

УДК 616-001.31+616.89+331.582.2+303.447.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ В НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМОЙ

© Ашот Эдуардович Амамчян, Арсений Михайлович Коцевалов

Ростовский государственный медицинский университет. 344022, г. Ростов-на-Дону, пер. Нахичеванский, д. 29

Контактная информация: Ашот Эдуардович Амамчян — к.м.н., доцент кафедры нормальной физиологии.

E-mail: amashot2011@mail.ru ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6245-4987> SPIN: 8724-4158

Для цитирования: Амамчян А.Э., Коцевалов А.М. Эффективность применения функциональной электростимуляции в нейрореабилитации пациентов с черепно-мозговой травмой // Forcipe. 2024. Т. 7. № 1. С. 9–19.

Поступила: 06.02.2024

Одобрена: 18.03.2024

Принята к печати: 16.04.2024

РЕЗЮМЕ. Черепно-мозговая травма (ЧМТ) чаще, чем любое другое травматическое повреждение, становится причиной развития локомоторных нарушений, приводящих к инвалидизации и утрате трудоспособности. По современным оценкам, около 69 млн человек ежегодно страдают от ЧМТ в результате несчастных случаев. Актуальной проблемой становится изучение возможных методов реабилитации, призванных наиболее эффективно помочь пациентам справиться с последствиями ЧМТ. Потенциально перспективным, относительно доступным и безопасным является метод функциональной электростимуляции (ФЭС). Данный метод предполагает программируемое обучение утраченным навыкам при помощи электростимуляции мышц и периферических нервов, сопровождаемое контекстно-условным подкреплением движения волевыми усилиями пациента. В соответствии с современными представлениями о нейропластичности воздействие призвано обеспечить активацию процессов компенсаторной реорганизации нервных центров, необходимую для восстановления возможности осуществления движений. Положительное влияние метода было зарегистрировано у пациентов, перенесших инсульт, травму спинного мозга, страдающих рассеянным склерозом. Однако отсутствуют систематизированные данные об эффективности ФЭС в лечении ЧМТ. В этой связи в обзоре был проведен анализ накопленных клинических исследований и рекомендаций отечественных и зарубежных источников, посвященных изучению эффективности функциональной электростимуляции для пациентов с ЧМТ. Особое внимание уделялось механизмам воздействия ФЭС на организм человека, изучению факторов, способствующих восстановлению двигательной функции. По итогам проведенного анализа дано заключение о том, что ФЭС может оказать положительное влияние в лечении пациентов с травматическим повреждением центральной нервной системы в сочетании с традиционными методами, а также после проведения стандартного курса реабилитации, однако необходимы дополнительные исследования для выявления преимуществ метода перед остальными, широко применяемыми в медицинской практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: черепно-мозговая травма, функциональная электростимуляция, нейрореабилитация

EFFECTIVENESS OF FUNCTIONAL ELECTRICAL STIMULATION IN NEUROREHABILITATION OF PATIENTS WITH TRAUMATIC BRAIN INJURY

© Ashot E. Amamchyan, Arsenii M. Kotsevalov

Rostov State Medical University. 29 Nakhichevanskiy per., Rostov-on-Don 344022 Russian Federation

Contact information: AAshot E. Amamchyan — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Physiology Department. E-mail: amashot2011@mail.ru ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6245-4987> SPIN: 8724-4158

For citation: Amamchyan AE, Kotsevalov AM. Effectiveness of functional electrical stimulation in neurorehabilitation of patients with traumatic brain injury. *Forcipe*. 2024;7(1):9–19.

Received: 06.02.2024

Revised: 18.03.2024

Accepted: 16.04.2024

ABSTRACT. Traumatic brain injury much more often than any other traumatic injury becomes a reason for locomotor diseases development that causes invalidization and disablement. According to modern estimates, about sixty-nine million people suffer from traumatic brain injury caused by accidents every year. Researches on possible methods of patient's rehabilitation, that are called upon to help coping with consequences of TBI, are becoming topical problem. Functional electrical stimulation (FES) is potentially perspective, relatively accessible and safe method. This method supposes programmed learning of lost skills using electrical stimulation of muscles and peripheral nerves, accompanied by contextual and conditional reinforcement of movement by the patient's strong-willed efforts. In order with modern presentations of neuroplasticity, the impact is called to provide activation of processes, that are necessary to restore motion abilities. However, there are no systematic data about the effectiveness of FES during TBI treatment. Consequently, there was analysis conducted in review. Analysis contains existing clinical researches, reviews and recommendations, made by russian and foreign specialists. Special attention was spared to mechanisms of FES influences on organism and to factors of treatment that are assisting during motion functions regeneration. According to results of the research, FES may have positive influence during treating patients, who are suffering traumatic damages of central nervous system. It's important to use this method in sum with traditional methods and only after passing standard rehabilitation course, moreover it's obligatory to run supplementary tests to reveal advantages of this method comparatively to others, that are widely used in medicine.

KEYWORDS: traumatic brain injury, functional electrical stimulation, neurorehabilitation

ВВЕДЕНИЕ

Черепно-мозговая травма (ЧМТ) является одной из критических проблем общественного здравоохранения и социально-экономической жизни во всем мире. Ежегодно более 69 млн человек сталкиваются с ЧМТ [1]. Частота встречаемости данной патологии неуклонно растет. Основными причинами возникновения ЧМТ являются, прежде всего, повреждения, полученные в результате дорожно-транспортных происшествий (авто-травма) и падений с высоты (кататравма) [2].

Краткий список патофизиологических последствий ЧМТ включает: нарушение регуляции мозгового кровотока и оксигенации головного мозга, нарушение гематоэнцефалического барьера, отек мозга, воспаление го-

ловного мозга, митохондриальную дисфункцию, окислительный и нитрозативный стресс, приводящие к гибели нервных клеток [3]. Неврологические повреждения часто затрагивают обширные участки лобной и теменной коры и/или подкорковых структур, таких как таламус и полосатое тело, вызывая сенсорные нарушения в контралатеральных конечностях, приводя к развитию инвалидности. При этом повреждения носят диффузный характер и оказывают влияние на изменение активности коры, связанной с движением конечностей. Однако и при очаговых повреждениях нарушение сенсорных сетей может вызвать перестройку межкортикальных и внутрикортикальных связей, что приводит к снижению возбудимости коры и потере мелкого моторного контроля [4]. Последствия

ЧМТ обладают высокой социальной значимостью, во многом определяя состояние здоровья населения, в связи с чем одной из важных задач здравоохранения на современном этапе является разработка и применение новых методик, направленных на реабилитацию пациентов, перенесших ЧМТ. Одним из актуальных направлений в нейрореабилитации является исследование возможности применения различных методов физиотерапии, направленных на активацию пластичности нервных центров [5]. Особую значимость при этом имеют методы нейростимуляции, такие как транскраниальная магнитная стимуляция [6], глубокая мозговая стимуляция [7], транскраниальная электрическая стимуляция [8], транслингвальная стимуляция [9]. Потенциально перспективным, но малоизученным методом остается функциональная электростимуляция (ФЭС).

ЦЕЛЬ

Целью настоящего обзора является обобщение и анализ накопленных сведений о применении ФЭС для лечения последствий ЧМТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для осуществления поставленной цели был проведен систематический поиск в базах данных PubMed, КиберЛенинка, eLIBRARY, MEDLINE, BMJKnowledge, Trip Medical Database, Up To Date, EBSCO, Medscape, Google Scholar. Поиск осуществляли по следующим ключевым словам и их сочетаниям: «функциональная электростимуляция», «черепно-мозговая травма», «последствия черепно-мозговой травмы», «черепно-мозговая травма статистика», «functional electrical stimulation», «traumatic brain injury», «traumatic brain injury sequelae».

ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕТОДЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

Суть метода ФЭС состоит в том, что его применяют в качестве способа восстановления движения не только отдельного органа, но и сложного локомоторного акта в целом. ФЭС включает в себя применение коротких электрических импульсов для искусственного создания мышечного сокращения при отсутствии произвольного мышечного контроля или для

усиления слабого произвольного мышечного сокращения. Электрические импульсы синхронизируют с волевым усилием пациента по осуществлению двигательного акта, позволяя генерировать функциональные движения [10].

Данное направление реабилитации возникло в начале 60-х годов XX века, став значительным шагом для мировой медицины. Метод функциональной электротерапии, получивший впоследствии название «ФЭС», был разработан и использован в 1961 году американским ученым В. Либерсоном и коллегами с целью восстановления ходьбы у пациента с гемиплегией [11]. В дальнейшем на основе метода В. Либерсона было разработано устройство для помощи в ходьбе пациентов со слабостью переднеберцовой мышцы [12].

Основоположником ФЭС в нашей стране является А.С. Витензон, который внес значимый вклад в исследование биомеханики локомоций человека как целостного моторного акта. Им была разработана методика фазовой электростимуляции мышц, при которой электрический импульс подают исключительно в фазы возбуждения и сокращения мышц. При этом возникает высокий уровень временной корреляции между воздействием и элементом двигательного акта, ослабленным в результате дефицита мышечной функции, что позволяет пациенту осуществлять функциональные движения без изменения паттернов мышечных сокращений [13].

Дальнейшие исследования позволили усовершенствовать метод, установить принципы безопасной нервно-мышечной стимуляции для наращивания силы в пораженных конечностях и увеличения диапазона их движений. Было установлено, что ФЭС оказывает влияние не только на мышцы, подвергаемые стимуляции, но и на центральную нервную систему и нейрогуморальные механизмы регуляции функций [14].

С момента появления ФЭС зарекомендовала себя в качестве надежного метода восстановления двигательных функций, поэтому на современном этапе ее используют во многих областях медицины. Большинство применений ФЭС ориентировано на пациентов с травмой спинного мозга [15]. Метод показал свою эффективность в реабилитации пациентов, страдающих церебральным параличом [16], рассеянным склерозом [17], восстановлении двигательной активности пациентов при нарушениях мозгового кровообращения [18].

Современные аппараты ФЭС претерпели ряд значительных усовершенствований по

сравнению со своими предшественниками. Они стали более компактными, повысилась надежность оборудования, были разработаны индивидуальные программы настроек для пациентов, усовершенствована форма импульса с целью большего соответствия физиологической электрической активности человеческого организма [19]. Активно идет разработка аппаратов с замкнутой схемой, которые позволяют центральной нервной системе получать обратную биологическую связь посредством электромиографии и электронейрографии для более тонкого контроля мышечных сокращений в условиях применения ФЭС [20].

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

Основным показанием к применению ФЭС является дефицит мышечной функции (ДМФ), выраженный патологическими элементами при локомоции. Возможными ограничениями к применению ФЭС могут стать плохая переносимость электрораздражений небольшой интенсивности, выраженная спастичность мышц, эпилептический синдром, фиксированные деформации суставов [21]. С целью рекрутирования моторных единиц с ДМФ применяют аппараты ФЭС различных конфигураций, отличающиеся количеством и расположением электродов. Наиболее распространенными в практике являются электростимуляционные аппараты, использующие поверхностные электроды, размещаемые на коже, — чрескожные системы. Существуют также имплантируемые системы. Поверхностные электроды наиболее удобны ввиду неинвазивности, простоты наложения и снятия. Тем не менее значительным недостатком данных систем является относительно низкая селективность стимуляции, возможность смещения электродов при движении конечностей. Имплантируемые системы обеспечивают большую избирательность, включая возможность стимуляции более глубоких мышц, однако применение инвазивных методов ограничено необходимостью хирургического вмешательства и риском заражения пациента [20].

Важной характеристикой системы ФЭС является форма импульсов электрического тока, определяемая амплитудой (мА), длительностью (мс), формой нарастания и частотой импульса (Гц). Данные показывают, что наибольшую пользу от ФЭС получают, когда мышцы тренируют по синергическому

принципу [22]. В соответствии с этим для системы ФЭС важно точно и синергически помогать функциональным задачам, поощрять усилия пользователя, обеспечить избирательность включения мышц в двигательный акт. Конечной целью выбора характеристик стимуляции служит достижение оптимального сокращения мышц при исключении боли и раздражения кожи. Известно, что двухфазная форма импульса квадратной или прямоугольной формы более эффективна для стимуляции нерва за счет мгновенного увеличения тока до максимального уровня [23]. Частота электрического импульса влияет на тип мышечного сокращения и уровень создаваемой силы [23, 24]. Более высокие частоты генерируют сильные сокращения, но быстрее вызывают утомление мышечных волокон и снижение сократительной силы [25]. Оптимальная система использует минимальную частоту стимула, способную вызвать плавный ответ. Силу мышечного сокращения можно также повысить за счет увеличения количества активированных двигательных единиц путем увеличения амплитуды и/или продолжительности импульса. Увеличение поступающего электрического заряда и создание большего электрического поля расширяет область активации, задействуя широкий комплекс моторных единиц. Уменьшение интервала между импульсами повышает возбудимость стимулируемых мышц [23].

Тем не менее конкретные параметры электростимуляции являются предметом обсуждения и варьируют не только между исследованиями, но и между отдельными участниками экспериментов [27–31].

ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОДЬБЫ У ПАЦИЕНТОВ С ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМОЙ

Ключевым аспектом лечения последствий перенесенной ЧМТ является восстановление кинематики утраченных или ослабленных движений, повышение их скорости, точности и диапазона, снижение энергозатрат на их осуществление, уменьшение спастичности, повышение уровня самостоятельности пациентов при выполнении повседневных задач [26].

Е. Ambrosini и соавт. (2011) было проведено слепое рандомизированное контролируемое исследование с участием 35 пациентов

с гемипарезом, вызванным ЧМТ или инсультом, 30 из которых были учтены в обсуждении результатов [27]. Был рассмотрен метод реабилитации — применение ФЭС при езде на стационарном велосипеде. В ходе исследования пациенты были разделены на две группы, одна из которых получала тренировки на велосипеде с применением ФЭС, другая — без применения электростимуляции (плацебо). По результатам 20 сеансов исследования были зарегистрированы значимые уменьшения нарушений и ограничений двигательной активности пациентов при ходьбе в соответствии со шкалой индекса моторики нижних конечностей [32]. Применение метода у испытуемой группы, получавшей электростимуляцию, позволило быстрее увеличить скорость ходьбы. Исследователями были сделаны выводы о решающей роли ФЭС в реабилитации пациентов с гемипарезом. Тем не менее стоит интерпретировать результаты данного клинического исследования с осторожностью, так как не было проведено регистрации различий между пациентами с диагнозом «ЧМТ» и «инсульт».

В исследовании de Sousa D.G. и соавт. (2016) был проведен анализ терапевтических эффектов, оказываемых на пациентов с ЧМТ, полученных в результате применения ФЭС на велосипеде [28]. Участникам экспериментальной группы была предложена индивидуализированная программа тренировок на велосипеде с применением ФЭС, которую проводили 5 раз в неделю в течение месяца. Динамическую регистрацию состояния пациентов проводили по трем пунктам шкалы функциональной независимости, каждый из которых оценивали по 7-балльной системе. Таким образом, максимальный результат составил 21 балл. Средняя разница между экспериментальной и контрольной группами по мобильности в результате исследования составила 0,3/21 балла, что было меньше установленной статистической значимости, оцененной в 3 балла. Средняя разница между группами по силе разгибателей коленного сустава пораженной нижней конечности в ходе исследования составила 7,5 Нм (95% доверительного интервала (ДИ) от –5,1 до 20,2), что не позволило подтвердить или опровергнуть целесообразность лечения. Спасительность подожженных сгибателей голеностопного сустава пораженной нижней конечности исследователи оценили по качеству мышечной реакции по шкале Тардье [33], при этом не удалось выявить статистически значимых различий

между группами. Совокупность полученных данных позволила исследователям сделать вывод о том, что езда на велосипеде с ФЭС в дополнение к обычному уходу не улучшают подвижность у людей при ЧМТ. Как можно заметить, полученные в 2016 году результаты противоречат результатам [28], полученным в исследовании 2011 года [27]. В отличие от предыдущего исследования, для оценки двигательной активности пациентов использовали комплекс показателей функциональной независимости, включающий в себя ходьбу, перемещение и подъем по лестнице. Отметим, что на конечные результаты могло оказать влияние наличие когнитивных нарушений у большинства обследуемых.

М. Ebrahimzadeh и соавт. (2021) применили метод ФЭС в сочетании с тренировкой на велосипеде и тренировкой перехода из положения сидя в положение стоя (sit to stand — STS) [29]. Пациентом был мужчина, за 2 года до исследования перенесший ЧМТ, которая привела к развитию правосторонней гемиплегии, афазии, свисанию правой стопы и нарушению координации верхних и нижних конечностей. В связи с тем, что применение метода осуществляли спустя значительный промежуток времени после травмы, полученные результаты представляют особый интерес, поскольку позволяют рассмотреть влияние ФЭС на пациента с долгосрочными последствиями ЧМТ. Пациенту был предложен курс физиотерапии, состоящий из двенадцати сеансов езды на стационарном велосипеде в сочетании с применением электростимуляции. Упражнения STS применяли в сочетании с ФЭС на четырехглавых мышцах обеих ног 3 раза в неделю в течение четырех недель. В ходе процедур постепенно изменяли параметры электростимуляции путем увеличения частоты, длительности, интенсивности импульса. После курса реабилитации было зарегистрировано улучшение активного тыльного сгибания голеностопного сустава и мышечной силы, скорости ходьбы и баланса. Полученные результаты согласуются с рядом проводимых на пациентах исследований, страдающих гемиплегией после инсульта [27, 34].

Неоднородность дизайнов и результатов приведенных исследований [27–29] не позволяет составить однозначное заключение о положительных эффектах применения ФЭС у пациентов с нарушениями двигательной активности нижней конечности при ЧМТ. Однако имеющиеся данные об эффективности метода, используемого в реабилитации пациентов

со схожими нарушениями функций при инсульте, позволяют предположить, что его использование увеличивает качество и реабилитационный прогноз после ЧМТ [20, 27, 34]. Авторы некоторых практических рекомендаций отмечают, что применение ФЭС совместно с традиционными методами реабилитации позволяет достичь значительной степени восстановления функций в более короткие сроки [38].

ИЗМЕНЕНИЕ МОТОРИКИ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

При ЧМТ существует риск развития функциональных нарушений активности верхних конечностей [26, 31]. Утрата способности совершать аккуратные изолированные движения делает пострадавших зависимыми от повседневных задач и препятствует осуществлению ими профессиональной деятельности. И поэтому особенно остро стоит вопрос не только о повышении силы мышечных сокращений и уменьшении спастичности, но и о восстановлении тонкого контроля при активации отдельных моторных единиц.

М. Milosevic и соавт. (2021) изучили изменение моторики верхних конечностей у пациента с ЧМТ после применения ФЭС [31]. У больного в анамнезе — легкие двигательные нарушения нижней и верхней правых конечностей. ФЭС проводили с помощью системы Comrex Motion (Швейцария) с использованием двухфазных и асимметричных импульсов. С целью оценки достигнутых результатов авторы использовали инструментальный тест рисования, направленный на выявление изменений в мелкой моторике пациента, и комплекс клинических исследований, включающий показатели функциональной независимости по шкале Фугл–Мейера и журнал двигательной активности (motor activity log — MAL) [36, 37]. В ходе тестов рисования были выявлены статистически значимые изменения в лучшую сторону при выполнении поставленных задач и тенденция к уменьшению количества ошибок, что свидетельствовало об эффективности применения ФЭС для восстановления мелкой моторики пациента. При помощи клинических тестов не было выявлено значимых изменений, однако это может быть связано с изначально высоким уровнем активности пациента, отмеченным авторами. Существен-

ным ограничением представленного исследования является малая выборка и отсутствие контрольной группы, получающей традиционные методы терапии. Тем не менее следует отметить, что важным аспектом при интерпретации результатов является изменение уровня кортикальной активности, регистрируемое в ходе исследования.

ИЗУЧЕНИЕ ОТДАЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПАТТЕРНАХ КОРТИКАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

В результате применения ФЭС для лечения различных неврологических нарушений регистрировали длительное сохранение достигнутых положительных эффектов после завершения программ реабилитации [15–18]. В этой связи перспективным направлением стало изучение влияния ФЭС на паттерны активации коры. Тем не менее сообщений об изменении сенсомоторной коры после применения ФЭС в реабилитации после ЧМТ относительно мало. Хотя некоторые исследования показали возможную эффективность метода для восстановления моторики после ЧМТ [30, 38], в иных исследованиях были получены противоречивые результаты [28].

В основе изменения паттернов кортикальной активности после травматического повреждения головного мозга лежит нейропластичность, основными принципами которой являются повторение, временное соответствие и контекстно-зависимое подкрепление во время выполнения двигательных задач [4]. Во время ФЭС происходит повторное обучение конкретным навыкам в соответствии с обозначенными принципами. Участников просят попытаться выполнить двигательное задание, в то время как терапевт обеспечивает подкрепление [10]. Таким образом, обучение необходимым навыкам с помощью ФЭС проводят на основании сенсомоторной интеграции, что может помочь в управлении пластичностью коры после ЧМТ.

М. Milosevic и соавт. (2021) провели исследование, целью которого являлось изучение обозначенного выше вопроса. Во время проведения курса тренировки мышц с применением ФЭС и после него у пациента, перенесшего ЧМТ, регистрировали активность корковой и кортикоспинальной возбудимости при помощи метода функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) [31]. Результаты краткосрочной оценки по-

казали снижение коркового периода молчания [39, 40]. Ранее было показано, что ФЭС может подавлять спинальную рефлекторную возбудимость [41]. В соответствии с результатами исследования было установлено, что электрическая стимуляция кожных нервов верхних конечностей укорачивает корковый период молчания, что предполагает участие сенсомоторной интеграции на корковом уровне [39, 41]. Аfferентная обратная связь от ФЭС активирует соматосенсорную кору, оказывая влияние на кортико-кортикальные связи [42].

Результаты долгосрочной оценки указывают на значительное облегчение кортико-спинальной проводимости после 12 недель ФЭС, которое сохраняется в течение не менее 12 недель при отсутствии какого-либо вмешательства. Наблюдали изменение наклона кривой ввода-вывода моторных вызванных потенциалов (МВП), сохраняющееся во время последующих наблюдений. Наклон кривой входа-выхода МВП отражает силу кортико-спинальных проекций на целевые мышцы и становится менее крутым при применении агониста ГАМК-А-рецептора, увеличивает свою крутизну при непрямом введении дофаминергических средств [40]. Это позволяет предположить возможный механизм усиления активности дофаминергических возбуждающих рецепторов и/или подавление ГАМК-эргических ингибирующих рецепторов, что оказывает растормаживающее влияние на поврежденный участок коры. Результаты карты МВП указывают на увеличение коркового представительства мышц руки в пределах первичной моторной коры после 12 недель ФЭС и во время последующего наблюдения. Это согласуется с данными предшествующих исследований, где было показано, что двухчасовая электрическая стимуляция нерва может привести к увеличению площади, на которой могут быть получены МВП [43]. Кортикальная реорганизация была дополнительно подтверждена данными функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), которые показали более выраженные реакции после 12 недель ФЭС по сравнению с исходными оценками при выполнении поставленных двигательных задач. Динамика корковых изменений, полученная с помощью фМРТ, соответствует результатам карты МВП.

Таким образом, долгосрочная повторяющаяся сенсомоторная интеграция во время тренировки верхних конечностей с использованием ФЭС для конкретных задач может вызвать реорганизацию коры. В частности, инте-

грация двигательных команд во время попытки произвольного движения и активация сенсомоторной сети посредством электростимуляции являются возможными механизмами долгосрочных корковых изменений. Интактные двигательные области, топологически примыкающие к поврежденному участку внутри первичной моторной коры и к областям за пределами моторной коры, могут взять на себя контроль над пораженными мышцами через внутрикорковые сети путем усиления синапсов Хебба [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в обзоре данные свидетельствуют о том, что использование функциональной электростимуляции может оказывать положительное воздействие на пациентов при травматическом повреждении головного мозга. Тем не менее применение данного метода в нейрореабилитации пациентов с ЧМТ остается малоизученным. Существующие на современном этапе исследования содержат противоречивые сведения и не позволяют однозначно оценить эффективность использования функциональной электростимуляции по сравнению с традиционными методами реабилитации. В то же время функциональная электростимуляция в соответствии с многочисленными результатами исследований, проведенных на пациентах с поражением центральной нервной системы, является безопасным методом лечения локомоторных нарушений. Несомненным преимуществом функциональной электростимуляции является возможность ее применения в рамках комплексной терапии, а также после проведения стандартного курса реабилитации. В перспективе данный метод может использоваться для восстановления определенного уровня утраченной двигательной активности, поскольку оказывает положительное влияние как на уменьшение спастичности и увеличение силы мышечных сокращений, так и на пластичность нервных центров, необходимую для реорганизации коркового контроля при осуществлении движений.

Мы надеемся, что в ближайшее время направление получит большее развитие, и новые клинические исследования позволят точнее оценить значимость функциональной электростимуляции для пациентов с ЧМТ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции,

проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

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

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Dewan M.C., Rattani A., Gupta S., Baticulon R.E., Hung Y.C., Punchak M., Agrawal A., Adeleye A.O., Shrimel M.G., Rubiano A.M., Rosenfeld J.V., Park K.B. Estimating the global incidence of traumatic brain injury. *J Neurosurg.* 2018;130(4):1080–1097. DOI: 10.3171/2017.10.JNS.17352.
2. Сабиров Д.М., Росстальная А.Л., Махмудов М.А. Эпидемиологические особенности черепно-мозгового травматизма. *Вестник экстренной медицины.* 2019;12(2):61–66.
3. Ahluwalia M., Gupta R.V., Wilson M., Munie S., Ahluwalia P., Vender J.R., Vale F.L., Dhandapani K.M., Vaibhav K. Revisiting Traumatic Brain Injury: From Molecular Mechanisms to Therapeutic Interventions. *Biomedicine.* 2020;8(10):389. DOI: 10.3390/biomedicine8100389.
4. Nudo R.J. Recovery after brain injury: mechanisms and principles. *Front Hum Neurosci.* 2013;7:887. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00887.
5. Амамчян А.Э., Гафиятуллина Г.Ш. Нейропластичность как основа двигательной реабилитации. *Медицинский вестник Юга России.* 2023;14(4):122–128. DOI: 10.21886/2219-8075-2023-14-4-122-128.
6. Chen J., Dong Y., Guo H., Zhang D. Efficacy of rTMS combined with cognitive training in TBI with cognition disorder: a systematic review and meta-analysis. *Neurol Sci.* 2024.
7. Kundu B., Brock A.A., Englot D.J., Butson C.R., Rolston J.D. Deep brain stimulation for the treatment of disorders of consciousness and cognition in traumatic brain injury patients: a review. *Neurosurg Focus.* 2018;45(2):E14.
8. Ren B., Kang J., Wang Y., Huang Y., Bai Y., Feng Z. Transcranial direct current stimulation promotes angiogenesis and improves neurological function via the OXA-TF-AKT/ERK signaling pathway in traumatic brain injury. *Aging (Albany NY).* 2024;16:6566–6587.
9. Tyler M., Skinner K., Prabhakaran V., Kaczmarek K., Danilov Y. Translingual Neurostimulation for the Treatment of Chronic Symptoms Due to Mild-to-Moderate Traumatic Brain Injury. *Arch Rehabil Res Clin Transl.* 2019;1(3-4):100026.
10. Popovic M.R., Popovic D.B., Keller T. Neuroprostheses for grasping. *Neurol Res.* 2002;24(5):443–52. DOI: 10.1179/016164102101200311.
11. Liberson W.T., Offner F.F. Method of muscular stimulation in human being to aid in walking. 1967.
12. Moe J.H., Post H.W. Functional electrical stimulation for ambulation in hemiplegia. *Lancet.* 1962;82:285–288.
13. Витензон А.С., Петрушанская К.А., Скворцов Д.В. Руководство по применению метода искусственной коррекции ходьбы и ритмических движений посредством программируемой электростимуляции мышц. М.: Научно-медицинская фирма МБН. 2005;300.
14. Chipchase L.S., Schabrun S.M., Hodges P.W. Peripheral electrical stimulation to induce cortical plasticity: a systematic review of stimulus parameters. *Clin Neurophysiol.* 2011;122(3):456–463. DOI: 10.1016/j.clinph.2010.07.025.
15. Савенкова А.А., Сарана А.М., Щербак С.Г., Герасименко Ю.П., Мошонкина Т.Р. Неинвазивная электрическая стимуляция спинного мозга в комплексной реабилитации больных со спинномозговой травмой. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры.* 2019;96(5):11–18. DOI: 10.17116/kurort20199605111.
16. Петрушанская К.А., Витензон А.С. Восстановительное лечение больных детским церебральным параличом посредством функциональной электростимуляции мышц при ходьбе. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2009;1:27–34.
17. Máté S., Soutter M., Liaros J., Hackett D., Barnett M., Singh M F., Fornusek C. The effects of hybrid functional electrical stimulation interval training on aerobic fitness and fatigue in people with advanced multiple sclerosis: An exploratory pilot training study. *Mult Scler Relat Disord.* 2024;83:105458. DOI: 10.1016/j.msard.2024.105458.
18. Гурьянова Е.А., Ковальчук В.В., Литвак Ф.Г., Тихоплав О.А. Функциональная электростимуляция при восстановлении ходьбы после инсульта. *Обзор научной литературы. Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* 2022;2(3):244–262.

19. Nussbaum E.L., Houghton P., Anthony J., Rennie S., Shay B.L., Hoens A.M. Neuromuscular Electrical Stimulation for Treatment of Muscle Impairment: Critical Review and Recommendations for Clinical Practice. *Physiother Can.* 2017;69(5):1–76. DOI: 10.3138/ptc.2015-88.
20. Gil-Castillo J., Alnajjar F., Koutsou A., Torricelli D., Moreno J.C. Advances in neuroprosthetic management of foot drop: a review. *J Neuroeng Rehabil.* 2020;17(1):46. DOI: 10.1186/s12984-020-00668-4.
21. Витензон А.С. От естественного к искусственному управлению локомоцией. М.: Т.М. Андреева; 2003.
22. Lynch C.L., Popovic M.R. Functional Electrical Stimulation. *IEEE Control Syst.* 2008;28:40–50.
23. Collins D.F. Central contributions to contractions evoked by tetanic neuromuscular electrical stimulation. *Exerc Sport Sci Rev.* 2007;35(3):102–9.
24. Robertson V., Ward A., Low J., Reed A. *Electrotherapy Explained: Principles and Practice.* Butterworth Heinemann; Edinburgh, Scotland: 2006.
25. Marquez-Chin C., Popovic M.R. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomed Eng Online.* 2020;19(1):34. DOI: 10.1186/s12938-020-00773-4.
26. Magnusson B.M., Ahrenby E., Stålnacke B.M. Symptoms and Disability after Mild Traumatic Brain Injury: A Five-Year Follow-up. *J Integr Neurosci.* 2024;23(2):45. DOI: 10.31083/j.jin2302045.
27. Ambrosini E., Ferrante S., Pedrocchi A., Ferrigno G., Molteni F. Cycling induced by electrical stimulation improves motor recovery in postacute hemiparetic patients: a randomized controlled trial. *Stroke.* 2011;42(4):1068–1073.
28. de Sousa D.G., Harvey L.A., Dorsch S., Leung J., Harris W. Functional electrical stimulation cycling does not improve mobility in people with acquired brain injury and its effects on strength are unclear: a randomised trial. *J Physiother.* 2016;62(4):203–208.
29. Ebrahimzadeh M., Nakhostin Ansari N., Hasson S., Shariat A., Afzali S.A. Effect of functional electrical stimulation combined with stationary cycling and sit to stand training on mobility and balance performance in a patient with traumatic brain injury: A case report. *Ann Med Surg (Lond).* 2021;72:103–122. DOI: 10.1016/j.amsu.2021.103122.
30. McCain K., Shearin S. A Clinical Framework for Functional Recovery in a Person With Chronic Traumatic Brain Injury: A Case Study. *J Neurol Phys Ther.* 2017;41(3):173–181. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000190.
31. Milosevic M., Nakanishi T., Sasaki A., Yamaguchi A., Nomura T., Popovic M.R., Nakazawa K. Cortical Re-organization After Traumatic Brain Injury Elicited Using Functional Electrical Stimulation Therapy: A Case Report. *Front Neurosci.* 2021;15:693861. DOI: 10.3389/fnins.2021.693861.
32. Cameron D., Bohannon R.W. Criterion validity of lower extremity Motricity Index scores. *Clin Rehabil.* 2000;14(2):208–11.
33. Mehrholz J., Wagner K., Meissner D., Grundmann K., Zange C., Koch R., Pohl M. Reliability of the Modified Tardieu Scale and the Modified Ashworth Scale in adult patients with severe brain injury: a comparison study. *Clinical rehabilitation.* 2005;19(7):751–759.
34. Lo H.C., Hsu Y.C., Hsueh Y.H., Yeh C.Y. Cycling exercise with functional electrical stimulation improves postural control in stroke patients. *Gait Posture.* 2012;35(3):506–10. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2011.11.017.
35. Granger C.V., Hamilton B.B. The Uniform Data System for Medical Rehabilitation Report of First Admissions for 1990. *Am J Phys Med Rehabil.* 1992;71(2):108–13.
36. Fugl-Meyer A.R. Post-stroke hemiplegia assessment of physical properties. *Scand J Rehabil Med Suppl.* 1980;7:85–93.
37. van der Lee J.H., Beckerman H., Knol D.L., de Vet H.C., Bouter L.M. Clinimetric properties of the motor activity log for the assessment of arm use in hemiparetic patients. *Stroke.* 2004;35(6):1410–4. DOI: 10.1161/01.STR.0000126900.24964.7e.
38. Oostra K., Van Laere M., Scheirlinck B. Use of electrical stimulation in brain-injured patients: a case report. *Brain Inj.* 1997;11(10):761–4. DOI: 10.1080/026990597123133.
39. Wassermann E., Epstein C., Ziemann U., Walsh V., Paus T., Lisanby S. *Oxford handbook of transcranial stimulation.* OUP Oxford. 2008.
40. Rotenberg A., Horvath J.C., Pascual-Leone A., Farzan F. “Single-pulse transcranial magnetic stimulation (TMS) protocols and outcome measures,” in *Transcranial Magnetic Stimulation*, eds (New York, NY: Springer New York). 2014:69–115.
41. Kawashima N., Popovic M.R., Zivanovic V. Effect of intensive functional electrical stimulation therapy on upper-limb motor recovery after stroke: case study of a patient with chronic stroke. *Physiother Can.* 2013;65(1):20–8. DOI: 10.3138/ptc.2011-36.
42. Hess A., Kunesch E., Classen J., Hoepfner J., Stefan K., Benecke R. Task-dependent modulation of inhibitory actions within the primary motor cortex. *Exp Brain Res.* 1999;124(3):321–30.
43. Ridding M.C., McKay D.R., Thompson P.D., Miles T.S. Changes in corticomotor representations induced by prolonged peripheral nerve stimulation in humans. *Clin Neurophysiol.* 2001;112(8):1461–9. DOI: 10.1016/s1388-2457(01)00592-2.

REFERENCES

1. Dewan M.C., Rattani A., Gupta S., Baticulon R.E., Hung Y.C., Punchak M., Agrawal A., Adeleye A.O., Shrimme M.G., Rubiano A.M., Rosenfeld J.V., Park K.B.

- Estimating the global incidence of traumatic brain injury. *J Neurosurg.* 2018;130(4):1080–1097. DOI: 10.3171/2017.10.JNS17352.
2. Sabirov D.M., Rosstal'naya A.L., Makhmudov M.A. Epidemiological features of traumatic brain injury. *Bulletin of emergency medicine.* 2019;12(2):61–66. (In Russian).
 3. Ahluwalia M., Gupta R.V., Wilson M., Munie S., Ahluwalia P., Vender J.R., Vale F.L., Dhandapani K.M., Vaibhav K. Revisiting Traumatic Brain Injury: From Molecular Mechanisms to Therapeutic Interventions. *Biomedicines.* 2020;8(10):389. DOI: 10.3390/biomedicines8100389.
 4. Nudo R.J. Recovery after brain injury: mechanisms and principles. *Front Hum Neurosci.* 2013;7:887. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00887.
 5. Amamchyan A.E., Gafiyatullina G.Sh. Neuroplasticity as the basis of motor rehabilitation. *Medical Herald of the South of Russia.* 2023;14(4):122–128. DOI: 10.21886/2219-8075-2023-14-4-122-128. (In Russian)
 6. Chen. J., Dong. Y., Guo H., Zhang D. Efficacy of rTMS combined with cognitive training in TBI with cognition disorder: a systematic review and meta-analysis. *Neurol Sci.* 2024.
 7. Kundu. B., Brock. A.A., Englot D.J., Butson C.R., Rolston J.D. Deep brain stimulation for the treatment of disorders of consciousness and cognition in traumatic brain injury patients: a review. *Neurosurg Focus.* 2018;45(2):E14.
 8. Ren. B., Kang. J., Wang Y., Huang Y., Bai Y., Feng Z. Transcranial direct current stimulation promotes angiogenesis and improves neurological function via the OXA-TF-AKT/ERK signaling pathway in traumatic brain injury. *Aging (Albany NY).* 2024;16:6566–6587.
 9. Tyler M., Skinner K., Prabhakaran V., Kaczmarek K., Danilov Y. Translingual Neurostimulation for the Treatment of Chronic Symptoms Due to Mild-to-Moderate Traumatic Brain Injury. *Arch Rehabil Res Clin Transl.* 2019;1(3-4):100026.
 10. Popovic M.R., Popovic D.B., Keller T. Neuroprostheses for grasping. *Neurol Res.* 2002;24(5):443–52. DOI: 10.1179/016164102101200311.
 11. Liberson W.T., Offner F.F. Method of muscular stimulation in human being to aid in walking. 1967.
 12. Moe J.H., Post H.W. Functional electrical stimulation for ambulation in hemiplegia. *Lancet.* 1962;82:285–288.
 13. Vitenzon A.S., Petrushanskaya K.A., Skvortsov D.V. Guidelines for the use of the method of artificial correction of walking and rhythmic movements through programmable electrical stimulation of muscles. Moscow: Scientific and medical company MBN. 2005;300. (In Russian).
 14. Chipchase L.S., Schabrun S.M., Hodges P.W. Peripheral electrical stimulation to induce cortical plasticity: a systematic review of stimulus parameters. *Clin Neurophysiol.* 2011;122(3):456–463. DOI: 10.1016/j.clinph.2010.07.025.
 15. Savenkova A.A., Sarana A.M., Shcherbak S.G., Gerasimenko Yu.P., Moshonkina T.R. Non-invasive electrical stimulation of the spinal cord in complex rehabilitation of patients with spinal cord injury. *Issues of balneology, physiotherapy and therapeutic physical culture.* 2019;96(5):11–18. DOI: 10.17116/kurort20199605111. (In Russian).
 16. Petrushanskaya K.A., Vitenzon A.S. Rehabilitation treatment of patients with cerebral palsy through functional electrical stimulation of muscles when walking. *Journal of Neurology and Psychiatry.* S.S. Korsakov. 2009;1:27–34. (In Russian).
 17. Máté S., Soutter M., Liaros J., Hackett D., Barnett M., Singh M F., Fornusek C. The effects of hybrid functional electrical stimulation interval training on aerobic fitness and fatigue in people with advanced multiple sclerosis: An exploratory pilot training study. *Mult Scler Relat Disord.* 2024;83:105458. DOI: 10.1016/j.msard.2024.105458.
 18. Guryanova E.A., Kovalchuk V.V., Tikhoplav O.A., Litvak F.G. Functional Electrical Stimulation for Restoration of Gait and Motor Recovery After a Stroke. *Review of Scientific Literature. Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2020;2(3):244–262. (In Russian).
 19. Nussbaum E.L., Houghton P., Anthony J., Rennie S., Shay B.L., Hoens A.M. Neuromuscular Electrical Stimulation for Treatment of Muscle Impairment: Critical Review and Recommendations for Clinical Practice. *Physiother Can.* 2017;69(5):1–76. DOI: 10.3138/ptc.2015-88.
 20. Gil-Castillo J., Alnajjar F., Koutsou A., Torricelli D., Moreno J.C. Advances in neuroprosthetic management of foot drop: a review. *J Neuroeng Rehabil.* 2020;17(1):46. DOI: 10.1186/s12984-020-00668-4.
 21. Vitenzon A.S. From natural to artificial control of locomotion. Moscow: T.M. Andreeva; 2003. (In Russian).
 22. Lynch C.L., Popovic M.R. Functional Electrical Stimulation. *IEEE Control Syst.* 2008;28:40–50.
 23. Collins D.F. Central contributions to contractions evoked by tetanic neuromuscular electrical stimulation. *Exerc Sport Sci Rev.* 2007;35(3):102–9.
 24. Robertson V., Ward A., Low J., Reed A. *Electrotherapy Explained: Principles and Practice.* Butterworth Heinemann; Edinburgh, Scotland: 2006.
 25. Marquez-Chin C., Popovic M.R. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomed Eng Online.* 2020;19(1):34. DOI: 10.1186/s12938-020-00773-4.
 26. Magnusson B.M., Ahrenby E., Stålnacke B.M. Symptoms and Disability after Mild Traumatic Brain Injury: A Five-Year Follow-up. *J Integr Neurosci.* 2024;23(2):45. DOI: 10.31083/j.jin2302045.
 27. Ambrosini E., Ferrante S., Pedrocchi A., Ferrigno G., Molteni F. Cycling induced by electrical stimula-

- tion improves motor recovery in postacute hemiparetic patients: a randomized controlled trial. *Stroke*. 2011;42(4):1068–1073.
28. de Sousa D.G., Harvey L.A., Dorsch S., Leung J., Harris W. Functional electrical stimulation cycling does not improve mobility in people with acquired brain injury and its effects on strength are unclear: a randomised trial. *J Physiother*. 2016;62(4):203–208.
 29. Ebrahimzadeh M., Nakhoshtin Ansari N., Hasson S., Shariat A., Afzali S.A. Effect of functional electrical stimulation combined with stationary cycling and sit to stand training on mobility and balance performance in a patient with traumatic brain injury: A case report. *Ann Med Surg (Lond)*. 2021;72:103–122. DOI: 10.1016/j.amsu.2021.103122.
 30. McCain K., Shearin S. A Clinical Framework for Functional Recovery in a Person With Chronic Traumatic Brain Injury: A Case Study. *J Neurol Phys Ther*. 2017;41(3):173–181. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000190.
 31. Milosevic M., Nakanishi T., Sasaki A., Yamaguchi A., Nomura T., Popovic M.R., Nakazawa K. Cortical Re-organization After Traumatic Brain Injury Elicited Using Functional Electrical Stimulation Therapy: A Case Report. *Front Neurosci*. 2021;15:693861. DOI: 10.3389/fnins.2021.693861.
 32. Cameron D., Bohannon R.W. Criterion validity of lower extremity Motricity Index scores. *Clin Rehabil*. 2000;14(2):208–11.
 33. Mehrholz J., Wagner K., Meissner D., Grundmann K., Zange C., Koch R., Pohl M. Reliability of the Modified Tardieu Scale and the Modified Ashworth Scale in adult patients with severe brain injury: a comparison study. *Clinical rehabilitation*. 2005;19(7):751–759.
 34. Lo H.C., Hsu Y.C., Hsueh Y.H., Yeh C.Y. Cycling exercise with functional electrical stimulation improves postural control in stroke patients. *Gait Posture*. 2012;35(3):506–10. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2011.11.017.
 35. Granger C.V., Hamilton B.B. The Uniform Data System for Medical Rehabilitation Report of First Admissions for 1990. *Am J Phys Med Rehabil*. 1992;71(2):108–13.
 36. Fugl-Meyer A.R. Post-stroke hemiplegia assessment of physical properties. *Scand J Rehabil Med Suppl*. 1980;7:85–93.
 37. van der Lee J.H., Beckerman H., Knol D.L., de Vet H.C., Bouter L.M. Clinimetric properties of the motor activity log for the assessment of arm use in hemiparetic patients. *Stroke*. 2004;35(6):1410–4. DOI: 10.1161/01.STR.0000126900.24964.7e.
 38. Oostra K., Van Laere M., Scheirlinck B. Use of electrical stimulation in brain-injured patients: a case report. *Brain Inj*. 1997;11(10):761–4. DOI: 10.1080/026990597123133.
 39. Wassermann E., Epstein C., Ziemann U., Walsh V., Paus T., Lisanby S. Oxford handbook of transcranial stimulation. OUP Oxford. 2008.
 40. Rotenberg A., Horvath J.C., Pascual-Leone A., Farzan F. “Single-pulse transcranial magnetic stimulation (TMS) protocols and outcome measures”, in *Transcranial Magnetic Stimulation*, eds (New York, NY: Springer New York). 2014:69–115.
 41. Kawashima N., Popovic M.R., Zivanovic V. Effect of intensive functional electrical stimulation therapy on upper-limb motor recovery after stroke: case study of a patient with chronic stroke. *Physiother Can*. 2013;65(1):20–8. DOI: 10.3138/ptc.2011-36.
 42. Hess A., Kunesch E., Classen J., Hoepfner J., Stefan K., Benecke R. Task-dependent modulation of inhibitory actions within the primary motor cortex. *Exp Brain Res*. 1999;124(3):321–30.
 43. Ridding M.C., McKay D.R., Thompson P.D., Miles T.S. Changes in corticomotor representations induced by prolonged peripheral nerve stimulation in humans. *Clin Neurophysiol*. 2001;112(8):1461–9. DOI: 10.1016/s1388-2457(01)00592-2.