

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2026

МЕТОДЫ НЕИНВАЗИВНОЙ ТЕРАПИИ И РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ, ПЕРЕНЕСШИХ ПОЗВОНОЧНО-СПИННОМОЗГОВУЮ ТРАВМУ

Соловьев Д.А.¹, Аксютенко А.Г.², Котыхова Я.В.², Кузьмина О.А.³, Сидуненко А.И.⁴, Харисова К.Р.⁴

¹Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

²Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский медико-социальный институт, Санкт-Петербург, Россия

Резюме

Позвоночно-спинномозговая травма остается одной из наиболее сложных медико-социальных проблем, приводящей к стойкой инвалидизации. Современные методы нейромодуляции предлагают новые возможности восстановления двигательных функций, уменьшения спастичности и контроля невропатической боли, однако их эффективность требует систематической оценки.

Цель: обобщить современные данные о применении функциональной электрической стимуляции, транскраниальной магнитной стимуляции, транскраниальной стимуляции постоянным током и транскутанной стимуляции спинного мозга у пациентов со спинальной травмой.

Материал и методы. Проведен анализ систематических обзоров и метаанализов, опубликованных в международных базах данных (PubMed, Scopus, Web of Science, eLibrary) за период 2015–2025 гг. Рассмотрены 35 источников, включающие результаты рандомизированных клинических исследований и сетевых метаанализов.

Результаты. Функциональная электрическая стимуляция продемонстрировала выраженный эффект в улучшении дыхательной функции, выносливости и снижении спастичности. Транскраниальная магнитная стимуляция способствовала восстановлению двигательных функций, увеличению силы мышц и уменьшению боли. Транскраниальная стимуляция постоянным током проявила умеренное болеутоляющее действие при сохранении высокого профиля безопасности. Транскутанная стимуляция спинного мозга показала эффективность в снижении спастичности и улучшении силы нижних конечностей, особенно в сочетании с физической реабилитацией.

Заключение. Неинвазивная нейромодуляция — перспективное дополнение к терапии позвоночно-спинномозговой травмы. Она улучшает восстановление двигательных функций, уменьшает спастичность и боль, повышает качество жизни. Для внедрения в клиническую практику необходимы дополнительные исследования высокого уровня доказательности.

Ключевые слова: спинальная травма, функциональная электрическая стимуляция, транскраниальная магнитная стимуляция, транскраниальная стимуляция постоянным током, транскутанная стимуляция спинного мозга, нейропластичность, реабилитация

Для цитирования: Соловьев Д.А., Аксютенко А.Г., Котыхова Я.В., Кузьмина О.А., Сидуненко А.И., Харисова К.Р. Методы неинвазивной терапии и реабилитации пациентов, перенесших позвоночно-спинномозговую травму. *Российский неврологический журнал*. 2026;31(2):15–22. DOI 10.30629/2658-7947-2026-31-2-15-22

Для корреспонденции: Соловьев Д.А., e-mail: dankrute@gmail.com

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки.

Информация об авторах

Соловьев Д.А., <https://orcid.org/0009-0007-8821-348X>; e-mail: dankrute@gmail.com

Аксютенко А.Г., <https://orcid.org/0009-0009-4316-4999>; e-mail: aksyutenko27@yandex.ru

Котыхова Я.В., <https://orcid.org/0009-0001-3778-8175>; e-mail: yanakotyhova@mail.ru

Кузьмина О.А., <https://orcid.org/0009-0001-8491-9238>; e-mail: serafimkat99@mail.ru

Сидуненко А.И., <https://orcid.org/0009-0004-7230-0237>; e-mail: asidunenko2002@mail.ru

Харисова К.Р., <https://orcid.org/0009-0002-8290-5980>; e-mail: milok01012014@gmail.com

THE METHODS OF NON-INVASIVE THERAPY AND REHABILITATION IN PATIENTS WITH SPINAL CORD INJURY

Solovev D.A.¹, Aksyutenko A.G.², Kotykhova Y.V.², Kuzmina O.A.³, Sidunen A.I.⁴, Kharisova K.R.⁴

¹S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

²North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia

⁴St. Petersburg Medical-Social Institute, St. Petersburg, Russia

Abstract

Spinal cord injury remains one of the most challenging medical and social issues, leading to long-term disability. Modern neuromodulation techniques provide new opportunities for motor function recovery, spasticity reduction, and neuropathic pain control; however, their effectiveness requires systematic evaluation.

Objective. To summarize current evidence on the use of functional electrical stimulation, transcranial magnetic stimulation, transcranial direct current stimulation, and transcutaneous spinal cord stimulation in patients with spinal

cord injury.

Material and methods. A review of systematic reviews and meta-analyses published in international databases (PubMed, Scopus, Web of Science, eLibrary) between 2015 and 2025 was performed. A total of 35 sources, including results of randomized clinical trials and network meta-analyses, were analyzed.

Results. Functional electrical stimulation demonstrated a pronounced effect in improving respiratory function, endurance, and reducing spasticity. Transcranial magnetic stimulation contributed to motor function recovery, increased muscle strength, and reduced pain. Transcranial direct current stimulation showed moderate analgesic effects while maintaining a high safety profile. Transcutaneous spinal cord stimulation was effective in reducing spasticity and improving lower limb strength, particularly when combined with physical rehabilitation.

Conclusion. Non-invasive neuromodulation is a promising adjunct to standard therapy for spinal cord injury. It enhances motor function recovery, reduces spasticity and pain, and improves patients' quality of life. Further high-quality studies are needed before its integration into clinical practice.

Key words: spinal cord injury, functional electrical stimulation, transcranial magnetic stimulation, transcranial direct current stimulation, transcutaneous spinal cord stimulation, neuroplasticity, rehabilitation

For citation: Solovev D.A., Aksyutenko A.G., Kotykhova Y.V., Kuzmina O.A., Sidunenko A.I., Kharisova K.R. The methods of non-invasive therapy and rehabilitation in patients with spinal cord injury. *Russian Neurological Journal (Rossijskij Nevrologicheskij Zhurnal)*. 2026;31(2):15–22. (In Russian). DOI 10.30629/2658-7947-2026-31-2-15-22

For correspondence: Solovev D.A., e-mail: dankrute@gmail.com

Conflict of interest. The authors declare there is no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Information about authors

Solovev D.A., <https://orcid.org/0009-0007-8821-348X>; e-mail: dankrute@gmail.com

Aksyutenko A.G., <https://orcid.org/0009-0009-4316-4999>; e-mail: aksyutenko27@yandex.ru

Kotykhova Y.V., <https://orcid.org/0009-0001-3778-8175>; e-mail: yanakotykhova@mail.ru

Kuzmina O.A., <https://orcid.org/0009-0001-8491-9238>; e-mail: serafimkat99@mail.ru

Sidunenko A.I., <https://orcid.org/0009-0004-7230-0237>; e-mail: asidunenko2002@mail.ru

Kharisova K.R., <https://orcid.org/0009-0002-8290-5980>; e-mail: milok01012014@gmail.com

Received 19.09.2025
Accepted 25.03.2026

Сокращения: ЛФК — лечебная физкультура; НИСМ — неинвазивная стимуляция мозга; РКИ — рандомизированные клинические исследования; ПСМТ — позвоночно-спинномозговая травма; рТМС — ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция; СМ — спинной мозг; ТкС-СМ — транскутанная стимуляция спинного мозга; ТМС — транскраниальная магнитная стимуляция; ТСПТ — транскраниальная стимуляция постоянным током; VO₂peak — пиковое потребление кислорода; ТИС — тета-импульсная стимуляция; иТИС — интермиттирующая тета-импульсная стимуляция; нТИС — непрерывная тета-импульсная стимуляция; ФЭС — функциональная электрическая стимуляция; ASIA — American Spinal Injuri Association; N — число наблюдений; SMD — стандартизированная разница средних.

Введение. Повреждения спинного мозга (СМ) рассматриваются как одно из наиболее тяжелых и социально значимых неврологических расстройств. По оценкам Всемирной организации здравоохранения ежегодно в мире фиксируется от 250 до 500 тыс. новых случаев травм СМ [1]. Общая численность людей, живущих с последствиями таких травм, превышает 20 миллионов [2]. Эпидемиологические показатели различаются по регионам и зависят от уровня социально-экономического развития страны, особенностей травматизма и качества оказания медицинской помощи. Так, в ряде индустриально

развитых государств уровень первичной заболеваемости достигает 40–60 случаев на миллион населения в год, тогда как в странах с низким и средним уровнем экономического развития этот показатель колеблется в пределах 12–30 случаев [3, 4]. При определенном снижении травматизма на производстве, продолжают расти показатели дорожно-транспортных происшествий и бытовых падений.

Позвоночно-спинномозговая травма (ПСМТ) сопровождается тяжелыми неврологическими нарушениями. При повреждении шейного уровня часто формируется тетраплегия, при поражениях грудного и поясничного отделов — параплегия. К двигательному дефициту добавляются выраженные сенсорные нарушения, а также автономные и тазовые нарушения — проблемы с мочеиспусканием, дефекацией, сексуальной функцией, регуляцией артериального давления и температуры тела [5].

Функциональные ограничения закономерно приводят к значительному снижению качества жизни. Пациенты утрачивают способность к самообслуживанию, нуждаются в постоянной посторонней помощи, что способствует социальной изоляции и развитию депрессивных расстройств. По данным ряда исследований, уровень безработицы среди людей с последствиями ПСМТ превышает 60%, а значительная часть детей и подростков с таким диагнозом сталкивается с трудностями в получении образования [6]. Последствия травм СМ отражаются и на продолжительности жизни. В условиях развитых

систем здравоохранения при адекватной медицинской и социальной поддержке продолжительность жизни пациентов может приближаться к таковой у общей популяции. Однако в странах с ограниченными ресурсами показатели смертности остаются высокими: значительная часть больных погибает в течение первых лет после травмы в результате инфекционных осложнений, пролежней, дыхательных нарушений [7].

ПСМТ является одним из наиболее дорогостоящих медицинских состояний с точки зрения затрат здравоохранения. Наибольшие расходы связаны с длительным пребыванием в стационаре, необходимостью хирургических вмешательств, затратами на интенсивную терапию и реабилитацию. Дополнительные финансовую нагрузку составляют расходы на технические средства реабилитации, средства для ухода, а также социальные выплаты. По результатам экономических исследований, совокупные пожизненные расходы на одного пациента с тяжелым повреждением спинного мозга может превышать несколько миллионов долларов США преимущественно в высокоразвитых странах (в первую очередь в США, Канаде, Австралии и Великобритании) [8]. При этом важно учитывать, что речь идет не только о прямых медицинских расходах, но и о косвенных издержках. Утрата трудоспособности, необходимость ухода со стороны родственников или социальных работников формируют масштабное экономическое бремя для общества.

Ограниченность традиционных методов лечения. Несмотря на значительные достижения в области нейрохирургии и интенсивной терапии, современные подходы к лечению травм СМ остаются ограниченными. Хирургическое лечение направлено на устранение компрессии, стабилизацию позвоночника и предупреждение вторичных повреждений, но не гарантирует функциональное восстановление. Медикаментозные методы (кортикостероиды, нейропротекторы, антиоксиданты) могут снизить выраженность воспалительных процессов и вторичных повреждений, однако их влияние на долгосрочные исходы ограничено [9]. Реабилитация играет ключевую роль в улучшении качества жизни, однако она сталкивается с рядом проблем: нехваткой квалифицированных специалистов, высокой стоимостью программ, недостаточной продолжительностью курсов и разрозненностью методик [10].

Во многих странах доступ к полноценной реабилитации остается затрудненным, особенно в сельских регионах и при низком уровне дохода пациентов. Таким образом, ПСМТ представляет собой не только медицинскую, но и масштабную социально-экономическую проблему. Высокая распространенность, тяжесть последствий, снижение продолжительности и качества жизни, а также ограниченность существующих методов лечения делают поиск новых терапевтических стратегий крайне актуальным. Особое внимание в последние годы уделяется неинвазивным методам терапии и нейромодуляции, которые

открывают перспективы для более эффективного восстановления функций и снижения уровня инвалидизации.

Исследователи и клиницисты все чаще обращаются к методам, направленным на активацию механизмов нейропластичности, посредством нейрореабилитации и нейромодуляции, что отражает переход к стратегии, усиливающей собственные восстановительные ресурсы организма [11]. Такой подход включает применение технологий биологической обратной связи, роботизированную терапию, виртуальную реальность и даже элементы телереабилитации [12–14]. Это позволяет стимулировать двигательные и чувствительные функции, поддерживать мотивацию пациента во время длительных программ реабилитации. Новое направление — нейромодуляция, которая предполагает воздействие на нервные структуры с целью изменения их функционального состояния. При этом используются как инвазивные методы, так и неинвазивные, которые, в отличие от первых, обладают простотой применения и безопасностью.

Методы. При подготовке обзора был проведен систематический поиск научных публикаций, посвященных современным методам терапии пациентов с травмой спинного мозга, с особым акцентом на неинвазивную нейромодуляцию и функциональную электрическую стимуляцию. Поиск осуществлялся в международных и национальных библиографических базах данных: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Cochrane Library, eLibrary.

Критерии включения исследований. В обзор были отобраны работы, соответствующие следующим критериям: тип публикации: рандомизированные контролируемые исследования (РКИ), систематические обзоры, метаанализы, проспективные клинические исследования. Период публикации: с 2010 по 2025 г. Языки публикаций: английский и русский. Тематика: методы неинвазивной нейромодуляции (транскраниальная магнитная стимуляция, транскраниальная стимуляция постоянным током, транскраниальная стимуляция спинного мозга, функциональная электрическая стимуляция) у пациентов с острой или хронической травмой спинного мозга.

Исключающие критерии. Из анализа исключались: экспериментальные исследования на животных без клинического применения; работы с отсутствием четко описанной методики; публикации с недостаточным статистическим обоснованием (например, серии клинических случаев без контрольной группы).

Поисковая стратегия. Для систематического поиска использовались ключевые слова и их комбинации. На английском языке: spinal cord injury, non-invasive neuromodulation, transcranial magnetic stimulation, transcranial direct current stimulation, transcutaneous spinal cord stimulation, functional electrical stimulation, neurorehabilitation; на русском языке: травма спинного мозга, неинвазивная нейромодуляция, транскраниальная магнитная

стимуляция, транскраниальная стимуляция постоянным током, транскутанная стимуляция спинного мозга, функциональная электрическая стимуляция, нейрореабилитация.

Всего было выявлено более 1200 публикаций, из которых после удаления дубликатов, анализа аннотаций и текстов были отобраны 21 источник (12 метаанализов/систематических обзоров, восемь технических обзоров, два клинических исследования).

Функциональная электрическая стимуляция (ФЭС). Одним из классических методов является (ФЭС), которая активно применяется для восстановления дыхательной функции и общей физической выносливости. Согласно метаанализу, включающему 23 рандомизированных исследования ($N = 314$), функциональная электрическая стимуляция как самостоятельное лечение достоверно повышает показатели выдоха (мгновенная скорость выдоха, $SMD = 0,42$, $p = 0,007$), максимальное давление выдоха ($SMD = 0,93$, $p = 0,008$) и жизненную емкость легких ($SMD = 0,37$, $p = 0,03$) (SMD — стандартизованная разница средних величин, показывает величину эффекта лечения относительно контрольной группы в единицах стандартного отклонения. Так, $SMD = 0,42$ означает, что средний эффект ФЭС превышает показатели контроля почти на половину стандартного отклонения, $SMD = 0,93$ — почти на одно стандартное отклонение, что соответствует сильному эффекту, а $SMD = 0,37$ — умеренному эффекту). В сочетании с упражнениями (гребля или велотренажер) значительно улучшает показатели аэробной выносливости (VO_{2peak} : $SMD = 0,35$ и $SMD = 0,24$ соответственно) [15].

Другой обзор, посвященный велотренировкам с электрической стимуляцией у пациентов с ПСМТ, продемонстрировал высокую эффективность в улучшении мышечной массы и аэробной выносливости, поддерживая необходимость включения ФЭС-велотренировок в стандарты клинической практики [16].

Кроме того, метаанализ, оценивающий влияние функциональной электрической стимуляции на спастичность, дистанцию ходьбы и силу нижних конечностей, подтвердил дозозависимый эффект: значительное уменьшение спастичности и увеличение силы мышц ног при достаточном числе сеансов, а также улучшение времени выполнения тестов мобильности [17].

Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС). Принцип метода ТМС основан на индуцировании электрического тока в корковых нейронах с помощью магнитного поля, создаваемого катушкой, расположенной над поверхностью черепа. В зависимости от режима стимуляции можно либо возбуждать, либо ингибировать нейронные цепи, что делает метод гибким инструментом в нейрореабилитации. Основная цель применения ТМС у пациентов с травмой спинного мозга — активация кортико-спинальных путей, усиление

нейропластичности и восстановление моторных функций [18].

В клинической практике применяются несколько основных режимов ТМС [19]:

высокочастотная стимуляция (> 5 Гц) — повышает возбудимость моторной коры и усиливает нисходящий кортико-спинальный контроль. Обычно используется для стимуляции ипсилатеральной или контралатеральной моторной коры у пациентов с частичным сохранением проводимости;

низкочастотная стимуляция (≤ 1 Гц) — снижает избыточную возбудимость нейронных сетей и используется реже, преимущественно для подавления патологической активности;

Тета-импульсная стимуляция (ТИС) — протокол, имитирующий естественные электрофизиологические биоритмы головного мозга; может быть как возбуждающим (иТИС), так и тормозящим (нТИС). Этот режим считается перспективным для ускоренного курса реабилитации, так как требует меньшего времени.

Курс лечения, как правило, включает 10–20 сеансов (по 15–30 минут ежедневно или через день). В ряде исследований ТМС сочеталась с ЛФК, роботизированной терапией или функциональной электрической стимуляцией, что усиливало клинический эффект [20, 21].

Систематический обзор и метаанализ Y. Lian и соавт. включил 11 рандомизированных контролируемых исследований ($N = 345$) и показал, что применение ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС) у пациентов с неполной травмой СМ достоверно улучшает двигательные функции нижних конечностей ($SMD = 0,81$; $p = 0,0005$). Эффект был выражен при проведении более 15 сеансов стимуляции ($SMD = 0,66$; $p = 0,04$) и при общем числе импульсов более 1800 ($SMD = 0,50$; $p = 0,04$) [22].

Систематический обзор и метаанализ F. Benavides и соавт. включил 14 исследований, посвященных применению рТМС. Результаты показали, что рТМС достоверно снижает спастичность ($SMD = -0,48$; $p = 0,01$), увеличивает силу мышц нижних конечностей ($SMD = 0,52$; $p = 0,008$) и верхних конечностей ($SMD = 0,39$; $p = 0,03$), а также улучшает функциональные показатели, включая скорость ходьбы в тесте 10 м ($SMD = 0,36$; $p = 0,02$) и силу хвата ($SMD = 0,41$; $p = 0,02$) [23].

Систематический обзор и сетевой метаанализ L. Li и соавт. включил 17 рандомизированных контролируемых исследований ($N = 507$), посвященных применению неинвазивной стимуляции мозга (НИСМ) для устранения невропатической боли после травмы СМ. Результаты показали, что НИСМ достоверно снижает выраженность болевого синдрома по цифровой рейтинговой шкале ($SMD = -0,84$; $p < 0,001$) и при последующем наблюдении ($SMD = -0,32$; $p = 0,02$). Однако влияние на сопутствующую депрессию не было статистически значимым ($SMD = -0,43$; $p = 0,06$). Сетевой метаанализ показал, что рТМС имеет наибольшую вероятность

быть наиболее эффективной по сравнению с обычной ТМС в снижении болевого индекса ($p = 0,62$ против $p = 0,38$) [24]. Метаанализ эффекта рТМС на моторную кору выявил отсутствие значимого эффекта в первую неделю после лечения, но обнаружило значительное облегчение боли в период от 2–6 нед. после курса стимуляции ($SMD = 3,81$) [25].

Транскраниальная стимуляция постоянным током (ТСПТ). ТСПТ — это неинвазивный метод модуляции корковой возбудимости с помощью слабого постоянного электрического тока. Суть метода заключается в следующем: через электроды, размещенные на поверхности кожи головы над целевыми участками коры головного мозга, подается постоянный ток силой обычно 1–2 мА в течение 10–30 мин [26].

Различают два вида стимуляции. В первом анод располагают над целевой областью воздействия, что деполяризует мембрану нейронов под электродом, повышая возбудимость корковых нейронов, усиливая активность корковых сетей и способствуя нейропластичности. Во втором случае над целевой областью размещают катод, что гиперполяризует мембрану, снижая возбудимость нейронов, что может быть полезно для подавления патологической гиперактивности (например, в зонах, связанных с гипервозбудимостью при хронической боли или спастичности).

При применении у пациентов с травмой спинного мозга ТСПТ чаще направляют на моторную кору или соматосенсорные области, где она способствует модуляции болевых сигналов и снижению интенсивности невропатической боли. Метод считается безопасным, легко комбинируется с другими реабилитационными подходами и нейромодуляционными методами, такими как функциональная электрическая стимуляция или транскраниальная магнитная стимуляция, и преимущественно используется для улучшения контроля над болью, а не для восстановления двигательных функций [27]. Эффект ТСПТ объясняется модификацией мембранного потенциала нейронов, усилением синаптической передачи и активацией нейропластических процессов, что позволяет формировать новые функциональные связи и улучшать контроль над движениями у пациентов с частичной потерей двигательной функции [28].

В исследовании S. Mehta и соавт. анализ эффективности ТСПТ показал умеренный болеутоляющий эффект ($SMD = 0,51$, $p < 0,012$) сразу после лечения, который к последующему контролю через 2 нед уже не сохранялся [29]. Обобщающий обзор и метаанализ, охвативший 16 исследований ($N = 319$), оценил влияние неинвазивной стимуляции на боль у пациентов с ПСМТ. Хотя результаты исследований вариабельны и ограничены небольшими выборками, положительными признаются как безопасность ТСПТ, так и его потенциал в управлении болью и улучшении качества жизни [30]. Систематический обзор и метаанализ Y. Li и соавт. выявил, что эффект от ТСПТ был менее выражен по сравнению с рТМС,

однако оба метода продемонстрировали положительный потенциал в управлении болью и улучшении качества жизни пациентов [24].

Транскутанная стимуляция спинного мозга (ТкССМ). ТкССМ — неинвазивный метод нейромодуляции, при котором электрические импульсы подаются через кожу в области позвоночника предположительно активируя сохранившиеся эфферентные, афферентные и сегментарные нейронные пути. Стимуляция усиливает передачу сигналов к мышцам нижних и верхних конечностей, способствует активации спинальной нейропластичности и улучшению двигательных функций. Метод можно комбинировать с традиционной физической реабилитацией или функциональной электрической стимуляцией для усиления клинического эффекта [31].

Сетевой метаанализ 52 рандомизированных исследований ($N = 2884$) оценил влияние сочетанной ТкССМ и ТМС в лечении неврогенной дисфункции мочевого пузыря и мочевыводящих путей. Сочетанная стимуляция продемонстрировала значительное улучшение показателей остаточного объема мочи и максимального объема мочевого пузыря и оказалась эффективна у пациентов с ПСМТ [32]. Систематический обзор и метаанализ, включающий 6 рандомизированных контролируемых исследований, показал, что ТкССМ в сочетании с традиционной реабилитацией значительно улучшает силу нижних конечностей (средняя разница: 4,82, $p = 0,004$) и снижает спастичность (средняя разница: $-0,40$, $p = 0,02$). Однако улучшение двигательной функции верхних конечностей не было статистически значимыми. Кроме того, ТкССМ способствовала улучшению мобильности, что подтверждается увеличением скорости ходьбы (средняя разница: 0,13 м/с, $p = 0,009$) и расстояния ходьбы (стандартизированная средняя разница: 0,62, $p = 0,009$) [33]. В другом исследовании, включающем 12 рандомизированных контролируемых исследований с 341 участником, было установлено, что неинвазивная стимуляция центральной нервной системы, включая ТкССМ, оказывает значительное влияние на восстановление силы и функции ходьбы нижних конечностей у пациентов с неполной травмой СМ. Однако ТкССМ показала меньший эффект по сравнению с рТМС [34]. Таким образом, ТкССМ является эффективным методом в восстановлении моторных функций нижних конечностей у пациентов с неполной травмой спинного мозга, особенно в сочетании с традиционной реабилитацией. Однако для оптимизации результатов необходимы дополнительные исследования, включая сравнение различных методов стимуляции и их сочетание с другими терапевтическими подходами.

В ряде отечественных исследований Д.А. Соловьева и др. раскрывается потенциал нового подхода к использованию магнитной стимуляции у пациентов с ПСМТ. Авторами предлагается многоуровневое воздействие на нервную систему, включающее в себя ТМС, сегментарную (спинальную) магнитную стимуляцию и периферическую магнитную

стимуляцию. По результатам исследований на 30 пациентах с ПСМТ авторами были сделаны выводы, что данный подход позволяет эффективно снижать выраженность спастичности (в основной группе средний показатель по модифицированной шкале Эшворта снизился с 3,73 до 2,00 баллов, в контрольной — с 3,58 до 2,08), стимулировать восстановление функций тазовых органов и замедлять атрофию мышечной ткани [35–37].

В сравнении со стандартными методами реабилитации, такими как лечебная физкультура, массаж, медикаментозная терапия и ортезирование, которые в основном фокусируются на компенсации утраченных функций, симптоматическом облегчении (например, снижении спастичности или боли через миорелаксанты) и предотвращении осложнений без прямого влияния на нейронные пути, современные неинвазивные методы нейромодуляции предлагают значительные преимущества. Они активно стимулируют механизмы нейропластичности центральной нервной системы, способствуя восстановлению двигательных функций, уменьшению невропатической боли и спастичности за счет модуляции кортикоспинальных и сегментарных путей, а также демонстрируют дозозависимый и синергетический эффект в комбинации с традиционной реабилитацией, с умеренным до сильного влиянием; обладают высоким профилем безопасности, низкой инвазивностью и потенциалом для персонализации, что приводит к более устойчивым улучшениям качества жизни и снижению экономической нагрузки, хотя требуют дальнейших крупномасштабных исследований для оптимизации протоколов.

Сравнительная эффективность методов. Анализ систематических обзоров и метаанализов свидетельствует, что все методы продемонстрировали клинически значимые результаты, однако выраженность эффекта и сферы применения различаются.

ФЭС обладает наиболее убедительной доказательной базой в отношении восстановления дыхательной функции, мышечной массы и аэробной выносливости. Причем эффективность метода носит дозозависимый характер: увеличение числа сеансов приводит к более выраженному снижению спастичности и улучшению двигательных функций.

ТМС показала хорошие результаты в улучшении двигательной функции нижних конечностей, скорости ходьбы и, в определенной степени, силы верхних конечностей. При этом данные о длительности эффекта противоречивы: в ряде исследований улучшения сохранялись несколько недель, но в других — эффект нивелировался к концу периода наблюдения.

ТСПТ в первую очередь исследуется как метод обезболивания. Эффективность подтверждается рядом метаанализов, однако ее клиническая значимость ограничена кратковременностью эффекта, а влияние на двигательное восстановление остается недостаточно изученным.

ТкССМ демонстрирует перспективные результаты в восстановлении силы нижних конечностей

и функций тазовых органов. При этом положительный эффект наиболее выражен при сочетании с другими методами нейромодуляции (например, ТМС), что указывает на синергический потенциал метода.

Ограничения существующих исследований. Небольшие размеры выборок — большинство исследований включали менее 50 пациентов, что снижает статистическую мощность выводов; разнородность протоколов стимуляции (частота, сила тока, длительность сеансов) затрудняют сопоставление данных и формирование универсальных клинических рекомендаций; недостаточный плацебо-контроль — не во всех исследованиях использовались имитационные (sham) протоколы, что повышает риск переоценки эффекта; краткий период наблюдения — данные о долгосрочных результатах крайне ограничены; большинство метаанализов оценивают эффект лишь в пределах нескольких недель или месяцев; отсутствие унифицированных исходов — применяются разные шкалы оценки моторики, боли и качества жизни, что также затрудняет систематизацию данных.

Перспективные направления. Для повышения эффективности и доказательности применения неинвазивной нейромодуляции в лечении пациентов с травмой СМ необходимы:

крупные многоцентровые РКИ с унифицированными протоколами; долгосрочные исследования, оценивающие устойчивость клинического эффекта; сравнительные исследования различных методов (рТМС vs ТСПТ vs ТкССМ vs ФЭС); изучение комбинированных подходов, включающих сочетание нейромодуляции с роботизированной терапией, виртуальной реальностью и традиционными методами реабилитации; персонализация терапии на основе нейрофизиологических биомаркеров, что позволит подбирать оптимальные параметры стимуляции для конкретного пациента.

Заключение. В совокупности имеющиеся данные позволяют утверждать, что неинвазивные методы нейромодуляции представляют собой перспективное дополнение к стандартной терапии пациентов с травмой спинного мозга. Их включение в комплексные реабилитационные программы может повысить эффективность восстановления двигательных функций, снизить выраженность спастичности и болевого синдрома, а также улучшить качество жизни пациентов. Однако для внедрения данных методик в клинические стандарты необходимы дальнейшие исследования высокого уровня доказательности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Финансовая поддержка не предоставлялась.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. World Health Organization, International Spinal Cord Society. International perspectives on spinal cord injury. Geneva: World Health Organization; 2013. Available at <https://apps.who.int/iris/handle/10665/94190>

2. GBD Spinal Cord Injuries Collaborators. Global, regional, and national burden of spinal cord injury, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Neurol.* 2023;22(11):1026–1047. doi: 10.1016/S1474-4422(23)00287-9
3. Barbiellini Amidei C, Salmasso L, Bellio S, Saia M. Epidemiology of traumatic spinal cord injury: a large population-based study. *Spinal Cord.* 2022;60(9):812–819. doi: 10.1038/s41393-022-00795-w
4. Lu Y, Shang Z, Zhang W, Pang M, Hu X, Dai Y, Shen R, Wu Y, Liu C, Rong L. Global incidence and characteristics of spinal cord injury since 2000–2021: a systematic review and meta-analysis. *BMC Med.* 2024;22(1):285. <https://doi.org/10.1186/s12916-024-03514-9>
5. Strøm V, Månnum G, Arora M, Joseph C, Kyriakides A, Le Fort M, Osterthun R, Perrouin-Verbe B, Postma K, Middleton J. Physical health conditions in persons with spinal cord injury across 21 countries worldwide. *J Rehabil Med.* 2022;54:jrm2040. <https://doi.org/10.2340/jrm.v54.2040>
6. Bickenbach J, Chhabra HS, Erhan B, Middleton JW, Stucki G; InSCI. The international spinal cord injury survey: the way forward. *Arch Phys Med Rehabil.* 2020;101(12):2227–2232. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.05.021>
7. Ranjbar Hameghavandi MH, Khodadoust E, Hassan Zadeh Tabatabaei MS, Farahbakhsh F, Ghodsi Z, Rostamkhani S, Ghashghaie S, Abbaszade M, Arbabi A, Hossieni SM, Sadeghi-Naini M, Atlasi R, Berchi Kankam S, Vaccaro AR, Guest J, Fehlings M, Rahimi-Movaghar V. Challenges in traumatic spinal cord injury care in developing countries — a scoping review. *Front Public Health.* 2024;12:1377513. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1377513>
8. Diop M, Epstein D. A systematic review of the impact of spinal cord injury on costs and health-related quality of life. *Pharmacoecon Open.* 2024;8(6):793–808. <https://doi.org/10.1007/s41669-024-00493-3>
9. Tian T, Zhang S, Yang M. Recent progress and challenges in the treatment of spinal cord injury. *Protein Cell.* 2023;14(9):635–652. <https://doi.org/10.1093/procel/pwad015>
10. Nosrati Nejad F, Basakha M, Charkazi A, Gharibzadeh S, Aghadavod E. Exploring barriers to rehabilitation for individuals with spinal cord injury: a qualitative study in Iran. *BMC Health Serv Res.* 2025;25(1):167. <https://doi.org/10.1186/s12913-025-12149-4>
11. Cummins C, Payne D, Kayes NM. Governing neurorehabilitation. *Disabil Rehabil.* 2022;44(17):4921–4928. <https://doi.org/10.1080/09638288.2021.1968674>
12. Tamburin S, Smania N, Saltuari L, Hoemberg V, Sandrini G. New advances in neurorehabilitation. *Front Neurol.* 2019;10:1090. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01090>
13. Iandolo R, Marini F, Semprini M, Laffranchi M, Mugnosso M, Cherif A, De Michieli L, Chiappalone M, Zenzeri J. Perspectives and challenges in robotic neurorehabilitation. *Appl Sci.* 2019;9(15):3183. <https://doi.org/10.3390/app9153183>
14. Ахмадеева ЛР, Уразбахтина ЮО, Камалова КР, Шаймухаметова ФХ, Ахмадеева ЭН. Транскраниальная магнитная стимуляция в неврологии и нейрореабилитации. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс».* 2019;21(12):55–59
Akhmadeeva LR, Urazbakhitina Yu.O., Kamalova KR, Shaimukhametova F.Kh., Akhmadeeva EN. Transcranial magnetic stimulation in neurology and neurorehabilitation. *Mediko-farmatsevticheskii zhurnal «Pul's».* 2019;21(12):55–59 (in Russ.).
15. Xiangli J, Ma B, Liang Y. Efficacy of functional electrical stimulation alone and as an adjunct to exercise for improving respiratory function and aerobic capacity in spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *Front Rehabil Sci.* 2025;6:1623752. <https://doi.org/10.3389/fresc.2025.1623752>
16. van der Scheer JW, de Groot S, Stolwijk-Swüste JM, van der Woude LHV, Post MWM. Functional electrical stimulation cycling exercise after spinal cord injury: a systematic review of health and fitness-related outcomes. *J Neuroeng Rehabil.* 2021;18(1):99. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00880-0>
17. Fang CY, Lien AS, Tsai JL, Yang HC, Chan HL, Chen RS, Chang YJ. The effect and dose-response of functional electrical stimulation cycling training on spasticity in individuals with spinal cord injury: a systematic review with meta-analysis. *Front Physiol.* 2021;12:756200. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.756200>
18. Koponen LM, Peterchev AV. Transcranial magnetic stimulation: principles and applications. In: He B, editor. *Neural engineering.* Cham: Springer; 2020. p. 245–270. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43395-6_10
19. Tikka SK, Siddiqui MA, Garg S, Patojoshi A, Gautam M. Clinical practice guidelines for the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation in neuropsychiatric disorders. *Indian J Psychiatry.* 2023;65(2):270–288. https://doi.org/10.4103/indianjpsychiatry.indianjpsychiatry_1196_22
20. de Lorena SB, Cristante AFF, Marcon RM, de Barros Filho TEP, de Marcon RM. Effects of robotic therapy associated with noninvasive brain stimulation on upper-limb rehabilitation after stroke: systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Neurorehabil Neural Repair.* 2021;35(3):256–266. <https://doi.org/10.1177/1545968320982334>
21. Zhang L, Chang S, Wang S, Yu Z, Ji C, Zhou R, Yu C, Yu J, Chen B. A review on combined strategy of non-invasive brain stimulation and robotic therapy. *Chin J Mech Eng.* 2024;37(1):113. <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01082-9>
22. Liang Y, Li J, Zhang L, Xue J, Zhang J, Yang Y. Optimal parameter analysis of repetitive transcranial magnetic stimulation on motor function in patients with incomplete spinal cord injury: a meta-analysis. *NeuroRehabilitation.* 2025;56(4):423–437. <https://doi.org/10.3233/NRE-240275>
23. Benavides F, Shine MG, Stefanovic F, Chen R, Jo HJ. Repetitive transcranial magnetic stimulation for enhancing motor function after spinal cord injury: a narrative review. *Front Neurol.* 2025;16:1587060. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1587060>
24. Li L, Huang H, Yu Y, Jia Y, Liu Z, Shi X, Wang F, Zhang T. Non-invasive brain stimulation for neuropathic pain after spinal cord injury: a systematic review and network meta-analysis. *Front Neurosci.* 2022;15:800560. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.800560>
25. Shen Z, Li Z, Ke J, He C, Liu Z, Zhang D, Zhang Z, Li A, Yang S, Li X, Li R, Zhao K, Ruan Q, Du H, Guo L, Yin F. Effect of non-invasive brain stimulation on neuropathic pain following spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore).* 2020;99(34):e21507. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000021507>
26. Nitsche MA, Bikson M, Bestmann S. Transcranial direct current stimulation: protocols and physiological mechanisms of action. In: Brunoni AR, Nitsche MA, Loo CK, editors. *Textbook of neuromodulation: principles, methods and clinical applications.* New York: Springer; 2014. p. 101–111. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0876-4_9
27. Li C, Jirachai-pitak S, Wrigley P, Xu H, Euasobhon P. Transcranial direct current stimulation for spinal cord injury-associated neuropathic pain. *Korean J Pain.* 2021;34(2):156–164. <https://doi.org/10.3344/kjp.2021.34.2.156>
28. Reato D, Rahman A, Bikson M, Parra LC. Principles of transcranial direct current stimulation (tDCS): introduction to the biophysics of tDCS. In: Brunoni AR, Nitsche MA, Loo CK, editors. *Practical guide to transcranial direct current stimulation: principles, procedures and applications.* Cham: Springer; 2019. p. 45–80. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21293-3_3
29. Mehta S, McIntyre A, Guy S, Teasell RW, Loh E. Effectiveness of transcranial direct current stimulation for the management of neuropathic pain after spinal cord injury: a meta-analysis. *Spinal Cord.* 2015;53(11):780–785. <https://doi.org/10.1038/sc.2015.118>
30. Portaro S, Alito A, Leonardi G, Marotta N, Tisano A, Bruschetta D, Longo UG, Ammendolia A, Milardi D, de Sire A. Efficacy of neuromodulation and rehabilitation approaches on pain relief in patients with spinal cord injury: a systematic review and

- meta-analysis. *Neurol Sci.* 2025;46(7):2995–3020. <https://doi.org/10.1007/s10072-025-08077-y>
31. Taylor C, McHugh C, Mockler D, Minogue C, Reilly RB, Fleming N. Transcutaneous spinal cord stimulation and motor responses in individuals with spinal cord injury: a methodological review. *PLoS One.* 2021;16(11):e0260166. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260166>
32. Yu Z, Yang X, Ma T, Qin F, Ren L, Gao S, Chen J, Liu X. Effects of noninvasive or minimally invasive neuromodulation techniques on neurogenic lower urinary tract dysfunction after spinal cord injury: a network meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2025;106(6):961–972. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2024.12.016>
33. Shi C, Chen Y, Ye L, Feng J, Dong G, Lu S. Transcutaneous spinal cord stimulation on motor function in patients with spinal cord injury: a meta-analysis. *NeuroRehabilitation.* 2024;54(4):563–573. <https://doi.org/10.3233/NRE-230221>
34. Hernandez-Navarro A, Ros Alsina A, Gonzalez A, Pando A, Soto-Sánchez C, Martín-López E, Oliviero A. Non-invasive cerebral and spinal cord stimulation for motor and gait recovery in incomplete spinal cord injury: systematic review and meta-analysis. *J Neuroeng Rehabil.* 2025;22(1):53. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01583-3>
35. Соловьев ДА, Лобзин ВЮ, Лупанов ИА, Фрунза ДН, Родионов АС, Рябцев АВ, Дынин ПС, Наумов КМ, Цыган НВ, Литвиненко ИВ. Новые подходы к коррекции спастичности после спинальной травмы: применение многоуровневой магнитной стимуляции. *Известия Российской Военно-медицинской академии.* 2025;44(4):395–404. doi: 10.17816/rmmar690429
- Solovev DA, Lobzin V.Yu., Lupanov IA, Frunza DN, Rodionov AS, Ryabtsev AV, Dynin PS, Naumov KM, Tsygan NV, Litvinenko IV. Novye podkhody k korrektsii spastichnosti posle spinal'noi travmy: primeneniye mnogourovnevoi magnitnoi stimulyatsii. *Izvestiya Rossiiskoi Voenno-meditsinskoi akademii (in Russ.).* 2025;44(4):395–404. doi: 10.17816/rmmar690429
36. Лобзин ВЮ, Соловьев ДА, Лупанов ИА, Фрунза ДН, Родионов АС, Яцкевич ДЭ, Дынин ПС, Литвиненко ИВ. Многоуровневая магнитная стимуляция в терапии нейрогенных расстройств функций тазовых органов у пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой. *Медицинский алфавит.* 2025;(21):21–26. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-21-21-26>
- Lobzin V.Yu., Solovev DA, Lupanov IA, Frunza DN, Rodionov AS, Yatskevich DE, Dynin PS, Litvinenko IV. Mnogourovnevaya magnitnaya stimulyatsiya v terapii neurogennykh rasstroystv funktsii tazovykh organov u patsientov s pozvonochno-spinnomozgovoï travmoi. *Meditsinskii alfavit.* 2025;(21):21–26 (in Russ.). <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-21-21-26>
37. Соловьев ДА, Лобзин ВЮ, Ткаченко ЛВ, Трошак АА, Сидорович ЮС, Братерский АЮ. Многоуровневая магнитная стимуляция как способ борьбы с атрофией мышц при нижних параплегиях центрального и периферического типов. *Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии.* 2025;10. <https://doi.org/10.33920/med-01-2510-03>
- Solovev DA, Lobzin V.Yu., Tkachenko LV, Troshchak AA, Sidorovich Yu.S., Braterskii A.Yu. Mnogourovnevaya magnitnaya stimulyatsiya kak sposob bor'by s atrofiei myshts pri nizhnikh paraplegiyakh tsentral'nogo i perifericheskogo tipov. *Vestnik nevrologii, psikhiatrii i neurokhirurgii.* 2025;10 (in Russ.). <https://doi.org/10.33920/med-01-2510-03>