

DOI: <https://doi.org/10.17816/MSER643646>

Электростимуляция спинного мозга: современные возможности применения в нейрореабилитации

А.Р. Галимов¹, Э.Р. Тулякова¹, Е.В. Комкина², Е.В. Кравченко², Е.Д. Альшевская²,
А.А. Амирова², Я.Ю. Пенькова³, Д.М. Бирбраер⁴, А.У. Галлямова¹, Е.В. Харечко⁴,
Е.С. Кочкина⁵, Х.М. Магомедова⁴, Л.Б. Авиян⁴, Э.Ф. Харисова¹

¹ Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия;

² Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия;

³ Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия;

⁴ Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия;

⁵ Смоленский государственный медицинский университет, Смоленск, Россия

АННОТАЦИЯ

Повреждения и нарушения нервной системы являются значимой проблемой общественного здравоохранения как в России, так и в мировом масштабе. В последние годы значительный прогресс был достигнут в разработке методов стимуляции спинного мозга, направленных на восстановление утраченных функций. Эпидуральная (ЭССМ) и чрескожная (ЧССМ) стимуляция спинного мозга представляют собой перспективные подходы, способные улучшать двигательную активность и восстанавливать чувствительность у пациентов с различными неврологическими состояниями. В результате поиска исследований было извлечено 3887 публикаций из баз PubMed/MEDLINE и 1432 публикации, найденные с помощью Google Scholar. После процедуры отбора в обзор было включено 66 статей. Недавние исследования демонстрируют, что ЭССМ и ЧССМ способны улучшать двигательные и сенсорные функции при различных неврологических заболеваниях, открывая новые возможности для повышения качества жизни пациентов. Несмотря на то, что эти методы нейромодуляции уже доказали свою эффективность в улучшении двигательной функции и восстановлении сенсорной обратной связи, большинство проведенных до сих пор работ носили характер пилотных исследований. Для успешного клинического внедрения как ЭССМ, так и ЧССМ в сферу реабилитации потребуются проведение более крупных и всесторонних исследований, включая испытания в домашних условиях, чтобы обеспечить убедительные доказательства их потенциала в восстановительной медицине. Помимо этого, для оптимизации воздействия на дорсальные корешки спинного мозга необходимо усовершенствование существующих конструкций электродов для ЭССМ. В связи с этим дальнейшая работа и финансирование в области разработки аппаратуры, протоколов стимуляции и научных исследований для ЭССМ и ЧССМ должны стать приоритетными направлениями в ближайшем будущем.

Ключевые слова: электростимуляция спинного мозга; эпидуральная стимуляция спинного мозга; чрескожная стимуляция спинного мозга; травма спинного мозга; болезнь Паркинсона; рассеянный склероз; спинальная мышечная атрофия; чувствительность; двигательная функция.

Как цитировать:

Галимов А.Р., Тулякова Э.Р., Комкина Е.В., Кравченко Е.В., Альшевская Е.Д., Амирова А.А., Пенькова Я.Ю., Бирбраер Д.М., Галлямова А.У., Харечко Е.В., Кочкина Е.С., Магомедова Х.М., Авиян Л.Б., Харисова Э.Ф. Электростимуляция спинного мозга: современные возможности применения в нейрореабилитации // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2024. Т. 27, № 2. С. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.17816/MSER643646>

DOI: <https://doi.org/10.17816/MSER643646>

Electrical stimulation of the spinal cord: modern possibilities of application in neurorehabilitation

Airat R. Galimov¹, Evelina R. Tuliakova¹, Elizaveta V. Komkina², Elizaveta V. Kravchenko²,
Eva D. Alshevskaya², Aydan A. Amirova², Yana Yu. Penkova³, Dina M. Birbraer⁴,
Adilya U. Gallyamova¹, Ekaterina V. Kharechko⁴, Elena S. Kochkina⁵,
Khadizhat M. Magomedova⁴, Lolita B. Aviyan⁴, Elina F. Kharisova¹

¹ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;

² Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;

³ Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia;

⁴ Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia;

⁵ Smolensk State Medical University, Smolensk, Russia

ABSTRACT

Injuries and disorders of the nervous system are a significant public health problem both in Russia and globally. In recent years, significant progress has been made in the development of spinal cord stimulation techniques aimed at restoring lost functions. Epidural (ESCS) and percutaneous (PSCS) spinal cord stimulation are promising approaches capable of improving motor activity and restoring sensitivity in patients with various neurological conditions. As a result of the research search, 3,887 publications were extracted from PubMed/MEDLINE databases and 1,432 publications found using Google Scholar. After the selection procedure, 66 articles were included in the review. Recent studies demonstrate that ESCS and PSCS can improve motor and sensory functions in various neurological diseases, opening up new opportunities to improve the quality of life of patients. Despite the fact that these neuromodulation methods have already proven their effectiveness in improving motor function and restoring sensory feedback, most of the work carried out so far has been in the nature of pilot studies. The successful clinical implementation of both ESCS and PSCS in the field of rehabilitation will require larger and more comprehensive studies, including home trials, to provide convincing evidence of their potential in restorative medicine. In addition, to optimize the effect on the dorsal roots of the spinal cord, it is necessary to improve existing electrode designs for ESCS. In this regard, further work and funding in the field of equipment development, stimulation protocols and scientific research for ESCS and PSCS should become priorities in the near future.

Keywords: electrical stimulation of the spinal cord; epidural stimulation of the spinal cord; percutaneous stimulation of the spinal cord; spinal cord injury; Parkinson's disease; multiple sclerosis; spinal muscular atrophy; sensitivity; motor function.

To cite this article:

Galimov AR, Tuliakova ER, Komkina EV, Kravchenko EV, Alshevskaya ED, Amirova AA, Penkova YaYu, Birbraer DM, Gallyamova AU, Kharechko EV, Kochkina ES, Magomedova KhM, Aviyan LB, Kharisova EF. Electrical stimulation of the spinal cord: modern possibilities of application in neurorehabilitation. *Medical and Social Expert Evaluation and Rehabilitation*. 2024;27(2):93–107. DOI: <https://doi.org/10.17816/MSER643646>

Received: 05.01.2025

Accepted: 13.01.2025

Published online: 15.01.2025

ВВЕДЕНИЕ

Поражения и нарушения нервной системы являются значимой проблемой общественного здравоохранения как в России, так и в мировом масштабе. Согласно статистическим данным, такие заболевания, как травмы спинного мозга (ТСМ), болезнь Паркинсона (БП), инсульт, рассеянный склероз (РС) и спинальная мышечная атрофия (СМА), имеют значительную распространённость. Например, частота травм спинного мозга составляет 250–500 тыс. каждый год [1]. Болезнь Паркинсона встречается примерно у 160–180 человек на каждые 100 тысяч населения, что делает её одной из наиболее распространённых нейродегенеративных патологий среди пожилых людей: в России от данного заболевания страдают около 210 тыс. пациентов [2]. Рассеянный склероз поражает приблизительно 35–70 человек на 100 тысяч населения, причём в России этот показатель достигает 60–80 случаев на 100 тысяч жителей [3]. Спинальная мышечная атрофия является редким заболеванием, но её значимость нельзя недооценивать, поскольку она приводит к тяжёлым инвалидизирующим последствиям [4].

В последние годы значительный прогресс был достигнут в разработке методов стимуляции спинного мозга,

направленных на восстановление утраченных функций [5]. Эпидуральная (ЭССМ) и чрескожная (ЧССМ) стимуляция спинного мозга представляют собой перспективные подходы, способные улучшать двигательную активность и восстанавливать чувствительность у пациентов с различными неврологическими состояниями [6, 7].

Цель работы — проанализировать современные литературные данные, посвящённые описанию достижений в области ЭССМ и ЧССМ, а также их влиянию на реабилитационный процесс при травмах спинного мозга, БП, инсульте, рассеянном склерозе и спинальной мышечной атрофии. Особое внимание уделяется механизмам воздействия этих методов на афферентные пути спинного мозга, активацию моторных нейронов и улучшение супраспинальных и проприоспинальных сигналов. Также обсуждаются возможности использования ЭССМ и ЧССМ для восстановления сенсорной обратной связи и улучшения координации движений у пациентов с ампутированными конечностями.

МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ

Отбор статей проводился в соответствии с рекомендациями PRISMA. Алгоритм отбора исследований представлен на рис. 1.

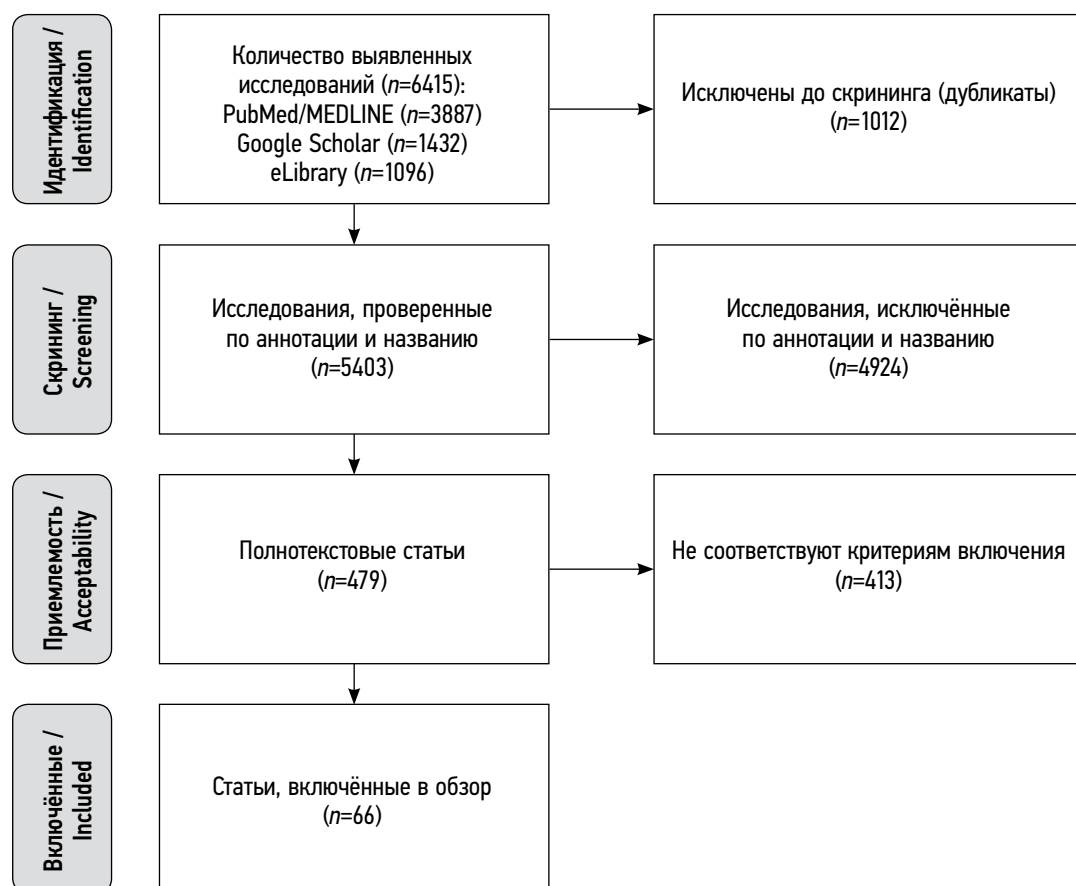


Рис. 1. Алгоритм поиска исследований.

Fig. 1. Study search algorithm.

В результате поиска было извлечено 3887 публикаций из баз PubMed/MEDLINE, 1432 публикации, найденные с помощью Google Scholar, и 1096 исследований из eLibrary.Ru. Поисковые запросы включали следующие ключевые слова и их сочетания: электростимуляция спинного мозга; эпидуральная стимуляция спинного мозга; чрескожная стимуляция спинного мозга; травма спинного мозга; болезнь Паркинсона; рассеянный склероз; спинальная мышечная атрофия; чувствительность; двигательная функция; electrical stimulation of the spinal cord; epidural stimulation of the spinal cord; percutaneous stimulation of the spinal cord; spinal cord injury; Parkinson's disease; multiple sclerosis; spinal muscular atrophy; sensitivity; motor function. Временной интервал поиска: с января 2016 по декабрь 2024 года. Независимо друг от друга все авторы проводили скрининг названий и аннотаций выявленных статей, при обнаружении релевантных исследований извлекался полный текст соответствующей публикации. Дубликаты и неполнотекстовые версии статей были исключены ($n=1012$). Полнотекстовые версии статей оценивались на предмет соответствия следующим критериям включения:

- работа опубликована на английском или русском языке;
- работа опубликована в рецензируемом научном издании;
- работа представляет собой обзор литературы или клиническое исследование;
- работа содержит описание применения электростимуляции при рассматриваемых неврологических заболеваниях.

После процедуры отбора в обзор было включено 66 статей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Стимуляция спинного мозга

Имплантируемые и неинвазивные методы стимуляции спинного мозга становятся всё более популярными и эффективными средствами нейромодуляционной терапии, способствующими улучшению двигательных и сенсорных функций у пациентов с повреждениями и расстройствами нервной системы. ЭССМ подразумевает внедрение проводов и электродов в дорсальное эпидуральное пространство спинного мозга. Этот метод уже давно одобрен Управлением по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств США (FDA) для лечения хронических болевых состояний, включая нейропатическую боль [8]. В последнее десятилетие ЭССМ активно используется для улучшения двигательных и сенсорных функций у широкого круга пациентов [9], однако для применения в целях реабилитации ЭССМ пока не получила одобрения FDA. ЧССМ представляет собой неинвазивную форму нейромодуляции, при которой применяются адгезивные электроды, устанавливаемые в проекции позвоночника [6, 9].

Как ЭССМ, так и ЧССМ воздействуют на схожие нервные структуры, включая волокна спинномозговых корешков [10]. ЧССМ находит своё применение при разнообразных повреждениях и расстройствах нервной системы, главным образом для улучшения двигательных возможностей [9], но, подобно ЭССМ, пока не утверждена FDA для использования в реабилитации. На текущий момент проводится свыше 150 клинических исследований с применением ЭССМ и ЧССМ в целях реабилитации пациентов [11].

Стимуляция спинного мозга для восстановления двигательной активности

Использование стимуляции спинного мозга для восстановления двигательной активности наиболее широко исследовалось у пациентов с ТСМ, а затем — у лиц с БП. Долгое время стимуляция спинного мозга применялась в клинической практике при ТСМ. РС также изучался как одна из причин двигательных нарушений — сначала с использованием ЭССМ, а позже и с применением ЧССМ. Лечение инсульта и СМА с помощью стимуляции спинного мозга, особенно методом ЭССМ, является сравнительно новым направлением, и на сегодняшний день опубликовано лишь небольшое количество исследований, которые будут рассмотрены далее.

Электростимуляция спинного мозга в реабилитации после его травмы

ТСМ нарушают связь между супраспинальными центрами и конечностями, что приводит к параличу различной степени и сенсорным нарушениям [12]. Реабилитационные программы, основанные на физических упражнениях, включая различные тренировки опорно-двигательного аппарата и занятия на беговой дорожке, помогают восстановить волевой контроль над движениями после ТСМ [13]. Тем не менее большинство пациентов с ТСМ не приходят к полному восстановлению волевого контроля с помощью традиционных методов реабилитации; вместо этого они достигают определённого уровня стабилизации, который обычно наступает в острую или подострую фазу ТСМ [14].

Недавно проведённый анализ 13 исследований показал, что ЭССМ улучшила волевой двигательный контроль, включая восстановление способности стоять, ходить, а также повысила мышечную активность у 83 из 88 пациентов [14]. Несколько последних исследований подтвердили восстановление способности к ходьбе как после частичной, так и после полной ТСМ с использованием ЭССМ в комбинации с тренировками опорно-двигательного аппарата [15–18]. Другие исследования описывают восстановление волевого контроля, выражающееся в увеличении мышечной активности [19–21]. Все текущие клинические испытания, направленные на оценку эффективности ЭССМ и ЧССМ, проводятся на пациентах с хроническими формами ТСМ, у которых остаётся ограниченный потенциал для восстановления исключительно

с помощью стандартных методов реабилитации. Следовательно, на данный момент ЧССМ является одним из многих терапевтических подходов, способных существенно улучшить состояние пациентов.

ЭССМ сама по себе не инициирует двигательную способность после ТСМ, но способствует восстановлению или усилению волевого двигательного контроля, возвращая пациентам возможность управлять ранее парализованными конечностями [18, 21]. В среднем для стабильного улучшения волевого контроля требуется около 5,4 месяца реабилитационных упражнений, что может быть связано с реорганизацией супраспинальных и интраспинальных нервных путей [9]. Последние исследования предполагают, что ЭССМ активирует мотонейроны через прямую стимуляцию сенсорных афферентов [22]. Это повышает возбудимость мотонейронов, когда поступают остаточные супраспинальные и проприоспинальные сигналы, что ведёт к активации мотонейронов и соответствующих мышц. Предполагается, что эти механизмы могут действовать и при других двигательных расстройствах, рассмотренных далее.

ЧССМ, применяемая на уровне грудного и поясничного отделов позвоночника, улучшает контроль движений нижних конечностей, способность стоять и ходить, что подтверждается тестами функциональной оценки мобильности [23, 24]. ЧССМ, применяемая в шейном отделе позвоночника, улучшает контроль движений верхних конечностей и силу, измеряемые с помощью электромиографии, а также силу захвата [25–28]. Длительность применения ЧССМ коррелирует с продолжительностью эффекта: краткосрочная терапия даёт временные улучшения, тогда как длительное применение обеспечивает устойчивые результаты [28]. Т.Р. Мошонкина и соавт. представили описание применения метода ЧССМ для восстановления двигательных функций у пациентов с ТСМ. Авторы описали результаты одной процедуры ЧССМ у 60 пациентов с разными уровнями повреждений, при этом улучшение двигательных функций было зарегистрировано у всех участников исследования, а реабилитационная цель достигнута у 70% пациентов. Кроме того, отмечены положительные изменения в работе внутренних органов, что требует дополнительных исследований [29]. А.А. Савенкова и соавт. продемонстрировали, что применение ЧССМ в сочетании со стандартной реабилитацией эффективно восстанавливает двигательные функции у пациентов с ТСМ. У большинства пациентов основной группы, получавших ЧССМ, наблюдалось увеличение мышечной силы, улучшение чувствительности и снижение степени тяжести травмы. Дополнительно отмечено улучшение мочевыделительных функций у части пациентов основной группы [30].

ЧССМ воздействует на те же структуры, что и ЭССМ, в частности, на первичные афферентные волокна в спинномозговых корешках, и вызывает аналогичные мышечные ответы [10, 31]. Исследование, в котором сравнивалась последовательность применения ЧССМ и ЭССМ

у пациентов с ТСМ, показало, что ЧССМ оказывает лучший эффект в отношении поддержания баланса, чем ЭССМ [32]. Данные результаты могут быть обусловлены более обширной зоной покрытия ЧССМ и стимулированием афферентов, которые не активируются при проведении ЭССМ, включая сенсорные афференты в периферических нервах и дорсальных корешках нескольких сегментов, что играет важную роль в поддержании равновесия. Кроме того, недавний обзор литературы показал, что различные методы электростимуляции спинного мозга, нервов и мышц положительно влияют на дыхательную функцию у пациентов с травмой шейного отдела спинного мозга, уменьшая сроки пребывания на искусственной вентиляции лёгких и снижая риск осложнений, таких как пневмония и ателектазы [33]. Эти методы способствуют нервно-мышечной пластичности и улучшают активность диафрагмы и дыхательных мышц, что делает их важной частью комплексной программы восстановительного лечения.

Электростимуляция спинного мозга в реабилитации после инсульта

Инсульт может привести к нарушению связи между поражёнными областями головного мозга и конечностями, что нередко вызывает гемипарез и нарушения чувствительности [34]. Двигательные дефициты после инсульта могут затрагивать верхнюю и/или нижнюю конечность и зачастую сохраняются длительное время даже после реабилитационных мероприятий, существенно влияя на выполнение повседневных действий и ходьбу.

Недавно проведённое первое исследование на людях показало, что ЭССМ шейного отдела спинного мозга в течение 29 дней способствовала улучшению силы захвата и функциональных движений при выполнении трёхмерных задач у двоих пациентов с постинсультным гемипарезом верхних конечностей [35]. Несмотря на отсутствие сочетания электростимуляции с реабилитационными процедурами, тестирование двигательной активности с использованием шкалы Фугл-Мейера выявило улучшение показателей двигательной активности после завершения исследования, причём ухудшение было незначительным в течение четырёх недель последующего наблюдения. Авторы предположили, что электростимуляция улучшает двигательную активность через кортикоспинальный тракт, который не был полностью разрушен в результате инсульта.

Также ЧССМ в шейном и грудном отделах применялась у восьми пациентов с гемипарезом после инсульта в комбинации с тренировкой ходьбы в течение восьми недель [36]. Сравнение результатов показало, что сочетание ЧССМ с тренировкой приводило к лучшему результату по сравнению с тренировками без электростимуляции: повышалась симметрия ног, возрастало число мышечных синергий, значительно увеличивались скорость ходьбы и пройденная дистанция, причём некоторые улучшения сохранялись в течение трёх месяцев наблюдения. Вероятно, ЧССМ

улучшает функцию ходьбы после инсульта аналогичным ЭССМ механизмом, усиливая супраспинальные произвольные команды, передаваемые по кортикоспинальному тракту к мотонейронам.

По результатам рандомизированного исследования было установлено, что комбинированное применение ритмической транскраниальной магнитной стимуляции и ЧССМ в остром периоде после ишемического инсульта показало значительное улучшение локомоторных функций у пациентов. Это проявилось в увеличении возбудимости нейронных сетей поясничного утолщения спинного мозга, снижении порогов активации мышц поражённой конечности, а также в улучшении показателей по шкалам реабилитационной маршрутизации, индекса мобильности Ривермид, баланса Берга и мышечной силы нижних конечностей [37]. Другое исследование показало, что ЧССМ в остром периоде ишемического инсульта способствует повышению возбудимости нервных путей и улучшению двигательных функций у пациентов. После курса стимуляции у большинства участников снизились пороги возбуждения и увеличились амплитуды моторных ответов, особенно заметно это было на поражённых конечностях [38]. Это подтверждает эффективность метода в повышении подвижности и самостоятельности пациентов. Р.Н. Якупов и соавт. продемонстрировали, что курс ЧССМ в сочетании с проприоцептивной стимуляцией мышц нижних конечностей повышает возбудимость спинальных нейронных сетей и улучшает локомоторные функции у лиц с нарушениями мозгового кровообращения. После курса лечения у большинства пациентов наблюдалось снижение времени прохождения дистанции при ходьбе, а также увеличение амплитуды и снижение порогов вызванных моторных ответов мышц бедра и голени [39].

Таким образом, представленные исследования демонстрируют высокую эффективность различных видов электростимуляции спинного мозга в восстановлении двигательных функций у пациентов после инсульта. Независимо от применяемой методики — будь то ЭССМ шейного отдела, ЧССМ в сочетании с тренировкой ходьбы или комбинированное использование ритмической транскраниальной магнитной стимуляции и ЧССМ — все они приводят к значительным улучшениям двигательной активности, способности к выполнению повседневных задач и ходьбе. Эти подходы представляют собой перспективные направления в реабилитации пациентов с последствиями инсульта, открывая новые возможности для повышения качества их жизни.

Электростимуляция спинного мозга при болезни Паркинсона

БП представляет собой нейродегенеративное заболевание, характеризующееся истощением дофамина в базальных ганглиях, что приводит к развитию двигательных симптомов, включая тремор в покое, брадикинезию, ригидность, нарушение устойчивости и замедленную

походку [40]. Заместительная терапия леводопой является эффективным методом лечения, однако со временем пациенты становятся менее чувствительными к этому препарату. Глубокая стимуляция мозга, предполагающая электрическую стимуляцию базальных ганглиев, может уменьшить двигательные симптомы и снизить потребность в леводопе, хотя не устраняет осевые двигательные симптомы, такие как проблемы с равновесием и походкой, возможно, из-за влияния на другие нейронные сети [41].

Недавний обзор 25 исследований показал, что ЭССМ привела к улучшению походки и общего состояния у 95 из 106 пациентов с БП ($p < 0,001$ и $< 0,05$) [42]. Современные исследования также подтверждают, что электростимуляция спинного мозга может позитивно влиять на двигательные функции, оцениваемые с помощью Унифицированной шкалы оценки БП [43–46], теста «Встань и иди», измерений длины шага, анализа походки и/или субъективных данных пациентов о застывании походки [47–49].

БП воздействует на сложные двигательные пути в головном и спинном мозге, вызывая нарушения походки [40, 41]. Электростимуляция непосредственно модифицирует местные спинномозговые цепи, что способствует улучшению походки, однако управление походкой в значительной мере осуществляется высшими центрами мозга. Поэтому считается, что улучшение походки под воздействием электростимуляции спинного мозга связано с влиянием на супраспинальные цепи через стимуляцию восходящих волокон, достигающих областей ствола мозга, мозжечка, базальных ганглиев, таламуса и моторных зон коры головного мозга [50]. В.В. Ковалёв и соавт. в серии клинических наблюдений продемонстрировали безопасность применения стимуляции спинного мозга для коррекции застываний при ходьбе у пациентов с БП и прогрессирующим надъядерным параличом, что выражалось в отсутствии клинически значимых послеоперационных осложнений как в раннем, так и в отдалённом периоде. У большинства пациентов наблюдались улучшение скорости ходьбы и уверенность в поддержании равновесия, а также повышение качества жизни, однако эти эффекты имели временный характер [51].

Таким образом, представленные исследования указывают на значительный потенциал электростимуляции спинного мозга в лечении двигательных нарушений, связанных с БП. Этот метод демонстрирует эффективность в улучшении походки, стабилизации осанки и снижении частоты застываний при ходьбе, что оказывает непосредственное влияние на качество жизни пациентов. Тем не менее следует отметить, что долгосрочные эффекты и стабильность достигнутых результатов требуют дальнейших исследований. Важно учитывать индивидуальные особенности каждого пациента и разрабатывать персонализированный подход к лечению, комбинируя электростимуляцию с другими методами терапии для достижения наилучших результатов.

Электростимуляция спинного мозга при рассеянном склерозе

РС представляет собой хроническое аутоиммунное заболевание центральной нервной системы, сопровождающееся воспалением, демиелинизацией и потерей аксонов, что приводит к двигательным нарушениям и спастичности [52]. Современные фармакологические, иммуномодулирующие и иммуносупрессивные методы лечения малоэффективны для пациентов с первичной или вторичной формой заболевания, поэтому основным направлением остаётся симптоматическое лечение [53]. В исследованиях 1970–1980-х годов, где использовалась ЭССМ для облегчения боли и спастичности при РС, участники отмечали улучшение двигательной силы, а также способности стоять и ходить [54]. Однако из-за неоднородности полученных результатов основное внимание переключилось на изучение других двигательных нарушений, и за последнее десятилетие было выполнено лишь несколько исследований по применению ЭССМ при РС. Недавнее исследование, в котором 16 пациентам с РС провели ЧССМ поясничного отдела в течение 30 минут, показало улучшение способности к ходьбе, повышение скорости и выносливости, продолжающееся в течение 2 часов после процедуры, но возвращающееся к исходному уровню через сутки, причём наиболее заметный эффект наблюдался у участников с ограниченной подвижностью (8/16) [55]. Улучшение описанных показателей было продемонстрировано с помощью результатов тестов, проведённых до и после ЧССМ. В частности, время, необходимое для прохождения 10 метров и выполнения теста «Встань и иди» (timed up-and-go test), значительно сократилось, а расстояние, пройденное за две минуты, увеличилось. Эти улучшения были статистически значимыми по сравнению с базовыми показателями [55].

Несмотря на положительные результаты некоторых исследований, использование электростимуляции спинного мозга для лечения двигательных нарушений при РС пока остаётся недостаточно изученным. Необходимы дополнительные исследования для понимания механизмов, лежащих в основе улучшения двигательного контроля при демиелинизирующих заболеваниях, а также для разработки оптимальных протоколов лечения, учитывающих индивидуальные особенности пациентов. Продолжающиеся исследования помогут определить, какие пациенты могут получить максимальную пользу от электростимуляции спинного мозга и как этот метод может быть интегрирован в комплексную программу реабилитации для улучшения качества жизни лиц с РС.

Электростимуляция спинного мозга при спинальной мышечной атрофии

СМА представляет собой хроническое и прогрессирующее генетическое заболевание, которое приводит к дисфункции мотонейронов и мышечной слабости, предположительно из-за утраты нормального афферентного

возбуждения мотонейронов [56]. Активация первичных афферентов и их рефлекторных связей с мотонейронами через спинномозговые рефлексы с помощью ЭССМ может поддерживать нормальное функционирование мотонейронов и улучшать двигательную функцию. В недавнем исследовании пояснично-крестцовая ЭССМ была использована у троих пациентов со СМА [57]. Два электрода были размещены вдоль позвонков T11-L1 для стимуляции дорсальных корешков, и в течение четырёх недель участники выполняли упражнения для укрепления мышц и улучшения ходьбы во время реабилитационных сессий. Все три участника продемонстрировали увеличение мышечной силы в коленях и бёдрах, улучшение параметров походки, зафиксированных системой захвата движения, а также улучшение функционирования нейронных сетей, включая снижение гиперактивности нейронов, повышение сенсорной чувствительности и увеличение частоты возбуждения мотонейронов. Авторы предполагают, что это первый пример использования ЭССМ, направленный не только на облегчение передвижения, но и на обращение вспять дегенеративных процессов и эффективное восстановление функции мотонейронов при СМА, что потенциально может затормозить прогрессирование нейродегенерации.

Эти предварительные результаты подчёркивают важность продолжения исследований в данной области, поскольку ЭССМ может представлять собой новый подход к лечению СМА, позволяющий восстановить функцию мотонейронов и замедлить прогрессирование заболевания. Дальнейшие исследования должны включать большее количество участников и длительные периоды наблюдения, чтобы подтвердить долговременную эффективность ЭССМ в контексте СМА. Если подтвердятся текущие выводы, ЭССМ может стать ключевым элементом комплексного подхода к лечению СМА, дополняя существующие методы реабилитации и предоставляя пациентам больше шансов на сохранение своей двигательной функции.

Стимуляция спинного мозга для восстановления чувствительности

Помимо улучшения двигательной функции, ЭССМ и ЧССМ способны вызывать ощущение прикосновения к конечностям и давления на них. Это явление связано с тем, что стимуляция определённых участков спинного мозга может активировать нервные пути, отвечающие за передачу сенсорной информации от конечностей к мозгу [58]. В результате пациенты начинают ощущать прикосновения и давление даже там, где ранее чувствительность была утрачена. Эффект ощущения прикосновения и давления может варьировать у разных пациентов. У некоторых лиц восстановление чувствительности происходит постепенно, начиная с лёгких ощущений и переходя к более чётким и точным восприятиям. Другие же могут сразу начать чувствовать различные типы тактильных стимулов, такие как тепло, холод или вибрация. Кроме того, стимуляция спинного мозга может способствовать

улучшению координации движений и стабилизации положения тела [58]. Это особенно важно для тех, кто страдает от паралича или других нарушений моторики. Восстановление чувствительности помогает пациентам лучше контролировать свои движения и избегать травм, связанных с отсутствием осязания. Однако стоит отметить, что эффективность таких методов лечения зависит от многих факторов, включая степень повреждения спинного мозга, общее состояние здоровья пациента и индивидуальные особенности организма. Поэтому перед началом терапии необходимо провести тщательное обследование и консультацию со специалистом.

Восстановление чувствительности с использованием эпидуральной стимуляции спинного мозга

ЭССМ, направленная на сегменты позвоночника C5-T1, способна вызывать ощущения в верхних конечностях [59, 60]. Недавние исследования показали, что электростимуляция латеральных отделов шейного отдела спинного мозга может индуцировать ощущения прикосновения и давления в отсутствующих верхних конечностях [59]. Участники исследования (2/4) отмечали появление этих ощущений в отдельных пальцах, хотя подобные ощущения редко сопровождалась парестезией. Таким образом, ЭССМ представляет собой перспективный метод создания сенсорных нейропротезов для лиц с утратой верхних конечностей. Сенсорная обратная связь, получаемая через шейные электроды во время использования протезов рук, повышает точность восприятия размеров и формы объектов [60].

Аналогично, электростимуляция поясничных и крестцовых нервных корешков может вызывать сенсорные ощущения в нижних конечностях, способствуя улучшению баланса и устойчивости при ходьбе. В одном из исследований были использованы электроды, имплантированные на уровнях позвонков T12-L2 у троих пациентов с ампутациями нижних конечностей, для вызова ощущений прикосновения и давления в области отсутствующей стопы [61]. Эти ощущения предоставляли участникам сенсорную обратную связь при контакте протеза ноги с поверхностью. Благодаря такой соматосенсорной обратной связи участники добились значительных клинических улучшений в тестах на сенсорную организацию и оценку функциональной походки, снизив уровень мышечных сокращений и увеличив наклон таза [62, 63]. Это свидетельствует об улучшении стабильности позы при различных условиях поддержания равновесия и ходьбы, а также повышении общей координации движений. Первоначально участники испытывали парестезии и необычные ощущения, однако со временем их описания становились более реалистичными, что может указывать на нейрональную адаптацию и привыкание к новым ощущениям при длительном использовании системы. Более того, биомиметическая стимуляция, основанная на высокочастотных амплитудно-модулированных импульсах, имитирует стохастический

характер естественных нейронных сигналов, что способствует созданию более естественного и интуитивного сенсорного восприятия [64].

Восстановление чувствительности с помощью чрескожной стимуляции спинного мозга

ЧССМ, направленная на шейный отдел спинного мозга, может восстанавливать тактильные ощущения в верхних конечностях после ТСМ [27, 29, 30]. В течение двух месяцев применения ЧССМ у пациентов улучшилась грация силы, чувствительности и захвата. Предварительные данные также указывают на то, что ЧССМ может вызывать сенсорные ощущения в отсутствующей стопе у лиц с ампутацией нижних конечностей [65]. Один участник отметил, что во время применения ЧССМ он чувствовал прикосновение к земле в отсутствующей стопе. Поскольку ЭССМ и ЧССМ воздействуют на одинаковые структуры позвоночника, вполне вероятно, что оба метода способны вызывать сенсорные ощущения в отсутствующих конечностях, а также восстанавливать сенсорные функции в неповреждённых конечностях после травмы нервной системы.

Ограничения широкого внедрения электростимуляции спинного мозга в клиническую практику

Несмотря на значительные достижения в области электростимуляции спинного мозга и её потенциал в восстановлении чувствительности и двигательных функций, существует ряд ограничений, препятствующих широкому внедрению данной технологии в повседневную медицинскую практику [66].

- **Технические сложности.** Установка и настройка систем электростимуляции спинного мозга требуют высокой точности и специализированного оборудования. Имплантация электродов должна проводиться опытными хирургами, что ограничивает доступность процедуры в регионах с недостаточной медицинской инфраструктурой.
- **Риск осложнений.** Как любая инвазивная процедура, имплантация электродов сопряжена с определёнными рисками, такими как инфекции, кровотечение, повреждение окружающих тканей и структур спинного мозга. Несмотря на современные методы минимально инвазивной хирургии, эти риски остаются значительными.
- **Высокая стоимость.** Производство и установка систем электростимуляции спинного мозга требуют значительных финансовых затрат. Это включает разработку и производство самих устройств, обучение медицинского персонала, проведение операций и последующее обслуживание пациентов. В результате данная технология остаётся недоступной для большинства населения, особенно в странах с ограниченными ресурсами здравоохранения.

- *Необходимость индивидуальной настройки.* Каждый пациент уникален, поэтому параметры электростимуляции должны подбираться индивидуально. Это требует проведения дополнительных исследований и испытаний, что увеличивает продолжительность процесса реабилитации и усложняет стандартизацию процедур.
- *Психологические аспекты.* Некоторые пациенты могут испытывать трудности с адаптацией к новым ощущениям, вызванным электростимуляцией спинного мозга. Это может привести к снижению мотивации и отказу от дальнейшего использования устройства. Также возможны психологические последствия, связанные с осознанием утраты конечности и необходимостью использования протеза.
- *Отсутствие долгосрочных данных.* Большинство существующих исследований посвящено краткосрочным эффектам электростимуляции спинного мозга. Долгосрочные данные о безопасности и эффективности данной технологии пока отсутствуют. Это затрудняет принятие решений о широком внедрении метода в клиническую практику.
- *Этические вопросы.* Использование технологий, изменяющих работу нервной системы, поднимает этические вопросы относительно прав пациентов на информированное согласие, конфиденциальности медицинских данных и возможных последствий вмешательства в нервную систему.
- *Регуляторные барьеры.* Разработка и внедрение новых медицинских технологий требуют прохождения сложных регуляторных процедур. Это может замедлить процесс внедрения электростимуляции спинного мозга в широкую клиническую практику, особенно в странах с жёсткими требованиями к сертификации медицинских устройств.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области электростимуляции спинного мозга, существуют серьёзные ограничения, которые необходимо учитывать при планировании масштабного применения данной технологии в клинической практике. Решение этих проблем потребует совместных усилий учёных, инженеров, врачей и регуляторов для обеспечения безопасного и эффективного использования электростимуляции спинного мозга в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Недавние исследования демонстрируют, что ЭССМ и ЧССМ способны улучшать двигательные и сенсорные функции при различных неврологических заболеваниях, открывая новые возможности для повышения качества жизни пациентов. Несмотря на то, что эти методы нейромодуляции уже доказали свою эффективность в улучшении двигательной функции и восстановлении

сенсорной обратной связи, большинство проведённых до сих пор работ носили характер пилотных исследований. Для успешного клинического внедрения как ЭССМ, так и ЧССМ в сферу реабилитации потребуются проведение более крупных и всесторонних исследований, включая испытания в домашних условиях, чтобы обеспечить убедительные доказательства их потенциала в восстановительной медицине. Помимо этого, для оптимизации воздействия на дорсальные корешки спинного мозга необходимо усовершенствование существующих конструкций электродов для ЭССМ. В связи с этим дальнейшая работа и финансирование в области разработки аппаратуры, протоколов стимуляции и научных исследований для ЭССМ и ЧССМ должны стать приоритетными направлениями в ближайшем будущем.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов: Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Наибольший вклад распределён следующим образом: А.Р. Галимов — концепция и дизайн исследования; Э.Р. Тулякова, Е.В. Комкина, Е.В. Кравченко — сбор и анализ литературных источников, написание текста; Е.Д. Альшевская, А.А. Амирова, Я.Ю. Пенкова — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста, редактирование; Д.М. Бирбраер, А.У. Галлямова, Е.В. Харечко — поиск и анализ литературы, написание текста; Е.С. Кочкина, Х.М. Магомедова, Л.Б. Авиан, Э.Ф. Харисова — сбор и анализ данных, редактирование, написание текста.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Author contribution: All the authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication. The greatest contributions were distributed as follows: A.R. Galimov — the concept and design of the study; E.R. Tulyakova, E.V. Komkina, E.V. Kravchenko — collection and analysis of literary sources, writing the text; E.D. Alshevskaya, A.A. Amirova, Ya.Yu. Penkova — literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text, editing; D.M. Birbraer, A.U. Gallyamova, E.V. Kharechko — search and analysis of literature, writing the text; E.S. Kochkina, H.M. Magomedova, L.B. Aviyan, E.F. Kharisova — data collection and analysis, editing, writing the text.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селезнёв Ф.А., Петровский М.Ю., Белов М.Д., и др. Травма спинного мозга: новые концепции в понимании работы эпидуральных стимуляторов и другие современные методы лечения // Эффективная фармакотерапия. 2024. Т. 20, № 34. С. 36–42. doi: 10.33978/2307-3586-2024-20-34-36-42
2. Борозденко Д.А., Богородова В.И., Киселёва Н.М., Негребский В.В. Болезнь Паркинсона: эпидемиология и патогенез // Российский медицинский журнал. 2021. Т. 27, № 2. С. 183–194. doi: 10.17816/0869-2106-2021-27-2-183-194
3. Светличная А.В. Эпидемиологическая характеристика идиопатических воспалительных демиелинизирующих заболеваний ЦНС, включая рассеянный склероз // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. 2024. Т. 23, № 1. С. 21–32. doi: 10.31631/2073-3046-2024-23-1-21-32
4. Гайдук А.Я., Власов Я.В. Спинальные мышечные атрофии в Самарской области: эпидемиология, классификация, перспективы оказания медицинской помощи // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2019. Т. 119, № 12. С. 88–93. doi: 10.17116/jnevro201911912188
5. Ковалёв В.В., Бриль Е.В., Семёнов М.С., и др. Влияние стимуляции спинного мозга на коррекцию застываний при ходьбе у пациентов с болезнью Паркинсона и прогрессирующим надъядерным параличом: серия клинических наблюдений // Альманах клинической медицины. 2022. Т. 50, № 5. С. 315–320. doi: 10.18786/2072-0505-2022-50-029
6. Мошонкина Т.Р., Погорельская М.А., Виноградская З.В., и др. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга в двигательной реабилитации пациентов с травмой спинного мозга // Интегративная физиология. 2020. Т. 1, № 4. С. 351–365. doi: 10.33910/2687-1270-2020-14-351-365
7. Дмитриев А.Б., Рзаев Д.А., Денисова Н.П. Постоянная эпидуральная стимуляция спинного мозга в лечении фармакорезистентной боли у пациентов с синдромом неудачной операции на позвоночнике // Нейрохирургия. 2018. Т. 20, № 2. С. 43–49. doi: 10.17650/1683-3295-2018-20-2-43-49
8. Денисова Н.П., Рогов Д.Ю., Рзаев Д.А., и др. Стимуляция спинного мозга в лечении хронических болевых синдромов // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2016. Т. 80, № 2. С. 47–52. doi: 10.17116/neiro201680247-52
9. Lin A., Shaaya E., Calvert J.S., et al. A Review of Functional Restoration From Spinal Cord Stimulation in Patients With Spinal Cord Injury // Neurospine. 2022. Vol. 19, N 3. P. 703–734. doi: 10.14245/ns.2244652.326
10. Hofstoetter U.S., Freundl B., Binder H., Minassian K. Common neural structures activated by epidural and transcutaneous lumbar spinal cord stimulation: Elicitation of posterior root-muscle reflexes // PLoS One. 2018. Vol. 13, N 1. P. e0192013. doi: 10.1371/journal.pone.0192013
11. Harmsen I.E., Hasanova D., Elias G.J., et al. Trends in clinical trials for spinal cord stimulation // Stereotactic and Functional Neurosurgery. 2021. Vol. 99, N 2. P. 123–134. doi: 10.1159/000510775
12. Булах А.А., Ковлягин Д.Е. Травматическая болезнь спинного мозга: этиология, клиника, диагностика, отдалённые последствия // Вестник науки. 2024. Т. 6, № 75. С. 1969–1979. doi: 10.24412/2712-8849-2024-675-1969-1979
13. Прудникова О.Г., Качесова А.А., Рябых С.О. Реабилитация пациентов в отдалённом периоде травмы спинного мозга: метаанализ литературных данных // Хирургия позвоночника. 2019. Т. 16, № 3. С. 8–16. doi: 10.14531/ss2019.3.8-16
14. D'hondt N., Marcial K.M., Mittal N., et al. A Scoping Review of Epidural Spinal Cord Stimulation for Improving Motor and Voiding Function Following Spinal Cord Injury // Top Spinal Cord Inj Rehabil. 2023. Vol. 29, N 2. P. 12–30. doi: 10.46292/sci22-00061
15. Wagner F.B., Mignardot J.B., Le Goff-Mignardot C.G., et al. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury // Nature. 2018. Vol. 563, N 7729. P. 65–71. doi: 10.1038/s41586-018-0649-2
16. Angeli C.A., Boakye M., Morton R.A., et al. Recovery of Over-Ground Walking after Chronic Motor Complete Spinal Cord Injury // N Engl J Med. 2018. Vol. 379, N 13. P. 1244–1250. doi: 10.1056/NEJMoa1803588
17. Gill M.L., Grahn P.J., Calvert J.S., et al. Neuromodulation of lumbosacral spinal networks enables independent stepping after complete paraplegia // Nat Med. 2018. Vol. 24, N 11. P. 1677–1682. doi: 10.1038/s41591-018-0175-7
18. Rowald A., Komi S., Demesmaeker R., et al. Activity-dependent spinal cord neuromodulation rapidly restores trunk and leg motor functions after complete paralysis // Nat Med. 2022. Vol. 28, N 2. P. 260–271. doi: 10.1038/s41591-021-01663-5
19. Darrow D., Balser D., Netoff T.I., et al. Epidural Spinal Cord Stimulation Facilitates Immediate Restoration of Dormant Motor and Autonomic Supraspinal Pathways after Chronic Neurologically Complete Spinal Cord Injury // J Neurotrauma. 2019. Vol. 36, N 15. P. 2325–2336. doi: 10.1089/neu.2018.6006
20. Peña Pino I., Hoover C., Venkatesh S., et al. Long-Term Spinal Cord Stimulation After Chronic Complete Spinal Cord Injury Enables Volitional Movement in the Absence of Stimulation // Front Syst Neurosci. 2020. Vol. 14. P. 35. doi: 10.3389/fnsys.2020.00035
21. Rejc E., Smith A.C., Weber K.A., et al. Spinal Cord Imaging Markers and Recovery of Volitional Leg Movement With Spinal Cord Epidural Stimulation in Individuals With Clinically Motor Complete Spinal Cord Injury // Front Syst Neurosci. 2020. Vol. 14. P. 559313. doi: 10.3389/fnsys.2020.559313
22. Balaguer J.M., Prat-Ortega G., Verma N., et al. Supraspinal control of motoneurons after paralysis enabled by spinal cord stimulation // medRxiv [Preprint]. Vol. 2023. P. 2023.11.29.23298779. doi: 10.1101/2023.11.29.23298779
23. Hofstoetter U.S., Freundl B., Danner S.M., et al. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation Induces Temporary Attenuation of Spasticity in Individuals with Spinal Cord Injury // J Neurotrauma. 2020. Vol. 37, N 3. P. 481–493. doi: 10.1089/neu.2019.6588
24. Samejima S., Caskey C.D., Inanici F., et al. Multisite Transcutaneous Spinal Stimulation for Walking and Autonomic Recovery in Motor-Incomplete Tetraplegia: A Single-Subject Design // Phys Ther. 2022. Vol. 102, N 1. P. pzab228. doi: 10.1093/ptj/pzab228
25. Zhang F., Carnahan J., Ravi M., et al. Combining Spinal Cord Transcutaneous Stimulation with Activity-based Training to Improve Upper Extremity Function Following Cervical Spinal Cord Injury // Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc. 2023. Vol. 2023. P. 1–4. doi: 10.1109/EMBC40787.2023.10340976
26. Oh J., Scheffler M.S., Mahan E.E., et al. Combinatorial Effects of Transcutaneous Spinal Stimulation and Task-Specific Training to

- Enhance Hand Motor Output after Paralysis // *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2023. Vol. 29, Suppl. P. 15–22. doi: 10.46292/sci23-00040S
27. Chandrasekaran S., Bhagat N.A., Ramdeo R., et al. Targeted transcutaneous spinal cord stimulation promotes persistent recovery of upper limb strength and tactile sensation in spinal cord injury: a pilot study // *Front Neurosci*. 2023. Vol. 17. P. 1210328. doi: 10.3389/fnins.2023.1210328
28. Inanici F., Brighton L.N., Samejima S., et al. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation Restores Hand and Arm Function After Spinal Cord Injury // *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2021. Vol. 29. P. 310–319. doi: 10.1109/TNSRE.2021.3049133
29. Мошонкина Т.Р., Погольская М.А., Виноградская З.В., и др. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга в двигательной реабилитации пациентов с травмой спинного мозга // *Интегративная физиология*. 2020. Т. 1, № 4. С. 351–365. doi: 10.33910/2687-1270-2020-1-4-351-365
30. Савенкова А.А., Сарана А.М., Щербак С.Г., и др. Неинвазивная электрическая стимуляция спинного мозга в комплексной реабилитации больных со спинномозговой травмой // *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2019. Т. 96, № 5. С. 11–18. doi: 10.17116/kurort2019605111
31. Dalrymple A.N., Hooper C.A., Kuriakose M.G., et al. Using a high-frequency carrier does not improve comfort of transcutaneous spinal cord stimulation // *J Neural Eng*. 2023. Vol. 20. N 1. doi: 10.1088/1741-2552/acabe8
32. Mukhametova E., Militskova A., Biktimirov A., et al. Consecutive Transcutaneous and Epidural Spinal Cord Neuromodulation to Modify Clinical Complete Paralysis—the Proof of Concept // *Mayo Clin Proc Innov Qual Outcomes*. 2023. Vol. 8, N 1. P. 1–16. doi: 10.1016/j.mayocpiqo.2023.09.006
33. Тория В.Г., Виссарионов С.В., Савина М.В., Баиндурашвили А.Г. Электростимуляция как метод коррекции респираторных расстройств у пациентов с травмой шейного отдела спинного мозга (обзор литературы) // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2023. Т. 11, № 2. С. 239–251. doi: 10.17816/PTORS191378
34. Игнатьева В.И., Вознюк И.А., Шамалов Н.А., и др. Социально-экономическое бремя инсульта в Российской Федерации // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски*. 2023. Т. 123, № 8–2. С. 5–15. doi: 10.17116/jnevro20231230825
35. Powell M.P., Verma N., Sorensen E., et al. Epidural stimulation of the cervical spinal cord for post-stroke upper-limb paresis // *Nat Med*. 2023. Vol. 29, N 3. P. 689–699. doi: 10.1038/s41591-022-02202-6
36. Moon Y., Yang C., Veit N.C., et al. Noninvasive spinal stimulation improves walking in chronic stroke survivors: a proof-of-concept case series // *Biomed Eng Online*. 2024. Vol. 23, N 1. P. 38. doi: 10.1186/s12938-024-01231-1
37. Ананьев С.С., Павлов Д.А., Якупов Р.Н., и др. Транскраниальная магнитная и чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга в коррекции ходьбы у пациентов после инсульта: слепое клиническое рандомизированное исследование // *Вестник восстановительной медицины*. 2023. Т. 22, № 4. С. 14–22. doi: 10.38025/2078-1962-2023-22-4-14-22
38. Павлов Д.А. Чрескожная электростимуляция спинного мозга как метод коррекции двигательных функций после нарушения церебрального кровообращения. В кн.: *Актуальные медико-биологические проблемы спорта и физической культуры: сборник материалов Всероссийской с международным участием конференции, Волгоград, 01–02 февраля 2023 года. Часть 2. Волгоград: Волгоградская государственная академия физической культуры, 2023. С. 254–263. EDN: MFBIOM*
39. Якупов Р.Н., Котова Е.Ю., Балыкин Ю.М., и др. Влияние чрескожной электростимуляции спинного мозга и механотерапии на возбудимость спинальных нейронных сетей и локомоторные функции пациентов с нарушениями мозгового кровообращения // *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2016. № 4. С. 121–128. EDN: XCSQSH
40. Хамадянова А.У., Кузнецов К.О., Гайфуллина Э.И., и др. Андролены и болезнь Паркинсона: роль у человека и в эксперименте // *Проблемы эндокринологии*. 2022. Т. 68, № 6. С. 146–156. doi: 10.14341/probl13148
41. Асриянц С.В., Томский А.А., Гамалея А.А., Пронин И.Н. Электростимуляция субталамического ядра при болезни Паркинсона: под наркозом или в сознании? // *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2021. Т. 85, № 5. С. 117–121. doi: 10.17116/neiro202185051117
42. Singh O., Carvalho D.Z., Espay A.J., et al. Spinal cord stimulation for gait impairment in Parkinson Disease: scoping review and mechanistic considerations // *Pain Med*. 2023. Vol. 24, N 2. P. 11–17. doi: 10.1093/pm/pnad092
43. Kobayashi R., Kenji S., Taketomi A., et al. New mode of burst spinal cord stimulation improved mental status as well as motor function in a patient with Parkinson's disease // *Parkinsonism Relat Disord*. 2018. Vol. 57. P. 82–83. doi: 10.1016/j.parkreldis.2018.07.002
44. Lai Y., Pan Y., Wang L., et al. Spinal Cord Stimulation with Surgical Lead Improves Pain and Gait in Parkinson's Disease after a Dislocation of Percutaneous Lead: A Case Report // *Stereotact Funct Neurosurg*. 2020. Vol. 98, N 2. P. 104–109. doi: 10.1159/000505707
45. Zhou P.B., Bao M. Spinal cord stimulation treatment for freezing of gait in Parkinson's disease: A case report // *Brain Stimul*. 2022. Vol. 15, N 1. P. 76–77. doi: 10.1016/j.brs.2021.11.011
46. Chakravarthy K.V., Chaturvedi R., Agari T., et al. Single arm prospective multicenter case series on the use of burst stimulation to improve pain and motor symptoms in Parkinson's disease // *Bioelectron Med*. 2020. Vol. 6. P. 18. doi: 10.1186/s42234-020-00055-3
47. Furusawa Y., Matsui A., Kobayashi-Noami K., et al. Burst spinal cord stimulation for pain and motor function in Parkinson's disease: A case series // *Clin Park Relat Disord*. 2020. Vol. 3. P. 100043. doi: 10.1016/j.prdoa.2020.100043
48. Hubsch C., D'Hardemare V., Ben Maacha M., et al. Tonic spinal cord stimulation as therapeutic option in Parkinson disease with axial symptoms: Effects on walking and quality of life // *Parkinsonism Relat Disord*. 2019. Vol. 63. P. 235–237. doi: 10.1016/j.parkreldis.2019.02.044
49. Samotus O., Parrent A., Jog M. Long-term update of the effect of spinal cord stimulation in advanced Parkinson's disease patients // *Brain Stimul*. 2020. Vol. 13, N 5. P. 1196–1197. doi: 10.1016/j.brs.2020.06.004
50. Fonoff E.T., de Lima-Pardini A.C., Coelho D.B., et al. Spinal Cord Stimulation for Freezing of Gait: From Bench to Bedside // *Front Neurol*. 2019. Vol. 10. P. 905. doi: 10.3389/fneur.2019.00905
51. Ковалёв В.В., Бриль Е.В., Семёнов М.С., и др. Влияние стимуляции спинного мозга на коррекцию застываний при ходьбе у пациентов с болезнью Паркинсона и прогрессирующим надъядерным параличом: серия клинических наблюдений // *Аль-*

манах клинической медицины. 2022. Т. 50, № 5. С. 315–320. doi: 10.18786/2072-0505-2022-50-029

52. Шаглаева Я.С., Титова М.А., Пашковская Д.В., и др. Приверженность лечению в ведении пациентов с рассеянным склерозом // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. 2024. Т. 124, № 7–2. С. 26–32. doi: 10.17116/jnevro202412407226

53. Бойко А.Н., Гусев Е.И. Современные алгоритмы диагностики и лечения рассеянного склероза, основанные на индивидуальной оценке состояния пациента // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. 2017. Т. 117, № 2–2. С. 92–106. doi: 10.17116/jnevro20171172292-106

54. Goodwin B.J., Mahmud R., TomThundiyil S., et al. The Efficacy of Spinal Cord Stimulators in the Reduction of Multiple Sclerosis Spasticity: A Narrative Systematic Review // Brain Neurorehabil. 2023. Vol. 16, N 2. P. 19. doi: 10.12786/bn.2023.16.e19

55. Hofstoetter U.S., Freundl B., Lackner P., Binder H. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation Enhances Walking Performance and Reduces Spasticity in Individuals with Multiple Sclerosis // Brain Sci. 2021. Vol. 11, N 4. P. 472. doi: 10.3390/brainsci11040472

56. Пономаренко Г.Н., Кольцов А.А., Мальцев И.С. Общие вопросы спинальной мышечной атрофии (научный обзор). Этиология, клинические особенности, подходы в реабилитации и ортопедическом лечении // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2021. Т. 20, № 4. С. 341–355. doi: 10.17816/rjpr83799

57. Capogrosso M., Prat-Ortega G., Ensel S., et al. Targeted Stimulation of the Sensory Afferents Improves Motoneuron Function in Humans With Spinal Muscular Atrophy. 2024: PREPRINT (Version 1). doi: 10.21203/rs.3.rs-3970994/v1

58. Щурова Е.Н., Прудникова О.Г., Качесова А.А., и др. Улучшение функционального состояния пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы при эпидуральной электростимуляции: проспективное исследование // Вестник восстановительной медицины. 2023. Т. 22, № 6. С. 28–41. doi: 10.38025/2078-1962-2023-22-6-28-41

59. Chandrasekaran S., Nanivadekar A.C., McKernan G., et al. Correction: Sensory restoration by epidural stimulation of the lateral spinal cord in upper-limb amputees // Elife. 2021. Vol. 10. P. e72438. doi: 10.7554/eLife.72438

60. Nanivadekar A.C., Chandrasekaran S., Helm E.R., et al. Closed-loop stimulation of lateral cervical spinal cord in upper-limb amputees to enable sensory discrimination: a case study // Sci Rep. 2022. Vol. 12, N 1. P. 17002. doi: 10.1038/s41598-022-21264-7

61. Nanivadekar A.C., Bose R., Petersen B.A., et al. Restoration of sensory feedback from the foot and reduction of phantom limb pain via closed-loop spinal cord stimulation // Nat Biomed Eng. 2024. Vol. 8, N 8. P. 992–1003. doi: 10.1038/s41551-023-01153-8

62. Dalrymple A.N., Bose R., Sarma D., et al. Reflex modulation and functional improvements following spinal cord stimulation for sensory restoration after lower-limb amputation // medRxiv. Vol. 2023. P. 2023–09.

63. Formento E., D'Anna E., Gribi S., et al. A biomimetic electrical stimulation strategy to induce asynchronous stochastic neural activity // J Neural Eng. 2020. Vol. 17, N 4. P. 046019. doi: 10.1088/1741-2552/aba4fc

64. Dalrymple A.N., Fisher L.E., Weber D.J. A preliminary study exploring the effects of transcutaneous spinal cord stimulation on spinal excitability and phantom limb pain in people with a transtibial amputation // J Neural Eng. 2024. Vol. 21, N 4. P. 10.1088/1741-2552/ad6a8d. doi: 10.1088/1741-2552/ad6a8d

65. Solinsky R., Specker-Sullivan L., Wexler A. Current barriers and ethical considerations for clinical implementation of epidural stimulation for functional improvement after spinal cord injury // J Spinal Cord Med. 2020. Vol. 43, N 5. P. 653–656. doi: 10.1080/10790268.2019.1666240

66. Yoo H.J., Koo B., Yong C.W., Lee K.S. Prediction of gait recovery using machine learning algorithms in patients with spinal cord injury // Medicine (Baltimore). 2024. Vol. 103, N 23. P. e38286. doi: 10.1097/MD.00000000000038286

REFERENCES

1. Seleznev FA, Petrovsky MYu, Belov MD, et al. Spinal cord injury: new concepts in understanding the work of epidural stimulators and other modern treatment methods. *Effective pharmacotherapy*. 2024;20(34):36–42. doi: 10.33978/2307-3586-2024-20-34-36-42

2. Borozdenko DA, Bogorodova VI, Kiseleva NM, Negrebetsky VV. Parkinson's disease: epidemiology and pathogenesis. *Russian Medicine*. 2021;27(2):183–194. doi: 10.17816/0869-2106-2021-27-2-183-194

3. Svetlichnaya AV. Epidemiological Characteristics of Inflammatory Demyelinating Diseases of the Central Nervous System Including Multiple Sclerosis. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2024;23(1):21–32. doi: 10.31631/2073-3046-2024-23-1-21-32

4. Gayduk AI, Vlasov IaV. Spinal muscular atrophy in samara region. Epidemiology, classification, prospects for health care. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2019;119(12):88–93. doi: 10.17116/jnevro201911912188

5. Kovalev VV, Bril EV, Semenov MS, et al. Spinal cord stimulation for freezing of gait in Parkinson's disease and progressive supranuclear palsy: a case series. *Almanac of Clinical Medicine*. 2022;50(5):315–320. doi: 10.18786/2072-0505-2022-50-029

6. Moshonkina TR, Pogolskaya MA, Vinogradskaya ZV, et al. Transcutaneous spinal cord electrical stimulation in motor

rehabilitation of patients with spinal cord injury. *Integrative Physiology*. 2020;1(4):351–365. doi: 10.33910/2687-1270-2020-14-351-365

7. Dmitriev AB, Rzaev DA, Denisova NP. Application of spinal cord stimulation in the treatment of persistent pain in failed back surgery syndrome. *Neyrokhirurgiya*. 2018;20(2):43–49. doi: 10.17650/1683-3295-2018-20-2-43-49

8. Denisova NP, Rogov DYu, Rzaev DA, et al. Spinal cord stimulation in the treatment of chronic pain syndromes. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2016;80(2):47–52. (In Russ., In Engl.) doi: 10.17116/neiro201680247-52

9. Lin A, Shaaya E, Calvert JS, et al. A Review of Functional Restoration From Spinal Cord Stimulation in Patients With Spinal Cord Injury. *Neurospine*. 2022;19(3):703–734. doi: 10.14245/ns.2244652.326

10. Hofstoetter US, Freundl B, Binder H, Minassian K. Common neural structures activated by epidural and transcutaneous lumbar spinal cord stimulation: Elicitation of posterior root-muscle reflexes. *PLoS One*. 2018;13(1):e0192013. doi: 10.1371/journal.pone.0192013

11. Harmsen IE, Hasanova D, Elias GJ, et al. Trends in clinical trials for spinal cord stimulation. *Stereotactic and Functional Neurosurgery*. 2021;99(2):123–134. doi: 10.1159/000510775

12. Bulakh AA, Kovlyagin DE. Traumatic spinal cord disease: etiology, clinic, diagnosis, long-term consequences. *Bulletin of Science*. 2024;6(75):1969–1979. doi: 10.24412/2712-8849-2024-675-1969-1979
13. Prudnikova OG, Kachesova AA, Ryabykh SO. Rehabilitation of patients in late period after spinal cord injury: a meta-analysis of literature data. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)*. 2019;16(3):8–16. doi: 10.14531/ss2019.3.8-16
14. D'hondt N, Marcial KM, Mittal N, et al. A Scoping Review of Epidural Spinal Cord Stimulation for Improving Motor and Voiding Function Following Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2023;29(2):12–30. doi: 10.46292/sci22-00061
15. Wagner FB, Mignardot JB, Le Goff-Mignardot CG, et al. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature*. 2018;563(7729):65–71. doi: 10.1038/s41586-018-0649-2
16. Angeli CA, Boakye M, Morton RA, et al. Recovery of Over-Ground Walking after Chronic Motor Complete Spinal Cord Injury. *N Engl J Med*. 2018;379(13):1244–1250. doi: 10.1056/NEJMoa1803588
17. Gill ML, Grahm PJ, Calvert JS, et al. Neuromodulation of lumbosacral spinal networks enables independent stepping after complete paraplegia. *Nat Med*. 2018;24(11):1677–1682. doi: 10.1038/s41591-018-0175-7
18. Rowald A, Komi S, Demesmaeker R, et al. Activity-dependent spinal cord neuromodulation rapidly restores trunk and leg motor functions after complete paralysis. *Nat Med*. 2022;28(2):260–271. doi: 10.1038/s41591-021-01663-5
19. Darrow D, Balser D, Netoff TL, et al. Epidural Spinal Cord Stimulation Facilitates Immediate Restoration of Dormant Motor and Autonomic Supraspinal Pathways after Chronic Neurologically Complete Spinal Cord Injury. *J Neurotrauma*. 2019;36(15):2325–2336. doi: 10.1089/neu.2018.6006
20. Peña Pino I, Hoover C, Venkatesh S, et al. Long-Term Spinal Cord Stimulation After Chronic Complete Spinal Cord Injury Enables Volitional Movement in the Absence of Stimulation. *Front Syst Neurosci*. 2020;14:35. doi: 10.3389/fnsys.2020.00035
21. Rejc E, Smith AC, Weber KA, et al. Spinal Cord Imaging Markers and Recovery of Volitional Leg Movement With Spinal Cord Epidural Stimulation in Individuals With Clinically Motor Complete Spinal Cord Injury. *Front Syst Neurosci*. 2020;14:559313. doi: 10.3389/fnsys.2020.559313
22. Balaguer JM, Prat-Ortega G, Verma N, et al. Supraspinal control of motoneurons after paralysis enabled by spinal cord stimulation. *medRxiv* [Preprint]. 2023:2023.11.29.23298779. doi: 10.1101/2023.11.29.23298779
23. Hofstoetter US, Freundl B, Danner SM, et al. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation Induces Temporary Attenuation of Spasticity in Individuals with Spinal Cord Injury. *J Neurotrauma*. 2020;37(3):481–493. doi: 10.1089/neu.2019.6588
24. Samejima S, Caskey CD, Inanici F, et al. Multisite Transcutaneous Spinal Stimulation for Walking and Autonomic Recovery in Motor-Incomplete Tetraplegia: A Single-Subject Design. *Phys Ther*. 2022;102(1):pzab228. doi: 10.1093/ptj/pzab228
25. Zhang F, Carnahan J, Ravi M, et al. Combining Spinal Cord Transcutaneous Stimulation with Activity-based Training to Improve Upper Extremity Function Following Cervical Spinal Cord Injury. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2023;2023:1–4. doi: 10.1109/EMBC40787.2023.10340976
26. Oh J, Scheffler MS, Mahan EE, et al. Combinatorial Effects of Transcutaneous Spinal Stimulation and Task-Specific Training to Enhance Hand Motor Output after Paralysis. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2023;29(Suppl):15–22. doi: 10.46292/sci23-00040S
27. Chandrasekaran S, Bhagat NA, Ramdeo R, et al. Targeted transcutaneous spinal cord stimulation promotes persistent recovery of upper limb strength and tactile sensation in spinal cord injury: a pilot study. *Front Neurosci*. 2023;17:1210328. doi: 10.3389/fnins.2023.1210328
28. Inanici F, Brighton LN, Samejima S, et al. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation Restores Hand and Arm Function After Spinal Cord Injury. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2021;29:310–319. doi: 10.1109/TNSRE.2021.3049133
29. Moshonkina TR, Pogolskaya MA, Vinogradskaya ZV, et al. Transcutaneous spinal cord electrical stimulation in motor rehabilitation of patients with spinal cord injury. *Integrative Physiology*. 2020;1(4):351–365. doi: 10.33910/2687-1270-2020-1-4-351-365
30. Savenkova AA, Sarana AM, Shcherbak SG, et al. Noninvasive spinal cord electrical stimulation in the complex rehabilitation of patients with spinal cord injury. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy*. 2019;96(5):11–18. doi: 10.17116/kurort20199605111
31. Dalrymple AN, Hooper CA, Kuriakose MG, et al. Using a high-frequency carrier does not improve comfort of transcutaneous spinal cord stimulation. *J Neural Eng*. 2023;20(1). doi: 10.1088/1741-2552/acabe8
32. Mukhametova E, Militskova A, Biktimirov A, et al. Consecutive Transcutaneous and Epidural Spinal Cord Neuromodulation to Modify Clinical Complete Paralysis—the Proof of Concept. *Mayo Clin Proc Innov Qual Outcomes*. 2023;8(1):1–16. doi: 10.1016/j.mayocpiqo.2023.09.006
33. Toriya VG, Vissarionov SV, Savina MV, Baidurashvili AG. Electrostimulation as a method of correction of respiratory disorders in patients with cervical spinal cord injury: A review. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2023;11(2):239–251. doi: 10.17816/PTORS191378
34. Ignatyeva VI, Voznyuk IA, Shamalov NA, et al. Social and economic burden of stroke in Russian Federation. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2023;123(8–2):5–15. doi: 10.17116/jnevro20231230825
35. Powell MP, Verma N, Sorensen E, et al. Epidural stimulation of the cervical spinal cord for post-stroke upper-limb paresis. *Nat Med*. 2023;29(3):689–699. doi: 10.1038/s41591-022-02202-6
36. Moon Y, Yang C, Veit NC, et al. Noninvasive spinal stimulation improves walking in chronic stroke survivors: a proof-of-concept case series. *Biomed Eng Online*. 2024;23(1):38. doi: 10.1186/s12938-024-01231-1
37. Ananyev SS, Pavlov DA, Yakupov RN, et al. Transcranial Magnetic and Transcutaneous Spinal Cord Electrical Stimulation a Stroke-Patients Walking Correction: Blinded Clinical Randomised Study. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2023;22(4):14–22. doi: 10.38025/2078-1962-2023-22-4-14-22
38. Pavlov DA. *Percutaneous electrical stimulation of the spinal cord as a method of correcting motor functions after impaired cerebral circulation*. In: Actual medical and biological problems of sports and physical culture: a collection of materials of the All-Russian conference with international participation, Volgograd, February 01–02, 2023. Part 2. Volgograd: Volgograd State Academy of Physical Culture; 2023: 254–263. EDN: MFB10M
39. Yakupov RN, Kotova EYu, Balykin YuM, et al. The effect of percutaneous electrical stimulation of the spinal cord and mechanotherapy on the excitability of spinal neural networks and

- locomotor functions of patients with cerebral circulatory disorders. *Ulyanovsk Medical and Biological Journal*. 2016;(4):121–128. EDN: XCSQSH
40. Hamadyanova AU, Kuznetsov KO, Gaifullina EI, et al. Androgens and Parkinson's disease: the role in humans and in experiment. *Problems of Endocrinology*. 2022;68(6):146–156. doi: 10.14341/probl13148
41. Asriyants SV, Tomskey AA, Gamaleya AA, Pronin IN. Deep brain stimulation of the subthalamic nucleus for parkinson's disease: awake vs asleep. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2021;85(5):117–121. (In Russ., In Engl.) doi: 10.17116/neiro20218505117
42. Singh O, Carvalho DZ, Espay AJ, et al. Spinal cord stimulation for gait impairment in Parkinson Disease: scoping review and mechanistic considerations. *Pain Med*. 2023;24(2):11–17. doi: 10.1093/pm/pnad092
43. Kobayashi R, Kenji S, Taketomi A, et al. New mode of burst spinal cord stimulation improved mental status as well as motor function in a patient with Parkinson's disease. *Parkinsonism Relat Disord*. 2018;57:82–83. doi: 10.1016/j.parkreldis.2018.07.002
44. Lai Y, Pan Y, Wang L, et al. Spinal Cord Stimulation with Surgical Lead Improves Pain and Gait in Parkinson's Disease after a Dislocation of Percutaneous Lead: A Case Report. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2020;98(2):104–109. doi: 10.1159/000505707
45. Zhou PB, Bao M. Spinal cord stimulation treatment for freezing of gait in Parkinson's disease: A case report. *Brain Stimul*. 2022;15(1):76–77. doi: 10.1016/j.brs.2021.11.011
46. Chakravarthy KV, Chaturvedi R, Agari T, et al. Single arm prospective multicenter case series on the use of burst stimulation to improve pain and motor symptoms in Parkinson's disease. *Bioelectron Med*. 2020;6:18. doi: 10.1186/s42234-020-00055-3
47. Furusawa Y, Matsui A, Kobayashi-Noami K, et al. Burst spinal cord stimulation for pain and motor function in Parkinson's disease: A case series. *Clin Park Relat Disord*. 2020;3:100043. doi: 10.1016/j.prdoa.2020.100043
48. Hubsch C, D'Hardemare V, Ben Maacha M, et al. Tonic spinal cord stimulation as therapeutic option in Parkinson disease with axial symptoms: Effects on walking and quality of life. *Parkinsonism Relat Disord*. 2019;63:235–237. doi: 10.1016/j.parkreldis.2019.02.044
49. Samotus O, Parrent A, Jog M. Long-term update of the effect of spinal cord stimulation in advanced Parkinson's disease patients. *Brain Stimul*. 2020;13(5):1196–1197. doi: 10.1016/j.brs.2020.06.004
50. Fonoff ET, de Lima-Pardini AC, Coelho DB, et al. Spinal Cord Stimulation for Freezing of Gait: From Bench to Bedside. *Front Neurol*. 2019;10:905. doi: 10.3389/fneur.2019.00905
51. Kovalev VV, Bril EV, Semenov MS, et al. Spinal cord stimulation for freezing of gait in Parkinson's disease and progressive supranuclear palsy: a case series. *Almanac of Clinical Medicine*. 2022;50(5):315–320. doi: 10.18786/2072-0505-2022-50-029
52. Shaglaeva YaS, Titova MA, Pashkovskaya DV, et al. Adherence to treatment in the management of patients with multiple sclerosis. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2024;124(7–2):26–32. doi: 10.17116/jnevro202412407226
53. Boiko AN, Gusev EI. Current algorithms of diagnosis and treatment of multiple sclerosis based on the individual assessment of the patient. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2017;117(2–2):92–106. doi: 10.17116/jnevro20171172292-106
54. Goodwin BJ, Mahmud R, TomThundiyil S, et al. The Efficacy of Spinal Cord Stimulators in the Reduction of Multiple Sclerosis Spasticity: A Narrative Systematic Review. *Brain Neurorehabil*. 2023;16(2):e19. doi: 10.12786/bn.2023.16.e19
55. Hofstoetter US, Freundl B, Lackner P, Binder H. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation Enhances Walking Performance and Reduces Spasticity in Individuals with Multiple Sclerosis. *Brain Sci*. 2021;11(4):472. doi: 10.3390/brainsci11040472
56. Ponomarenko GN, Koltsov AA, Maltsev IS. General issues of spinal muscular atrophy (scientific review). Etiology, clinical features, approaches in rehabilitation and orthopedic treatment. *Russian journal of the physical therapy, balneotherapy and rehabilitation*. 2021;20(4):341–355. doi: 10.17816/rjpbr83799
57. Capogrosso M, Prat-Ortega G, Ensel S, et al. *Targeted Stimulation of the Sensory Afferents Improves Motoneuron Function in Humans With Spinal Muscular Atrophy*. 2024: PREPRINT (Version 1). doi: 10.21203/rs.3.rs-3970994/v1
58. Shchurova EN, Prudnikova OG, Kachesova AA, et al. Improvement of Functional State of Patients after Spinal Cord Injury During Epidural Electrical Stimulation: Prospective Study. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2023;22(6):28–41. doi: 10.38025/2078-1962-2023-22-6-28-41
59. Chandrasekaran S, Nanivadekar AC, McKernan G, et al. Correction: Sensory restoration by epidural stimulation of the lateral spinal cord in upper-limb amputees. *Elife*. 2021;10:e72438. doi: 10.7554/eLife.72438
60. Nanivadekar AC, Chandrasekaran S, Helm ER, et al. Closed-loop stimulation of lateral cervical spinal cord in upper-limb amputees to enable sensory discrimination: a case study. *Sci Rep*. 2022;12(1):17002. doi: 10.1038/s41598-022-21264-7
61. Nanivadekar AC, Bose R, Petersen BA, et al. Restoration of sensory feedback from the foot and reduction of phantom limb pain via closed-loop spinal cord stimulation. *Nat Biomed Eng*. 2024;8(8):992–1003. doi: 10.1038/s41551-023-01153-8
62. Dalrymple AN, Bose R, Sarma D, et al. Reflex modulation and functional improvements following spinal cord stimulation for sensory restoration after lower-limb amputation. *medRxiv*. 2023:2023–09.
63. Formento E, D'Anna E, Gribi S, et al. A biomimetic electrical stimulation strategy to induce asynchronous stochastic neural activity. *J Neural Eng*. 2020;17(4):046019. doi: 10.1088/1741-2552/aba4fc
64. Dalrymple AN, Fisher LE, Weber DJ. A preliminary study exploring the effects of transcutaneous spinal cord stimulation on spinal excitability and phantom limb pain in people with a transtibial amputation. *J Neural Eng*. 2024;21(4):10.1088/1741-2552/ad6a8d. doi: 10.1088/1741-2552/ad6a8d
65. Solinsky R, Specker-Sullivan L, Wexler A. Current barriers and ethical considerations for clinical implementation of epidural stimulation for functional improvement after spinal cord injury. *J Spinal Cord Med*. 2020;43(5):653–656. doi: 10.1080/10790268.2019.1666240
66. Yoo HJ, Koo B, Yong CW, Lee KS. Prediction of gait recovery using machine learning algorithms in patients with spinal cord injury. *Medicine (Baltimore)*. 2024;103(23):e38286. doi: 10.1097/MD.00000000000038286

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

* **Галимов Айрат Рамирович**, канд. мед. наук, доцент;
адрес: Россия, 450008, Уфа, ул. Ленина, д. 3;
ORCID: 0000-0003-4403-0204;
eLibrary SPIN: 8742-4109;
e-mail: galimovajrat457@gmail.com

Тулякова Эвелина Рифатовна, студент;
ORCID: 0009-0004-2959-9480;
e-mail: Evelinatu26@gmail.com

Комкина Елизавета Викторовна, студент;
ORCID: 0009-0008-6457-0850;
e-mail: Liza.Komkina@bk.ru

Кравченко Елизавета Владимировна, студент;
ORCID: 0009-0003-4786-6151;
e-mail: lizakravchenko2000@gmail.com

Альшевская Ева Дмитриевна, студент;
ORCID: 0009-0005-6720-3878;
e-mail: alshevskaya.2002@mail.ru

Амирова Айдан Алифхановна, студент;
ORCID: 0009-0008-9160-1122;
e-mail: Aydan2625@gmail.com

Пенькова Яна Юрьевна, студент;
ORCID: 0009-0007-7973-4689;
e-mail: penkovayana2003@mail.ru

Бирбраер Дина Михайловна, студент;
ORCID: 0009-0006-3926-5171;
e-mail: milky.vey.2013@yandex.ru

Галлямова Адилья Ураловна, студент;
ORCID: 0009-0000-8599-1963;
e-mail: adilya.g55@gmail.com

Харечко Екатерина Вячеславовна, студент;
ORCID: 0009-0005-4136-0736;
e-mail: katerum2017@mail.ru

Кочкина Елена Сергеевна, студент;
ORCID: 0009-0009-5584-5020;
e-mail: Elenakochkina745@gmail.com

Магомедова Хадижат Магомедовна, студент;
ORCID: 0009-0008-2341-2506;
e-mail: Mhadijka2@mail.ru

Авиан Лолита Багдасаровна, студент;
ORCID: 0009-0006-8302-552X;
e-mail: lolaaviyan@gmail.com

Харисова Элина Фирдусовна, студент;
ORCID: 0009-0003-8770-6582;
e-mail: ela_harisova@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Airat R. Galimov**, MD, Cand. Sci. (Medicine), associate professor;
address: 3 Lenin street, 450008 Ufa, Russia;
ORCID: 0000-0003-4403-0204;
eLibrary SPIN: 8742-4109;
e-mail: galimovajrat457@gmail.com

Evelina R. Tuliakova, student;
ORCID: 0009-0004-2959-9480;
e-mail: Evelinatu26@gmail.com

Elizaveta V. Komkina, student;
ORCID: 0009-0008-6457-0850;
e-mail: Liza.Komkina@bk.ru

Elizaveta V. Kravchenko, student;
ORCID: 0009-0003-4786-6151;
e-mail: lizakravchenko2000@gmail.com

Eva D. Alshevskaya, student;
ORCID: 0009-0005-6720-3878;
e-mail: alshevskaya.2002@mail.ru

Aydan A. Amirova, student;
ORCID: 0009-0008-9160-1122;
e-mail: Aydan2625@gmail.com

Yana Yu. Penkova, student;
ORCID: 0009-0007-7973-4689;
e-mail: penkovayana2003@mail.ru

Dina M. Birbraer, student;
ORCID: 0009-0006-3926-5171;
e-mail: milky.vey.2013@yandex.ru

Adilya U. Gallyamova, student;
ORCID: 0009-0000-8599-1963;
e-mail: adilya.g55@gmail.com

Ekaterina V. Kharechko, student;
ORCID: 0009-0005-4136-0736;
e-mail: katerum2017@mail.ru

Elena S. Kochkina, student;
ORCID: 0009-0009-5584-5020;
e-mail: Elenakochkina745@gmail.com

Khadizhat M. Magomedova, student;
ORCID: 0009-0008-2341-2506;
e-mail: Mhadijka2@mail.ru

Lolita B. Aviyan, student;
ORCID: 0009-0006-8302-552X;
e-mail: lolaaviyan@gmail.com

Elina F. Kharisova, student;
ORCID: 0009-0003-8770-6582;
e-mail: ela_harisova@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author