

Функциональная электростимуляция в комбинации с фармакотерапией в нейрореабилитации при церебральных ишемиях и болевых синдромах

Е.О. Голдырев¹, Л.Р. Ахмадеева, д.м.н., проф.^{1, 2}, Э.М. Харисова^{1, 2}

Адрес для переписки: Лейла Ринатовна Ахмадеева, Leila_ufa@mail.ru

Для цитирования: Голдырев Е.О., Ахмадеева Л.Р., Харисова Э.М. Функциональная электростимуляция в комбинации с фармакотерапией в нейрореабилитации при церебральных ишемиях и болевых синдромах. Эффективная фармакотерапия. 2024; 20 (34): 44–49.

DOI 10.33978/2307-3586-2024-20-34-44-49

Функциональная электростимуляция (ФЭС) – перспективный метод лечения, позволяющий восстанавливать двигательные функции и уменьшать боль у пациентов с различными неврологическими заболеваниями. За последние годы ФЭС получила широкое распространение в клинической практике благодаря эффективности и безопасности, о чем свидетельствует рост числа публикаций в рецензируемых научных журналах (PubMed: functional electrical stimulation and clinical application; 1403 результата за десять лет). В статье проанализированы результаты современных международных исследований, указывающих на то, что ФЭС, направленная на повышение качества жизни и функциональных исходов, может быть рекомендована к применению в комплексной реабилитации пациентов с церебральными ишемическими поражениями и болевыми синдромами наряду с фармакотерапией.

Ключевые слова: функциональная электростимуляция, нейрореабилитация, биологическая обратная связь

Введение

Функциональная электростимуляция (ФЭС) – развивающийся метод лечения, который призван помочь улучшить качество жизни людей с различными неврологическими и скелетно-мышечными заболеваниями. ФЭС представляет собой метод физиотерапии, основанный на применении электрического тока для активации мышц и нервной системы [1]. В процессе ФЭС электроды накладываются на кожу вблизи целевых мышц, после чего через электроды подается импульсный электрический ток определенной амплитуды, частоты и длительности. Этот ток вызывает деполяризацию мембран мышечных волокон и генерацию аксональных потенциалов, что приводит к сокращению мышц [2, 3].

ФЭС может быть применена как изолированная методика, но чаще используется совместно с фармакотерапией в реабилитационном процессе для достижения различных целей, включая укрепление мышц, улучшение кровообращения, снятие боли и восстановление функциональной активности после травмы или хирургического вмешательства. Этот метод активации мышц может быть полезен пациентам с мышечной слабостью, параличом, болевым синдромом и нарушениями двигательных функций [4].

Механизм действия ФЭС заключается в активации моторных нервных волокон и, как следствие, сокращении соответствующих мышц. Это способствует улучшению мышечного тонуса, силы и выносливости, а также улучшению координации движений [5]. Кроме того, ФЭС улучшает кровообращение в области применения и снижает выраженность боли [6].

Нейрофизиологические основы функциональной электростимуляции

ФЭС основана на принципах нейрофизиологии, регулирующих работу нервно-мышечной системы. При ФЭС электрические стимулы искусственно активируют нервы, заставляя мышцы сокращаться. Перечислим ключевые этапы нейрофизиологических процессов, лежащих в основе ФЭС:

- ✓ стимуляция. Электрические импульсы, генерируемые стимулятором ФЭС, подаются на электроды, расположенные на коже над целевыми мышцами;
- ✓ нейрональная активация. Данные импульсы проходят через кожу и опосредованно через нервную ткань передают стимул на мотонейроны в спинном мозге;
- ✓ нейромышечная передача. Активированные мотонейроны посылают сигналы по двигательным нервам к целевым мышцам;

- ✓ сокращение мышц. Сигналы от мотонейронов вызывают деполяризацию мембран мышечных волокон, что приводит к их сокращению;
- ✓ движение. Сокращение целевых мышц приводит к видимому движению конечности или другой части тела [7, 8].

Эффективность ФЭС зависит от нескольких параметров, в том числе:

- ✓ места стимуляции: электроды должны быть расположены точно над целевыми мышцами;
- ✓ параметров стимуляции: сила, продолжительность и частота импульсов должны быть персонализированно подобраны для активации мышц пациента без причинения дискомфорта или повреждения тканей;
- ✓ анатомического состояния нервно-мышечной системы: ФЭС может быть менее эффективна при определенных группах заболеваний, патогенетической основой которых являются повреждения нервной либо мышечной ткани [9].

Принцип действия ФЭС основан на трех ключевых факторах:

- 1) нейропластичности. Повторная ФЭС может привести к нейропластическим изменениям в нервно-мышечной системе, улучшая и потенцируя эффективность стимуляции со временем;
- 2) модуляции функционирования мотонейронов. ФЭС может модулировать активность мотонейронов, влияя на их возбудимость и синхронизацию;
- 3) афферентном кортикальном влиянии. ФЭС может влиять на активность корковых областей мозга, связанных с движением, улучшая контроль и координацию движений [10].

Цель – проанализировать современные данные о ФЭС при различных заболеваниях на основании работ, опубликованных в ведущих международных научных журналах.

Материал и методы

Проанализированы исследования, опубликованные в российских и международных научных журналах, научных библиотеках (Scopus, PubMed, Web of Science, Google Scholar и др.). В статье представлены актуальные сведения о достижениях в области ФЭС, полученные в исследованиях последних лет. Особое внимание уделено новым методикам ФЭС, позволяющим повысить эффективность лечения и расширить спектр его применения в целях нейрореабилитации.

Данная статья представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся вопросами восстановительной медицины, неврологии, нейрохирургии, физиотерапии и реабилитации. Полученные сведения могут быть использованы для разработки новых протоколов лечения, оптимизации применения ФЭС в клинической практике и улучшения качества жизни пациентов.

Нейроадаптивная ФЭС

Принцип действия нейроадаптивной ФЭС (НФЭС) основан на доставке электрических импульсов к целевым мышцам и нервам через электроды, размещен-

ные на коже. Данные импульсы имитируют сигналы, аналогичные тем, которые генерируются в передних рогах спинного мозга для активации скелетной мускулатуры. НФЭС означает, что стимуляция адаптируется к потребностям конкретного человека. Это достигается с помощью электромиографии (регистрируемая информация используется для корректировки интенсивности, частоты, продолжительности и формы стимуляции, чтобы обеспечить оптимальную активацию целевых мышц), алгоритмов машинного обучения (позволяют автоматически подстраивать параметры стимуляции с учетом ответа на нейромышечную активность пациента в режиме реального времени), индивидуального подхода (помогает подобрать более точную и эффективную стимуляцию, оптимизированную под индивидуальные потребности пациента) [11].

L. Romera-De Francisco и соавт. [12] провели обзор десяти клинических исследований и одного систематического обзора с метаанализом, чтобы оценить эффективность ФЭС у пациентов после церебрального инсульта. Авторы проанализировали различные типы ФЭС, включая нейромышечную электростимуляцию, транскраниальную магнитную стимуляцию и глубокую стимуляцию головного мозга. В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

- ФЭС может улучшить качество жизни, двигательные навыки и походку пациентов с инсультом;
- НФЭС для восстановления руки после инсульта ассоциируется со значительным улучшением функции руки по сравнению с традиционной ФЭС;
- наилучшие результаты наблюдаются при использовании ФЭС с другими методами физиотерапии;
- ФЭС наиболее эффективна, если применяется к нескольким группам мышц и активируется движениями в конечностях.

Согласно Международной классификации болезней 11-го пересмотра, хроническая боль является отдельным заболеванием. H. Knotkova и соавт. [13] проанализировали 23 исследования, опубликованных в период 2000–2020 гг., где в общей сложности были описаны 500 клинических случаев пациентов с хронической болью различного генеза. Данные были изучены и систематизированы с использованием метаанализа для оценки влияния эффекта НФЭС на интенсивность боли и качество жизни пациентов. Показано, что НФЭС значительно эффективнее плацебо для уменьшения интенсивности боли (средняя разница – 1,38 единиц по визуальной аналоговой шкале боли) и улучшения качества жизни (средняя разница – 0,54 единицы по шкале SF-36). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что НФЭС – эффективный и безопасный метод лечения хронической боли различного происхождения и может быть использована в качестве альтернативы или дополнения к другим методам лечения, таким как лекарственная терапия и стандартная физиотерапия.

ФЭС с биологической обратной связью

Функциональная электростимуляция с биологической обратной связью (ФЭС-БОС) – это комплексный метод реабилитации, сочетающий в себе ФЭС и БОС

для восстановления функций у пациентов с различным двигательным дефицитом. БОС предоставляет пациенту информацию о его собственной физиологической активности в режиме реального времени. Данная информация обычно касается электрической активности мышц, оцениваемой с помощью электромиографии, в результате чего пациент наблюдает свою мышечную активность на мониторе или ощущает ее через вибрацию или звуковые сигналы. Преимущества БОС состоят в том, что при ее проведении визуализируется нейромышечная активность пациента в режиме реального времени, помогая ему контролировать и оптимизировать движения. Помимо этого БОС повышает приверженность пациента процессу реабилитации [14].

Эффективность БОС, ФЭС и комбинированной терапии БОС-ФЭС у пациентов с нарушениями ходьбы в результате развившейся после церебрального инсульта гемиплегии изучали D. Cozean и соавт. [15]. По дизайну исследование было рандомизированным контролируемым и включало четыре группы: контрольную, пациенты которой не получали никакого лечения, группу ФЭС, где больные получали ФЭС нижних конечностей, группу БОС (целевыми мышцами для работы с миоэлектрической активностью стали квадрицепсы и мышцы-разгибатели голеностопного сустава) и группу БОС-ФЭС, пациенты которой получали комбинированную терапию БОС-ФЭС. Продолжительность терапии в каждой группе составила 30 сеансов по 30 минут. Эффективность реабилитации оценивали до начала лечения, в конце курса и через шесть месяцев по окончании терапии. Для оценки использовались методы кинематического анализа походки (измерение углов сгибания колена и голеностопного сустава в фазе замаха), измерение скорости ходьбы с помощью секундомера, измерение продолжительности цикла ходьбы с помощью секундомера, определение симметрии фаз стойки (измерение продолжительности фаз стойки на каждой ноге с помощью секундомера). Статистический анализ полученных данных проводили методами ANOVA и с помощью парных t-тестов. Согласно результатам, группа БОС-ФЭС продемонстрировала значительное улучшение сгибания колена и голеностопного сустава в фазе замаха, скорости ходьбы, продолжительности цикла и симметрии фаз стойки. В группе, пациенты которой получали в качестве реабилитационного лечения только ФЭС, улучшились показатели сгибания колена и голеностопного сустава в фазе замаха и скорости ходьбы. В группе БОС значительно улучшились показатели сгибания колена в фазе замаха. В контрольной группе не выявлено значительных изменений по всем указанным параметрам. Время, прошедшее после инсульта, не влияло на результаты лечения ни в одной группе. Таким образом, комбинированная терапия БОС-ФЭС является наиболее эффективным методом лечения нарушений походки у пациентов с гемипарезом после перенесенного острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК). БОС и ФЭС, применяемые в качестве монотерапии, также показали положительные результаты.

L. Christiane и соавт. [16] в рандомизированном контролируемом исследовании (РКИ) отмечали

эффективность комбинированной терапии, включавшей ФЭС и БОС, в улучшении функции ходьбы и двигательной функции у пациентов, перенесших церебральный инсульт. В исследовании участвовали пациенты после ОНМК, у которых наблюдались двигательные нарушения нижних конечностей. В процессе реабилитации электростимуляция применялась к мышцам ног для их активации, БОС была организована так, что пациенты получали информацию в режиме реального времени о своей мышечной активности посредством ЭМГ-датчиков, что позволяло им корректировать усилия и улучшать контроль над движениями. Оценка результатов проводилась до и после восьмидневного курса терапии. Пациенты группы ФЭС-БОС продемонстрировали лучшие результаты по сравнению с пациентами контрольной группы: учитывались объективные показатели функции ходьбы (скорость ходьбы, длина шага, симметрия) и двигательные функции, оцененные клинически (сила мышц ног, амплитуда движений в голеностопном суставе, баланс).

Многоканальная ФЭС

Многоканальная функциональная электростимуляция (МФЭС) – метод лечения, который использует электрические импульсы для активации нескольких мышц или нервов одновременно. Ключевая особенность МФЭС заключается в том, что используется несколько независимых каналов стимуляции, что позволяет стимулировать определенную группу мышц одномоментно, имитируя естественные паттерны движения. Таким образом, МФЭС позволяет активировать несколько мышц, что обеспечивает более координированные и естественные движения [17].

В РКИ M. van Bloemendaal и соавт. [18] оценивали влияние десятидневной программы тренировки ходьбы с использованием многоканальной МФЭС на восстановление симметрии и пространственно-временных параметров походки у пациентов, перенесших церебральный инсульт. В исследовании приняли участие 40 пациентов с дефицитом ходьбы, которые поступили в отделение реабилитации спустя 31 день после установленного диагноза ОНМК. Пациенты случайным образом были разделены на две равные группы. Пациентов первой группы лечили с использованием МФЭС-ассистированных тренировок ходьбы, пациентов второй – классическими тренировками ходьбы. МФЭС-ассистированная тренировка включала в себя применение МФЭС к мышцам голени и стопы во время ходьбы. Занятия проводились по 30 минут каждый рабочий день в течение десяти недель. Показатели оценивали на исходном уровне, спустя две недели и по истечении трех месяцев после завершения курса процедур. Основным показателем результативности было соотношение симметрии длины шага, которое представляет собой отношение длины шага пораженной конечности к длине шага здоровой конечности. Результаты показали, что МФЭС-ассистированная тренировка способствует значительному улучшению соотношения симметрии длины шага по сравнению с контрольной группой ($p < 0,01$). Значительных различий между группами

в отношении других показателей, таких как скорость ходьбы, длина шага и время двойной опоры, не выявлено. Исследователи также провели анализ подгрупп, чтобы изучить влияние МФЭС-ассистированной тренировки на пациентов с различной степенью тяжести пареза. Результаты показали, что МФЭС-ассистированная тренировка более эффективна для улучшения соотношения симметрии длины шага у пациентов с более тяжелым парезом. Выводы данного исследования свидетельствуют о том, что МФЭС-ассистированная тренировка эффективна в улучшении симметрии походки у пациентов с инсультом. МФЭС-ассистированная тренировка может быть особенно полезна пациентам с более выраженной мышечной слабостью.

В исследовании Y. Hou и L. Yang [19] изучали влияние комбинированной МФЭС и ранней реабилитационной тренировки (РРТ) на функциональные исходы, качество жизни и психоэмоциональное состояние пациентов с гемиплегией после церебрального инсульта. В исследовании приняли участие 60 пациентов с гемиплегией после перенесенного инсульта, которые были рандомизированы на две группы. В первой группе применяли многоканальную ФЭС нижних конечностей в сочетании с РРТ; во второй – только РРТ. Продолжительность курсового лечения в обеих группах составила четыре недели. Для оценки функциональных исходов использовали NIHSS (National Institutes of Health Stroke Scale), шкала оценки шестиминутной ходьбы и шкала оценки равновесия Берга. Качество жизни оценивали с помощью опросника SF-36, психоэмоциональное состояние – с помощью шкалы оценки тревожности Гамильтона и шкалы оценки депрессии Бека. В группе ФЭС + РРТ по сравнению с группой РРТ объективно отмечалось значительное улучшение по NIHSS ($p < 0,05$), увеличение дистанции, пройденной за шесть минут ($p < 0,05$), улучшение показателей равновесия ($p < 0,05$), показателей качества жизни по всем субшкалам опросника SF-36 ($p < 0,05$), выраженное снижение уровня тревожности ($p < 0,05$) и депрессии ($p < 0,05$). Результаты данного исследования показали, что МФЭС в сочетании с РРТ является эффективным методом лечения, приводящим к существенному улучшению функциональных исходов, качества жизни и психоэмоционального состояния пациентов с гемиплегией после инсульта.

Инвазивная ФЭС

Инвазивная функциональная электростимуляция (ИФЭС) применяется, когда другие методы неэффективны. В отличие от традиционных методов ИФЭС использует электроды, вживляемые в нервы или мышцы. Это позволяет обеспечить более точную и эффективную стимуляцию, а также стимулировать более глубокие мышцы, недоступные для стимуляции с поверхности кожи.

Существует два основных типа ИФЭС:

- 1) эпидуральная стимуляция спинного мозга, при которой электроды вживляются в пространство между спинным мозгом и позвоночником;
- 2) периферическая нервная стимуляция, включающая вживление электродов непосредственно в нервы [20].

F. Berenpas и соавт. [21] провели исследование с участием 13 пациентов с парезом стопы, перенесших церебральный инсульт. Пациентам была имплантирована система электростимуляции в малоберцовую мышцу. Участники исследования выполняли задания на ходьбу со случайно расположенными целями на беговой дорожке. Дополнительно давались задания на слуховую стимуляцию с целью отвлечения внимания. Пациенты выполняли каждое задание с включенной и выключенной электростимуляцией. Без электростимуляции больным разрешалось использовать ортез на голеностопном суставе. Оценивалось отклонение постановки стопы относительно целевых точек. Результаты показали, что ошибки во время ходьбы при совершении движений в медиальном и латеральном направлениях были меньше при включенной электростимуляции по сравнению с выключенной ($\Delta = 1,0$ см; $p = 0,011$). В переднезаднем направлении не обнаружено существенных различий. При этом точность выполнения заданий не менялась при включенном/выключенном звуковом сигнале. Исследование показало, что ИФЭС улучшает точность размещения стопы в медиолатеральном направлении при выполнении задачи.

Роботизированная ФЭС

Роботизированная функциональная электростимуляция (РФЭС) использует электроды, интегрированные с роботизированными системами, обеспечивающими биомеханическую поддержку, помогая пациентам совершить движения, которые им трудно выполнить самостоятельно. Ключевое преимущество роботизированных систем заключается в том, что они позволяют создавать индивидуальные программы реабилитации, максимально учитывающие потребности каждого пациента, что повышает мотивацию больных к занятиям и в конечном итоге положительно сказывается на процессе реабилитации.

Выделяют следующие типы РФЭС:

- экзоскелетные системы: роботизированный экзоскелет размещается на теле пациента, используются моторы и передачи для движения конечностей в соответствии с запрограммированными траекториями;
- роботизированные тренажеры: пациент взаимодействует с роботизированными тренажерами, которые оказывают сопротивление или помощь движениям в соответствии с заложенными параметрами [22].

В РКИ М.Т. Artero Prado Dantas и соавт. [23] участвовали 42 пациента (средний возраст – 62 года) с постинсультными нарушениями ходьбы [23]. Пациенты получали три сеанса терапии в неделю на роботизированном тренажере Lokomat с применением ФЭС мышц ног. Пациенты контрольной группы проходили стандартную реабилитационную терапию по три сеанса в неделю в течение восьми недель. Проводились следующие оценки: тест шестиминутной ходьбы, скорость ходьбы, длина шага, симметрия ходьбы; качество жизни – опросник качества жизни SF-36 и опросник Stroke Impact Scale-36 (SIS-36). Сбор данных проводился до начала вмешательства, после четырех недель и через восемь недель после завершения курса терапии.

У пациентов группы РФЭС значительно улучшились все показатели функции ходьбы по сравнению с пациентами контрольной группы ($p < 0,05$) на всех этапах оценки. Статистический анализ проводился с использованием t -теста для независимых выборок и теста Манна – Уитни, уровень значимости $p < 0,05$. Данное РКИ продемонстрировало, что роботизированная ходьба с функциональной электростимуляцией является эффективным методом реабилитации пациентов, перенесших инсульт. Терапия РФЭС приводила к значительному улучшению функции ходьбы и качества жизни по сравнению со стандартной реабилитационной терапией.

У.-Н. Вае и соавт. [24] исследовали влияние роботизированной тренировки ходьбы в сочетании с функциональной электростимуляцией на восстановление локомоторной функции у пациентов после инсульта. В исследовании приняли участие 40 пациентов с инсультом, которые были разделены на две группы: основную, или группу роботизированной тренировки ходьбы с ФЭС ($n = 20$), и контрольную ($n = 20$). Пациенты группы роботизированной тренировки ходьбы с ФЭС получали 30-минутные сеансы тренировки пять дней в неделю в течение шести недель. Сеансы тренировок включали в себя ходьбу по роботизированной беговой дорожке с использованием ФЭС для стимуляции мышц-сгибателей стопы. Пациенты контрольной группы получали классическую физиотерапию. Группа роботизированной тренировки с ФЭС показала значительное увеличение скорости ходьбы по сравнению с исходным уровнем ($p < 0,01$) и группой контроля ($p < 0,05$). Длина шага увеличилась в основной группе по сравнению с исходным уровнем ($p < 0,01$) и группой контроля ($p < 0,05$). Время двойной опоры уменьшилось в группе исследования по сравнению с исходным уровнем ($p < 0,01$) и по сравнению с пациентами контрольной группы ($p < 0,05$). По шкале оценки баланса Берга (BBS) наблюдалось увеличение показателей BBS по сравнению с исходным уровнем ($p < 0,01$) в экспериментальной группе, а также при сравнении с показателями группы контроля ($p < 0,05$). Результаты данного исследования свидетельствуют о том, что роботизированная тренировка ходьбы в сочетании с ФЭС эффективна в улучшении параметров ходьбы у пациентов, перенесших церебральный инсульт. Роботизированная

тренировка ходьбы может помочь улучшить локомоторную функцию путем предоставления пациентам повторяющихся, интенсивных и целенаправленных тренировок ходьбы. ФЭС в свою очередь улучшает локомоторную функцию за счет стимуляции паретичных мышц у пациентов, которые получают реабилитационное лечение после инсульта.

Обсуждение

Результаты анализа современной мировой литературы показали, что ФЭС может быть эффективным методом реабилитации у пациентов с различными неврологическими состояниями, включая церебральные ишемии, в том числе после инсультов (качество жизни после которых нами изучается в течение многих лет [25]), спинальные травмы, рассеянный склероз, детский церебральный паралич, болезнь Паркинсона, хронические болевые синдромы. ФЭС имеет ряд преимуществ, таких как неинвазивность, безопасность, эффективность, доступность и универсальность использования. Однако существуют и определенные ограничения, например наличие специализированного дорогостоящего оборудования, обучение специалистов, индивидуальная вариативность и необходимость в постоянном применении, поскольку эффект сохраняется только при регулярном использовании. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию параметров стимуляции, расширение области применения ФЭС, изучение долгосрочных эффектов и повышение доступности метода. Решение данных проблем является предметом активных исследований и разработок [26, 27].

Заключение

Функциональная электростимуляция является ценным инструментом в арсенале методов нейрореабилитации, хорошо дополняя фармакотерапию в комплексном лечении пациентов с церебральными ишемиками, болевыми синдромами и другими неврологическими состояниями. Она имеет большой потенциал для улучшения качества жизни при различных неврологических и скелетно-мышечных заболеваниях. Нейрофизиологические основы ФЭС продолжают изучаться, ведутся исследования для оптимизации режимов и методов стимуляции и достижения лучших результатов. *

Литература

1. Moineau B., Marquez-Chin C., Alizadeh-Meghrizi M., et al. Garments for functional electrical stimulation: design and proofs of concept. *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.* 2019; 6: 205566831985434.
2. Kilgore K.L., Hoyen H.A., Bryden A.M., et al. An implanted upper-extremity neuroprosthesis using myoelectric control. *J. Hand Surg. Am.* 2008; 33 (4): 539–550.
3. Ojha R., George J., Chandy B.R., et al. Neuromodulation by surface electrical stimulation of peripheral nerves for reduction of detrusor overactivity in patients with spinal cord injury: a pilot study. *J. Spinal Cord Med.* 2015; 38 (2): 207–213.
4. Wildenberg J.C., Tyler M.E., Danilov Y.P., et al. Electrical tongue stimulation normalizes activity within the motion-sensitive brain network in balance-impaired subjects as revealed by group independent component analysis. *Brain Connect.* 2011; 1 (3): 255–265.
5. Inanici F., Samejima S., Gad P., et al. Transcutaneous electrical spinal stimulation promotes long-term recovery of upper extremity function in chronic tetraplegia. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2018; 26 (6): 1272–1278.
6. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Moshonkina T., et al. Transcutaneous electrical spinal-cord stimulation in humans. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 2015; 58 (4): 225–231.

7. Gildenberg P.L. History of electrical neuromodulation for chronic pain: table 1. *Pain Med.* 2006; 7: S7–S13.
8. Glenn W.W.L., Phelps M.L. Diaphragm pacing by electrical stimulation of the phrenic nerve. *Neurosurgery.* 1985; 17 (6): 974–984.
9. Wu G.A., Lombardo L., Triolo R.J., et al. The effects of combined trunk and gluteal neuromuscular electrical stimulation on posture and tissue health in spinal cord injury. *PM R.* 2013; 5 (8): 688–696.
10. Sabut S.K., Sikdar C., Kumar R., et al. Functional electrical stimulation of dorsiflexor muscle: effects on dorsiflexor strength, plantarflexor spasticity, and motor recovery in stroke patients. *NeuroRehabilitation.* 2011; 29 (4): 393–400.
11. Enoka R.M., Amiridis I.G., Duchateau J. Electrical stimulation of muscle: electrophysiology and rehabilitation. *Physiology (Bethesda).* 2020; 35 (1): 40–56.
12. Romera-De Francisco L., Jiménez-Del Barrio S. Effectiveness of functional electrical stimulation in stroke patients: a systematic review. *Rev. Neurol.* 2016; 63 (3): 109–111.
13. Knotkova H., Hamani C., Sivanesan E., et al. Neuromodulation for chronic pain. *Lancet.* 2021; 397 (10289): 2111–2124.
14. Bowman T., Gervasoni E., Arienti C., et al. Wearable devices for biofeedback rehabilitation: a systematic review and meta-analysis to design application rules and estimate the effectiveness on balance and gait outcomes in neurological diseases. *Sensors (Basel).* 2021; 21 (10): 3444.
15. Cozean C.D., Pease W.S., Hubbell S.L. Biofeedback and functional electric stimulation in stroke rehabilitation. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 1988; 69 (6): 401–405.
16. Prado-Medeiros C.L., Sousa C.O., Souza A.S., et al. Effects of the addition of functional electrical stimulation to ground level gait training with body weight support after chronic stroke. *Braz. J. Phys. Ther.* 2011; 15 (6).
17. Kapadia N.M., Zivanovic V., Furlan J., et al. Functional electrical stimulation therapy for grasping in traumatic incomplete spinal cord injury: randomized control trial. *Artif. Organs.* 2011; 35 (3): 212–216.
18. Van Bloemendaal M., Bus S.A., de Boer C.E., et al. Gait training assisted by multi-channel functional electrical stimulation early after stroke: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials.* 2016; 17 (1): 477.
19. Hou Y., Yang L. Effective analysis of multichannel functional electrical stimulation plus early rehabilitation training for hemiplegic patients after stroke. *Evid. Based Complement. Alternat. Med.* 2022; 2022: 6061652.
20. Kang G.E., Frederick R., Nunley B., et al. The effect of implanted functional electrical stimulation on gait performance in stroke survivors: a systematic review. *Sensors (Basel).* 2021; 21 (24): 8323.
21. Berenpas F., Geurts A., Keijsers N., et al. Benefits of implanted peroneal functional electrical stimulation for continual gait adaptations in people with 'drop foot' due to chronic stroke. *Hum. Mov. Sci.* 2022; 83: 102953.
22. Proulx C.E., Beaulac M., David M., et al. Review of the effects of soft robotic gloves for activity-based rehabilitation in individuals with reduced hand function and manual dexterity following a neurological event. *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.* 2020; 7: 205566832091813.
23. Artero Prado Dantas M.T., Gonçalves Luiz Fernani D.C., de Carvalho A.C., et al. Gait training with functional electrical stimulation improves mobility in people post-stroke. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2023; 20 (9): 5728.
24. Bae Y-H., Ko Y.J., Chang W.H., et al. Effects of robot-assisted gait training combined with functional electrical stimulation on recovery of locomotor mobility in chronic stroke patients: a randomized controlled trial. *J. Phys. Ther. Sci.* 2014; 26 (12): 1949–1953.
25. Ахмадеева Л.Р., Абдрашитов Т.М., Самигуллина Г.Д. и др. От чего зависит качество жизни после инсульта. *Российский семейный врач.* 2004; 8 (4): 26–29.
26. Jovanovic L.I., Kapadia N., Zivanovic V., et al. Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study. *Spinal Cord Ser. Cases.* 2021; 7 (1): 24.
27. Osuagwu B.C.A., Wallace L., Fraser M., et al. Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: a randomized pilot study. *J. Neural Eng.* 2016; 13 (6): 065002.

Functional Electrical Stimulation Combined with Pharmacotherapy for Neurorehabilitation in Patients with Cerebral Ischemia and Pain

Ye.O. Goldyrev¹, L.R. Akhmadeeva, PhD, Prof.^{1,2}, E.M. Kharisova^{1,2}

¹ *Bashkir State Medical University*

² *Clinical Hospital 'Russian Railroads Medicine', Ufa*

Contact person: Leila R. Akhmadeeva, Leila_ufa@mail.ru

Functional electrical stimulation (FES) is a promising method of management that allows restoring motor functions in patients with various neurological diseases. In recent years, FES is widely used in clinical practice due to its effectiveness and safety, as evidenced by the growing number of publications in peer-reviewed scientific journals (PubMed: functional electrical stimulation and clinical application; 1403 results over 10 years). The paper discusses the results of modern international studies indicating that FES can be recommended for use in the complex rehabilitation of patients with cerebral ischemic lesions and pain syndromes along with pharmacotherapy, improving the quality of life and functional outcomes.

Keywords: functional electrical stimulation, neurorehabilitation, biofeedback