vol. 17, no. 3, pp. 350–355. <https://doi.org/10.18502/ijps.v17i3.9735>
- Jung, D., Ahn, S., Pak, M. et al. (2020) Therapeutic effects of anodal transcranial direct current stimulation in a rat model of ADHD. *eLife*, vol. 9, article e56359. <https://doi.org/10.7554/eLife.56359>
- Fregni, F., Macedo, I., Spezia-Adachi, L. et al. (2018) Transcranial direct current stimulation (tDCS) prevents chronic stress-induced hyperalgesia in rats. *Brain Stimulation*, vol. 11, no. 2, pp. 299–301. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.11.009>
- Fritsch, B., Reis, J., Martinowich, K. et al. (2010) Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: Potential implications for motor learning. *Neuron*, vol. 66, no. 2, pp. 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.035>
- Gardner-Medwin, A. (1983) Analysis of potassium dynamics in mammalian brain tissue. *The Journal of Physiology*, vol. 335, pp. 393–426. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1983.sp014541>
- Liu, H., He, X., Chen, H. et al. (2019) Neuromodulatory effects of transcranial direct current stimulation on motor excitability in rats. *Neural Plasticity*, vol. 2019, article 4252943. <https://doi.org/10.1155/2019/4252943>
- Jackson, M., Rahman, A., Lafon, B. et al. (2016) Animal models of transcranial direct current stimulation: methods and mechanisms. *Clinical Neurophysiology*, vol. 127, no. 11, pp. 3425–3454. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.08.016>
- Jackson, M. P., Truong, D., Brownlow, M. L. et al. (2017) Safety parameter considerations of anodal transcranial direct current stimulation in rats. *Brain, Behavior, and Immunity*, vol. 64, pp. 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2017.04.008>
- Jooyoung, O., Jinsil, H., Dongrae, C. et al. (2019) The effects of transcranial direct current stimulation on the cognitive and behavioral changes after electrode implantation surgery in rats. *Frontiers in Psychiatry*, vol. 10, article 291. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2019.00291>
- Joyce, G., Miklasevich, M., McInturf, S. et al. (2020) Polarity and subfield specific effects of transcranial direct current stimulation on hippocampal plasticity. *Neurobiology of Learning and Memory*, vol. 167, article 107126. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2019.107126>
- Kris, M., Pechacek, K., Modrak, C. et al. (2019) Cathodal transcranial direct-current stimulation selectively decreases impulsivity after traumatic brain injury in rats. *Journal of Neurotrauma*, vol. 36, no. 19, pp. 2827–2830. <https://doi.org/10.1089/neu.2019.6470>
- Kronberg, G., Bridi, M., Abel, T. et al. (2017) Direct current stimulation modulates LTP and LTD: Activity dependence and dendritic effects. *Brain Stimulation*, vol. 10, no. 1, pp. 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.10.001>

- Majdi, A., Asamoah, B., Mc Laughlin, M. (2023) Reinterpreting published tDCS results in terms of a cranial and cervical nerve co-stimulation mechanism. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 17, article 1101490. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1101490>
- Moffa, A., Brunoni, A., Fregni, F. et al. (2017) Safety and acceptability of transcranial direct current stimulation for the acute treatment of major depressive episodes: Analysis of individual patient data. *Journal of Affective Disorders*, vol. 221, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2017.06.021>
- Milighetti, S., Sterzi, S., Fregni, F. et al. (2020) Effects of tDCS on spontaneous spike activity in a healthy ambulatory rat model. *Brain Stimulation*, vol. 13, no. 6, pp. 1566–1576. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.08.016>
- Monai, H., Ohkura, M., Tanaka, M. et al. (2016) Calcium imaging reveals glial involvement in transcranial direct current stimulation-induced plasticity in mouse brain. *Nature Communications*, vol. 7, article 11100. <https://doi.org/10.1038/ncomms11100>
- Nitsche, M., Paulus, W. (2000) Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *The Journal of Physiology*, vol. 527, no. 3, pp. 633–639. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x>
- Notturmo, F., Pace, M., Zappasodi, F. et al. (2014) Neuroprotective effect of cathodal transcranial direct current stimulation in a rat stroke model. *Journal of the Neurological Sciences*, vol. 342, no. 1, pp. 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2014.05.017>
- Pelletier, S., Cicchetti, F. (2014) Cellular and molecular mechanisms of action of transcranial direct current stimulation: Evidence from in vitro and in vivo models. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, vol. 18, no. 2, article pyu047. <https://doi.org/10.1093/ijnp/pyu047>
- Pikhovych, A., Stolberg, P. N., Flitsch, L. J. et al. (2016) Transcranial direct current stimulation modulates neurogenesis and microglia activation in the mouse brain. *Stem Cells International*, vol. 2016, article 2715196. <https://doi.org/10.1155/2016/2715196>
- Radman, T., Datta, A., Peterchev, A. (2007) *In vitro* modulation of endogenous rhythms by AC electric fields: Syncing with clinical brain stimulation. *The Journal of Physiology*, vol. 584, no. 2, pp. 369–370. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.140947>
- Rahman, A., Reato, D., Arlotti, M. et al. (2013) Cellular effects of acute direct current stimulation: Somatic and synaptic terminal effects. *The Journal of Physiology*, vol. 591, no. 10, pp. 2563–2578. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.247171>
- Rizzo, V., Terranova, C., Crupi, D. et al. (2014) Increased transcranial direct current stimulation after effects during concurrent peripheral electrical nerve stimulation. *Brain Stimulation*, vol. 7, no. 1, pp. 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2013.10.002>
- Sánchez León, C., Cordones, I., Ammann, C. et al. (2021) Immediate and after effects of transcranial direct current stimulation in the mouse primary somatosensory cortex. *Scientific Reports*, vol. 11, article 3123. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82364-4>
- Sehatpour, P., Dondé, C., Hoptman, M. et al. (2020) Network-level mechanisms underlying effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on visuomotor learning. *Neuroimage*, vol. 223, article 117311. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117311>
- Tanaka, T., Isomura, Y., Kobayashi, K. et al. (2020) Electrophysiological effects of transcranial direct current stimulation on neural activity in the rat motor cortex. *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, article 495. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00495>
- Van Boekholdt, L., Kerstens, S., Khatoun, A. et al. (2021) tDCS peripheral nerve stimulation: A neglected mode of action? *Molecular Psychiatry*, vol. 26, no. 2, pp. 456–461. <https://doi.org/10.1038/s41380-020-00962-6>
- Vanneste, S., Mohan, A., Yoo, H. et al. (2020) The peripheral effect of direct current stimulation on brain circuits involving memory. *Science Advances*, vol. 6, no. 45, article eaax9538. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax9538>
- Winkler, C., Reis, J., Hoffmann, N. et al. (2017) Anodal transcranial direct current stimulation enhances survival and integration of dopaminergic cell transplants in a rat Parkinson model. *ENEURO*, vol. 4, no. 5, article ENEURO.0063-17.2017. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0063-17.2017>
- Woods, A., Antal, A., Bikson, M. et al. (2015) A technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools. *Clinical Neurophysiology*, vol. 127, no. 2, pp. 1031–1048. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.11.012>
- Wu, Y., Chien, M., Huang, C. et al. (2020) Transcranial direct current stimulation alleviates seizure severity in kainic acid-induced status epilepticus rats. *Experimental Neurology*, vol. 328, article 113264. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2020.113264>
- Yamada, Y., Sumiyoshi, T. (2021) Neurobiological mechanisms of transcranial direct current stimulation for psychiatric disorders; neurophysiological, chemical, and anatomical considerations. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 15, article 631838. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.631838>
- Zaehle, T., Rach, S., Herrmann, C. (2010) Transcranial alternating current stimulation enhances individual alpha activity in human EEG. *PLoS One*, vol. 5, no. 11, article e13766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013766>
- Zhao, H., Qiao, L., Fan, D. et al. (2017) Modulation of brain activity with noninvasive transcranial direct current stimulation (tDCS): Clinical applications and safety concerns. *Frontiers in Psychology*, vol. 8, article 685. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00685>

References

- Barbati, S., Podda, M., Grassi, C. (2022) Tuning brain networks: The emerging role of transcranial direct current stimulation on structural plasticity. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, vol. 16, article 945777. <https://doi.org/10.3389/fncel.2022.945777> (In English)
- Bikson, M., Grossman, P., Thomas, C. et al. (2016) Safety of transcranial direct current stimulation: Evidence based update. *Brain Stimulation*, vol. 9, no. 5, pp. 641–661. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.06.004> (In English)
- Bikson, M., Inoue, M., Akiyama, H. et al. (2004) Effects of uniform extracellular DC electric fields on excitability in rat hippocampal slices in vitro. *The Journal of Physiology*, vol. 557, no. 1, pp. 175–190. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.055772> (In English)
- Bragina, O. A., Semyachkina-Glushkovskaya, O. V., Bragin, D. E. (2018) Anodal transcranial direct current stimulation increases cerebral blood flow, tissue oxygenation and reduces neurological disorders in mice in normal conditions and in the late post-traumatic period of traumatic brain injury. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*, vol. 18, no. 3, pp. 354–360. (In Russian)
- Braun, R., Klein, R., Walter, H. et al. (2016) Transcranial direct current stimulation accelerates recovery of function, induces neurogenesis and recruits oligodendrocyte precursors in a rat model of stroke. *Experimental Neurology*, vol. 279, pp. 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2016.02.018> (In English)
- Chaivanov, D. B., Chudina, Yu. A. (2011) Application of neuromodular techniques for correction of personality characteristics in the course of transactional analysis. *RUDN Journal of Psychology and Pedagogics*, no. 4, pp. 38–43. (In Russian)
- Chaivanov, D. B., Karkishchenko, N. N. (2011) Mathematical model of biophysical processes at transcranial micropolarization. *Biomedicine*, no. 3, pp. 6–11. (In Russian)
- Dadgar, H., Majidi, H., Aghaei, S. (2022) Biological and neurobiological mechanisms of transcranial direct current stimulation. *Iranian Journal of Psychiatry*, vol. 17, no. 3, pp. 350–355. (In English)
- Jung, D., Ahn, S., Pak, M. et al. (2020) Therapeutic effects of anodal transcranial direct current stimulation in a rat model of ADHD. *eLife*, vol. 9, article e56359. <https://doi.org/10.7554/eLife.56359> (In English)
- Filimonova, A. E., Borsukov, A. V. (2009) Use of transcranial electrical stimulation in clinical practice (literature review). *Vestnik of the Smolensk State Medical Academy*, no. 1, pp. 130–133. (In Russian)
- Fregni, F., Macedo, I., Spezia-Adachi, L. et al. (2018) Transcranial direct current stimulation (tDCS) prevents chronic stress-induced hyperalgesia in rats. *Brain Stimulation*, vol. 11, no. 2, pp. 299–301. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.11.009> (In English)
- Fritsch, B., Reis, J., Martinowich, K. et al. (2010) Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: Potential implications for motor learning. *Neuron*, vol. 66, no. 2, pp. 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.035> (In English)
- Gardner-Medwin, A. (1983) Analysis of potassium dynamics in mammalian brain tissue. *The Journal of Physiology*, vol. 335, pp. 393–426. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1983.sp014541> (In English)
- Liu, H., He, X., Chen, H. et al. (2019) Neuromodulatory effects of transcranial direct current stimulation on motor excitability in rats. *Neural Plasticity*, vol. 2019, article 4252943. <https://doi.org/10.1155/2019/4252943> (In English)
- Jackson, M., Rahman, A., Lafon, B. et al. (2016) Animal models of transcranial direct current stimulation: methods and mechanisms. *Clinical Neurophysiology*, vol. 127, no. 11, pp. 3425–3454. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.08.016> (In English)
- Jackson, M. P., Truong, D., Brownlowa, M. L. et al. (2017) Safety parameter considerations of anodal transcranial direct current stimulation in rats. *Brain, Behavior and Immunity*, vol. 64, pp. 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2017.04.008> (In English)
- Jooyoung, O., Jinsil, H., Dongrae, C. et al. (2019) The effects of transcranial direct current stimulation on the cognitive and behavioral changes after electrode implantation surgery in rats. *Frontiers in Psychiatry*, vol. 10, article 291. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2019.00291> (In English)
- Joyce, G., Miklasevich, M., McInturf, S. et al. (2020) Polarity and subfield specific effects of transcranial direct current stimulation on hippocampal plasticity. *Neurobiology of Learning and Memory*, vol. 167, article 107126. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2019.107126> (In English)
- Karkishchenko, N. N., Chaivanov, D. B., Chudina, Yu. A. (2011) Prospects of biological application for increase of brain electric stimulation efficiency. *Biomedicine*, no. 4, pp. 19–30. (In Russian)
- Karkishchenko, N. N., Vartanov, A. A., Chudina, Yu. A., Chaivanov, D. B. (2017) Calculation algorithm of variability and size of current flow on the basis mathematical model of spreading current in case of transcranial micropolarization according to stereotaxis coordinates. *Biomedicine*, no. 1, pp. 4–9. (In Russian)
- Knyazeva, O. V., Belousova, M. V., Prusakov, V. F., Zaykova, F. M. (2019) Transcranial micropolarization application in complex rehabilitation in children with expressive speech disorder. *The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine*, no. 1, pp. 64–69. [https://doi.org/10.20969/VSKM.2019.12\(1\).64-69](https://doi.org/10.20969/VSKM.2019.12(1).64-69) (In Russian)
- Kozhukhov, A. A., Dolzhich, A. V. (2017) Role of transcranial direct current stimulation in treatment of children with amblyopia. *Medical Herald of the South of Russia*, vol. 8, no. 2, pp. 12–18. <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2017-8-2-12-18> (In Russian)

- Kris, M., Pechacek, K., Modrak, C. et al. (2019) Cathodal transcranial direct-current stimulation selectively decreases impulsivity after traumatic brain injury in rats. *Journal of Neurotrauma*, vol. 36, no. 19, pp. 2827–2830. <https://doi.org/10.1089/neu.2019.6470> (In English)
- Kronberg, G., Bridi, M., Abel, T. et al. (2017) Direct current stimulation modulates LTP and LTD: Activity dependence and dendritic effects. *Brain Stimulation*, vol. 10, no. 1, pp. 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.10.001> (In English)
- Lipatova, A. S., Kade, A. Kh., Trofimenko, A. I., Polyakov, P. P. (2018) Correction of stress-induced neuroimmunoendocrine disturbances in male rats with low stress sustainability by transcranial direct current stimulation. *Kursk Scientific and Practical Bulletin "Man and His Health"*, no. 3, pp. 58–68. <https://doi.org/10.21626/vestnik/2018-3/09> (In Russian)
- Majdi, A., Asamoah, B., Mc Laughlin, M. (2023) Reinterpreting published tDCS results in terms of a cranial and cervical nerve co-stimulation mechanism. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 17, article 1101490. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1101490> (In English)
- Malygin, A. V. (2009) Evaluation of optimal parameters of the transcranial electrostimulation based on mathematic model of excitation of the neural structures. *Biotechnosfera*, no. 5 (5), pp. 25–32. (In Russian)
- Moffa, A., Brunoni, A., Fregni, F. et al. (2017) Safety and acceptability of transcranial direct current stimulation for the acute treatment of major depressive episodes: Analysis of individual patient data. *Journal of Affective Disorders*, vol. 221, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2017.06.021> (In English)
- Milighetti, S., Sterzi, S., Fregni, F. et al. (2020) Effects of tDCS on spontaneous spike activity in a healthy ambulatory rat model. *Brain Stimulation*, vol. 13, no. 6, pp. 1566–1576. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.08.016> (In English)
- Monai, H., Ohkura, M., Tanaka, M. et al. (2016) Calcium imaging reveals glial involvement in transcranial direct current stimulation-induced plasticity in mouse brain. *Nature Communications*, vol. 7, article 11100. <https://doi.org/10.1038/ncomms11100> (In English)
- Mukhina, I. V. (2007) *Physiology and biophysics of excitable systems*. Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publ., 105 p. (In Russian)
- Nitsche, M., Paulus, W. (2000) Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *The Journal of Physiology*, vol. 527, no. 3, pp. 633–639. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x> (In English)
- Notturmo, F., Pace, M., Zappasodi, F. et al. (2014) Neuroprotective effect of cathodal transcranial direct current stimulation in a rat stroke model. *Journal of the Neurological Sciences*, vol. 342, no. 1, pp. 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2014.05.017> (In English)
- Pelletier, S., Cicchetti, F. (2014) Cellular and molecular mechanisms of action of transcranial direct current stimulation: Evidence from in vitro and in vivo models. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, vol. 18, no. 2, article pyu047. <https://doi.org/10.1093/ijnp/pyu047> (In English)
- Pikhovych, A., Stolberg, P. N., Flitsch, L. J. et al. (2016) Transcranial direct current stimulation modulates neurogenesis and microglia activation in the mouse brain. *Stem Cells International*, vol. 2016, article 2715196. <https://doi.org/10.1155/2016/2715196> (In English)
- Radman, T., Datta, A., Peterchev, A. (2007) *In vitro* modulation of endogenous rhythms by AC electric fields: Syncing with clinical brain stimulation. *The Journal of Physiology*, vol. 584, no. 2, pp. 369–370. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.140947> (In English)
- Rahman, A., Reato, D., Arlotti, M. et al. (2013) Cellular effects of acute direct current stimulation: Somatic and synaptic terminal effects. *The Journal of Physiology*, vol. 591, no. 10, pp. 2563–2578. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.247171> (In English)
- Rizzo, V., Terranova, C., Crupi, D. et al. (2014) Increased transcranial direct current stimulation after effects during concurrent peripheral electrical nerve stimulation. *Brain Stimulation*, vol. 7, no. 1, pp. 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2013.10.002> (In English)
- Sánchez León, C., Cordones, I., Ammann, C. et al. (2021) Immediate and after effects of transcranial direct current stimulation in the mouse primary somatosensory cortex. *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, article 3123. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82364-4> (In English)
- Sehatpour, P., Dondé, C., Hoptman, M. et al. (2020) Network-level mechanisms underlying effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on visuomotor learning. *Neuroimage*, vol. 223, article 117311. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117311> (In English)
- Tanaka, T., Isomura, Y., Kobayashi, K. et al. (2020) Electrophysiological effects of transcranial direct current stimulation on neural activity in the rat motor cortex. *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, article 495. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00495> (In English)
- Van Boekholdt, L., Kerstens, S., Khatoun, A. et al. (2021) tDCS peripheral nerve stimulation: A neglected mode of action? *Molecular Psychiatry*, vol. 26, no. 2, pp. 456–461. <https://doi.org/10.1038/s41380-020-00962-6> (In English)
- Vanneste, S., Mohan, A., Yoo, H. et al. (2020) The peripheral effect of direct current stimulation on brain circuits involving memory. *Science Advances*, vol. 6, no. 45, article eaax9538. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax9538> (In English)

- Winkler, C., Reis, J., Hoffmann, N. et al. (2017) Anodal transcranial direct current stimulation enhances survival and integration of dopaminergic cell transplants in a rat Parkinson model. *ENEURO*, vol. 4, no. 5, article ENEURO.0063-17.2017. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0063-17.2017> (In English)
- Woods, A., Antal, A., Bikson, M. et al. (2015) A technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools. *Clinical Neurophysiology*, vol. 127, no. 2, pp. 1031–1048. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.11.012> (In English)
- Wu, Y., Chien, M., Huang, C. et al. (2020) Transcranial direct current stimulation alleviates seizure severity in kainic acid-induced status epilepticus rats. *Experimental Neurology*, vol. 328, article 113264. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2020.113264> (In English)
- Yamada, Y., Sumiyoshi, T. (2021) Neurobiological mechanisms of transcranial direct current stimulation for psychiatric disorders; neurophysiological, chemical, and anatomical considerations. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 15, article 631838. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.631838> (In English)
- Zaehle, T., Rach, S., Herrmann, C. (2010) Transcranial alternating current stimulation enhances individual alpha activity in human EEG. *PLoS One*, vol. 5, no. 11, article e13766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013766> (In English)
- Zhao, H., Qiao, L., Fan, D. et al. (2017) Modulation of brain activity with noninvasive transcranial direct current stimulation (tDCS): Clinical applications and safety concerns. *Frontiers in Psychology*, vol. 8, article 685. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00685> (In English)