

DOI: <http://doi.org/10.17816/0869-2106-2021-27-3-299-312>

Обзорная статья

# Эффективность применения технологии функциональной электростимуляции при нарушении походки у больных с церебральным параличом

Е.Г. Гурьянова<sup>1</sup>, Н.В. Чебаненко<sup>2</sup>, Ф.Г. Литвак<sup>3</sup>, В.П. Зыков<sup>2</sup><sup>1</sup> Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Российская Федерация;<sup>2</sup> Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Российская Федерация;<sup>3</sup> Университет им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль

Церебральный паралич — группа стабильных нарушений развития моторики и поддержания позы, ведущих к двигательным дефектам, обусловленным непрогрессирующим повреждением и/или аномалией развивающегося головного мозга у плода или новорожденного ребенка. Слабость и спастичность мышц ног, связанные с церебральным параличом, ограничивают диапазон движений в голеностопном суставе и отрицательно влияют на двигательную способность ребенка. В статье приведен обзор научных исследований по инновационной методике функциональной электростимуляции в ходьбе у детей с церебральным параличом. Выполнен поиск информации в базах данных Scopus, Web of Science, MedLine, The Cochrane Library, PubMed, Pedro, Scholar, eLibrary, CyberLeninka. Оценка эффективности восстановительного лечения движения с использованием функциональных электростимуляторов проводилась с использованием биомеханических и нейрофизиологических методов доказательной медицины. При абилитации детей с использованием таких электростимуляционных методик, как функциональная электростимуляция, имеет место существенное восстановление ходьбы, улучшение дорсифлексии, нормализация паттерна походки, повышается устойчивость при ходьбе, уменьшается количество падений и необходимость в средствах дополнительной опоры. Обсуждается влияние функциональной электростимуляции на нормализацию скорости ходьбы, кинематику и симметричность походки, способность преодолевать препятствия, а также на диапазон движений голеностопного сустава и клиренс стопы во время ходьбы. Кроме того, рассматривается влияние функциональной электростимуляции на снижение энергозатрат у пациента при ходьбе, на нормализацию мышечного тонуса, уменьшение риска падений и повышение уверенности и комфорта при ходьбе. В рамках данного анализа также обсуждается скорость адаптации и переносимость пациентами аппаратов функциональной электростимуляции, приводится сравнительная характеристика функциональной электростимуляции с применением голеностопных ортезов.

**Выводы.** Технологии функциональной электростимуляции в динамике движения много лет помогают в реабилитации неврологических пациентов после инсульта и рассеянного склероза, и только вопрос времени, когда данные технологии также станут стандартом лечения детей с церебральным параличом в программах абилитации.

**Ключевые слова:** обзор; функциональная электростимуляция, ФЭС, церебральный паралич, нарушение походки, абилитация детей, восстановление двигательных функций, восстановление ходьбы.

## Как цитировать:

Гурьянова Е.Г., Чебаненко Н.В., Литвак Ф.Г., Зыков В.П. Эффективность применения технологии функциональной электростимуляции при нарушении походки у больных с церебральным параличом // Российский медицинский журнал. 2021. Т. 27, № 3. С. 299–312.

DOI: <http://doi.org/10.17816/0869-2106-2021-27-3-299-312>

DOI: <http://doi.org/10.17816/0869-2106-2021-27-3-299-312>

Review Article

# Efficiency of using the technology of functional electrical stimulation in gait disorder in patients with cerebral palsy

Evgeniya A. Guryanova<sup>1</sup>, Natalya V. Chebanenko<sup>2</sup>, Felix G. Litvak<sup>3</sup>, Valery P. Zykov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute for Advanced Medical Studies, Cheboksary, Russia;

<sup>2</sup> Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia;

<sup>3</sup> Ben-Gurion University of the Negev, Be'er Sheva, Israel

**BACKGROUND:** Cerebral palsy is a group of developmental disorders affecting motor skills and postural maintenance, leading to motion defects due to non-progressive damage and/or a developing brain anomaly in the fetus or the newborn child. Leg muscle weakness and spasticity associated with cerebral palsy limit the range of motion in the ankle joint and negatively affect the child's motor ability. This article reviews scientific studies on an innovative method of functional electrical stimulation of walking in children with cerebral palsy. We searched for information in the Scopus, Web of Science, Medline, The Cochrane Library, PubMed, Pedro, Scholar, eLibrary, and CyberLeninka databases. The efficiency of remedial treatment of motion using functional electrical stimulators was assessed using biomechanical and neurophysiological methods of evidence-based medicine. When children are rehabilitated using electrical stimulation techniques such as functional electrical stimulation, the gait is restored significantly, dorsiflexion is improved, the gait pattern is normalized, stability when walking is increased, the number of falls is decreased, and the need for additional support is reduced. The effect of functional electrical stimulation on the normalization of walking speed, gait kinematics and symmetry, the ability to overcome obstacles, and the range of motion of the ankle joint and foot clearance during walking are discussed. In addition, the work analyzes the effect of functional electrical stimulation on reducing the patient's energy consumption when walking, normalizing muscle tone, decreasing the risk of falls, and increasing confidence and comfort when walking. As part of this analysis, the speed of adaptation and patient tolerance of the devices for functional electrical stimulation are also discussed. A comparative characteristic of functional electrical stimulation using ankle joint orthoses is provided.

**CONCLUSIONS:** For many years, movement dynamics have used functional electrical stimulation technologies to rehabilitate neurological patients after stroke and multiple sclerosis. It is only a matter of time before these technologies also become the standard treatment for children with cerebral palsy in rehabilitation programs.

**Keywords:** review; functional electrical stimulation, FES, cerebral palsy, gait disorder, rehabilitation of children, restoration of motor functions, restoration of gait.

## To cite this article:

Guryanova EA, Chebanenko NV, Litvak FG, Zykov VP. Efficiency of using the technology of functional electrical stimulation in gait disorder in patients with cerebral palsy. *Rossiiskii meditsinskii zhurnal (Medical Journal of the Russian Federation, Russian Journal)*. 2021;27(3):299–312.

DOI: <http://doi.org/10.17816/0869-2106-2021-27-3-299-312>

Received 06.05.2021

Accepted 12.05.2021

Published 01.10.2021

Церебральный паралич (ЦП) — распространенное неврологическое заболеваний нервной системы в детском возрасте. Несмотря на успехи современной медицины, совершенствование методов родовспоможения и выхаживания новорожденных, частота развития ЦП остается примерно одинаковой и составляет 1,5–3,6 случая на 1000 живых новорожденных [1]. Скелетно-мышечные нарушения и функциональные двигательные нарушения прогрессируют с возрастом и способствуют повышению уровня инвалидизации.

Из всех форм ЦП спастические формы встречаются в 75–80% случаев, им сопутствует мышечная слабость, укорочение мышц, нарушение моторного контроля, нарушение контроля за удержанием позы и движением. Патологический стереотип походки затрудняет произвольные движения, формирует вторичные ортопедические осложнения, обуславливает контрактуры и приводит к подвывихам тазобедренных суставов у детей.

Церебральный паралич — группа стабильных нарушений развития моторики и поддержания позы, ведущих к двигательным дефектам, обусловленным непрогрессирующим повреждением и/или аномалией развивающегося головного мозга у плода или новорожденного ребёнка. При ЦП двигательная патология часто сочетается с нарушением сенсорных систем (наиболее часто — зрения и слуха), когнитивными дисфункциями, нарушениями речи и развития ребенка, симптоматической эпилепсией, вегетативными расстройствами, вторичными ортопедическими проблемами и др. [2].

Задачей настоящего обзора является обобщение опубликованных в научной литературе сведений о применении инновационной методики функциональной электростимуляции у детей, а также анализ опыта, накопленного в мировых медицинских системах по данной проблеме. ФЭС в движении является эффективным методом коррекции двигательных нарушений разной этиологии и применяется, как правило, при наличии у детей с ЦП функционально ослабленных мышц и незрелости нейронных локомоторных связей. Функциональная электрическая стимуляция при ходьбе является одним из способов искусственной коррекции двигательных стереотипов, сочетающей современные подходы к физиотерапии, в которых используется способ восстановления не отдельного органа, а сложного двигательного локомоторного акта [3, 4].

Для осуществления поставленных задач выполнен поиск информации в базах данных Scopus, Web of Science, MedLine, The Cochrane Library, PubMed, Pedro, Scholar, eLibrary, CyberLeninka. Проводился поиск и анализ рандомизированных исследований, контролируемых испытаний, когортных исследований и исследований клинических случаев за 1990–2021 год, в которых исследовалась ходьба с электростимуляторами (динамическими электронными ортезами) ФЭС при ЦП.

## Основные аспекты функциональной электрической стимуляции в абилитации детей

Слабость и спастичность мышц, связанные с ЦП, ограничивают диапазон движений суставов и отрицательно влияют на двигательную функцию. Голенисто-стопный сустав поражен практически у всех пациентов с ЦП. Недостаточное тыльное сгибание голенисто-стопного сустава во время переноса и опускания стопы, а также чрезмерное подошвенное сгибание могут вызвать нестабильность при опоре и ходьбе, что приводит к повышенному риску падения. Большинству детей с ЦП для профилактики контрактур рекомендуют статические ортезы голенисто-стопного сустава. Но, как показывает практика, любые статические ортезы в значительной степени ограничивают необходимые движения в суставе и усугубляют мышечную слабость и атрофию, что со временем приводит к еще большей потере моторной функции. Вдобавок многие дети, особенно подростки, избегают использования голенисто-стопных статических ортезов из-за дискомфорта и опасений испортить отношения со сверстниками. Все нарушения активного мышечного сокращения, а также асимметричная кинематика походки и компенсаторные стратегии приводят к снижению качества и эффективности ходьбы, а также к увеличению риска падения.

В последние годы как в российской, так и в мировой практике используется новый метод лечения с помощью разработанных устройств функциональной электростимуляции (динамических электронных ортезов) — функциональная электрическая стимуляция (ФЭС). Эти устройства вызывают активное тыльное сгибание стопы во время фазы переноса ноги за счет электростимуляции малоберцового нерва и активации передней большеберцовой мышцы. Компактные устройства ФЭС, активно стимулируя мышцы, обладают теоретическими и практическими преимуществами перед статическими голенисто-стопными ортезами. Кроме того, современные функциональные электростимуляторы более эстетичны в применении.

Большинство исследований устройств ФЭС проводилось на взрослой популяции у лиц с диагнозами «инсульт» и «рассеянный склероз». Их результаты показали улучшение лабораторных и функциональных показателей походки [5, 6]. Помимо прямого ортопедического эффекта от ФЭС непосредственно во время использования устройства, отдельные исследования также указывают на долгосрочный терапевтический эффект («эффект переноса»), который, как предполагалось, возникает через облегчение нейронной пластичности за счет увеличения силы афферентной обратной связи ЦНС. Пока не до конца ясно, как долго может продлиться этот терапевтический эффект на самом деле [7].

Применение устройств ФЭС можно начать как вариант лечения детей с ЦП в стационаре, а затем продолжить

на третьем этапе абилитации в амбулаторных условиях. Российских исследований по ФЭС применительно к детям крайне мало. Зарубежные исследования показывают благоприятные результаты по биомеханике ходьбы, с улучшением параметров кинематики голеностопного сустава, таких как угол тыльного сгибания при поднятии ноги и начальном контакте с опорой.

При решении вопроса о целесообразности использования аппаратов ФЭС у пациентов с ЦП следует оценивать риск возможных осложнений, учитывать состояние кожных покровов и подкожной жировой клетчатки. Обычно манжета не натирает кожу ребенка и не приводит к развитию трофических расстройств даже при длительном ношении аппаратов ФЭС. Противопоказания к применению ФЭС для коррекции походки стандартные, присущие любому виду электротерапии. Одно из распространенных препятствий к назначению ФЭС при ЦП — симптоматическая эпилепсия. Перед тем как использовать функциональный электростимулятор, необходимо получить разрешение от врача и информированное согласие от родителей или законных представителей ребенка.

Необходимо отметить, что настройка электростимулятора и подбор параметров стимуляции (ширина, чистота и амплитуда импульса) производится индивидуально для каждого ребенка (врачом, физическим терапевтом или специалистом по ортезированию). На поиск оптимального местоположения датчика, настройку импульса и синхронизацию с паттерном походки пациента обычно требуется от 15 до 30 минут в зависимости от сложности клинического случая. Стратегии настройки у разных аппаратов ФЭС зависят от того какая технология и какой триггерный датчик используется для запуска стимула (электронейромиографическая (ЭМГ) триггерная стимуляция, контактный датчик давления под стопой, акселерометр, гироскоп и т. д.).

В настоящее время, в мировой практике наиболее распространенным является аппарат WalkAide (Innovative Neurotronics, США) — это компактный медицинский электростимулятор с запатентованной системой датчиков, который прикрепляется к формованной манжете, расположенной чуть ниже колена и обеспечивает контролируемое тыльное сгибание стопы во время ходьбы. Датчики контролируют время задержки сигнала и продолжительность стимуляции во время фазы переноса и опоры ноги, а также адаптируются к скорости ходьбы и вариативности шага пациента.

### **Патофизиологические основы двигательного стереотипа у больных с церебральным параличом**

Формирование устойчивого к различным корректирующим воздействиям неоптимального двигательного стереотипа у больных ЦП обусловлено нарушением деятельности тоногенных структур мозга и отсутствием

своевременной редукции элементарных врожденных двигательных программ в постнатальном онтогенезе [8].

Патологические мышечные взаимодействия, функционирующие на основе персистирующих врожденных тонических рефлексов (лабиринтный тонический, симметричный и асимметричный шейные тонические рефлекс), и нарушения функциональной системы антигравитации препятствуют созреванию выпрямительных реакций головы и туловища (лабиринтный установочный, цепные шейные установочные рефлекс) и в дальнейшем искажают программу развития навыков стояния и ходьбы [9]. Сложность многоуровневых нарушений деятельности центральной нервной системы, отсутствие возможности оказывать воздействие на причину заболевания в резидуальной стадии, слабость формирования следовых образов движений обуславливают необходимость упорной длительной комплексной коррекции патологии нервно-мышечного аппарата при ЦП [10].

В ряде работ, посвященных восстановительному лечению больных спастическими формами ЦП детей и подростков, показана эффективность интегративных методов, корригирующих целостные произвольные двигательные программы и обучающих локомоции, таких как динамическая проприоцептивная коррекция с применением технических средств аксиального нагружения [9, 11], метод опорной пневмостимуляции и проприоцептивного моделирования ходьбы [12, 13] и функциональная электростимуляция (ФЭС) мышц во время ходьбы. Оба метода объединяет принцип неинвазивного воздействия на периферический нервно-мышечный аппарат, адресованного центральным структурам нервной системы и корригирующего деятельность всей вертикали управления произвольной двигательной активностью [14].

### **Исторические основы метода функциональной электрической стимуляции для коррекции патологической походки пациентов с церебральным параличом**

Первое применение функциональной электрической стимуляции для коррекции движения голеностопного сустава при гемиплегической свисающей стопе (hemiplegic drop foot) было зарегистрировано в 1961 году W.T. Liberson и соавт. [15]. W.T. Liberson впервые предложил использовать электротерапию в нейро-ортопедических целях для изменения биомеханики походки неврологических пациентов. W.T. Liberson первым применил функциональную электрическую стимуляцию малоберцового нерва во время локомоции человека. Впоследствии на основе этого изобретения был разработан аппарат для помощи в ходьбе пациентам со слабостью передней большеберцовой мышцы. Дальнейшие исследования по ФЭС помогли создать принципы безопасности нервно-мышечной стимуляции, способствующей наращиванию силы в пораженных мышцах и увеличению

диапазона активных движений в голеностопном суставе паретичной конечности.

В России одним из основоположников метода ФЭС при ходьбе стал Анатолий Самойлович Витензон, который исследовал биомеханику ходьбы человека как единый целостный моторный акт, состоящий из движений мышц голени, стопы, бедра, таза, позвоночника и верхних конечностей. Метод искусственной коррекции движения А.С. Витензона основан на исключительно фазовой электростимуляции мышц, т. е. осуществляется в фазы возбуждения и сокращения мышц. ФЭС не изменяет программу мышечных сокращений в период локомоторного акта, а лишь усиливает те ее элементы, которые оказались ослабленными в результате дефицита мышечной функции. По мнению ученого, цель ФЭС состоит в том, чтобы, во-первых, восстановить или по крайней мере улучшить биомеханику ходьбы и функциональное состояние мышц; во-вторых, внести определенную коррекцию в работу локомоторных центров. Программа и интенсивность электростимуляции ФЭС должны быть комфортными для пациента и минимально достаточными для получения коррекционного эффекта и поддержания приближенного к физиологическому двигательному стереотипу ходьбы [4].

Результаты восстановительного лечения больных ЦП методом ФЭС, проанализированные в работах А.С. Витензона и К.А. Петрушанской, свидетельствуют о том, что под влиянием 20-дневного курса электростимуляционной тренировки в ходьбе улучшается функциональное состояние мышц и частично нормализуется биомеханическая и иннервационная программа локомоции [4].

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на биомеханику ходьбы**

В настоящее время опубликовано достаточно много обзоров и метаанализов, посвященных потенциальной пользе использования электростимуляции во время ходьбы у детей с ЦП. Количество научных данных, подтверждающих эффективность функциональной электростимуляции (ФЭС) для улучшения походки у детей с ЦП, продолжает расти.

Результаты исследований с использованием ФЭС для активации функций дорсифлексоров стопы во время ходьбы демонстрируют улучшение качества походки, кинематики и симметрии ходьбы, увеличение скорости походки, мышечной силы, двигательного контроля и снижения спастичности. Применение ФЭС во время фазы переноса ноги напрямую влияет на эффективность походки [16]. Применение ФЭС к малоберцовому нерву для инициации дорсифлексии голеностопного сустава в конце фазы опоры стопы должно быть сбалансировано со способностью ребенка отталкиваться от опоры [17]. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что эффективное отталкивание от опоры сохраняется при использовании ФЭС [17, 18]. Основываясь

на результатах многочисленных исследований, ФЭС применительно к перонеальному нерву может быть эффективным вариантом лечения парезов у детей с ЦП.

Клинические результаты исследований, проведенных за рубежом, демонстрируют полную поддержку применения ФЭС для активации функций дорсифлексоров голеностопного сустава у детей со свисающей стопой (foot drop). Исследования показали, что ФЭС для тыльного сгибания стопы при ЦП приводит к значительному улучшению скорости походки, увеличению силы и диапазона движения в голеностопном суставе. Вместе с тем улучшаются кинематика и симметрия походки, биомеханические параметры паттерна шага, переносимость стимуляции со временем, произвольного двигательного контроля, происходит нарастание мышечной силы, а также отмечается уменьшение отвисания стопы и пальцев, уменьшение спастичности и энергозатрат на ходьбу [16–19]. D.L. Damiano и соавт. (2013) предоставили убедительные доказательства увеличения пластичности мышц, толщины передней большеберцовой мышцы и улучшения контроля над голеностопным суставом при использовании аппаратов ФЭС у больных ЦП [18].

В соответствии с руководством Британского института здоровья и клинических испытаний (NICE) от 2009 года, собранных доказательств о безопасности и эффективности ФЭС применительно к активации функции дорсифлексоров при центральных парезах и параличах достаточно для применения этой методики в медицинской практике. M. Van der Linden сообщает о пяти проведенных европейских исследованиях с участием детей, которые полностью обосновывают использование ФЭС для восстановительного лечения голеностопного сустава у детей со свисающей стопой [21].

Согласно систематическому обзору превентивных и терапевтических программ вмешательства для детей с ЦП (2020), существует несколько дополнительных видов вмешательства, которые могут усилить положительный эффект двигательных тренировок. Это электростимуляция, гидротерапия, кинезиотейпирование, транскраниальная стимуляция головного мозга и адаптированные игры в режиме виртуальной реальности. Эти виды вмешательства требуют дальнейших исследований, так как дети считают игровое вмешательство удовлетворяющим и нормализующим. С точки зрения комфорта дети предпочитали электростимуляцию над применением статического голеностопного ортеза [22]. Кроме того, дети с большим интересом и терпением относятся к тейпированию, чем к традиционным механическим статическим ортезам, которые часто вызывают дискомфорт и неудовлетворенность внешним видом [23, 24].

Целью исследования A. Fatal-Valvski (2017), проведенного в Тель-Авиве, было определить, улучшает ли использование устройства ФЭС (WalkAide, Innovative Neurotronics, США) суточную моторную функцию и параметры биомеханики походки у детей со спастической

гемиплегической или диплегической формами ЦП, а также понять, почему пациенты предпочитают использовать ФЭС вместо голеностопного статического ортеза [25].

Кроме того, требовалось определить клинические и биомеханические параметры, которые могут предсказать благоприятный ответ от пациента на использование устройства ФЭС. Устройство ФЭС (WalkAide) использовали 22 ребенка с гемиплегическим или асимметричным диплегическим ЦП в клинике и дома в течение 4 мес: 1-й месяц с целью оптимальной настройки и 3 мес ежедневного использования устройства. Для оценки эффективности использовались тест 6-минутной ходьбы, измерение общей моторной функции (GMFM), тест на время вверх и вниз по лестнице (TUDS), ходьба по пандусу, с устройством ФЭС и без него, тест на анализ походки с устройством ФЭС и без него. Родители заполняли анкеты о частоте падений. В результате был продемонстрирован улучшенный клиренс и баланс при ходьбе даже после того, как ФЭС была отключена, а также было зафиксировано меньше падений при использовании ФЭС. Такие параметры как диапазон движения голеностопного сустава, уровень спастичности и мышечная сила не показали статистически значимых изменений. Исследователи пришли к выводу, что значительный ортопедический эффект от ФЭС зависел от изначального диапазона движения в голеностопном суставе [25].

В.И. Доценко и соавт. (2012) проанализировали клиническую эффективность восстановительного лечения методом ФЭС пациентов с ЦП. После курса лечения с ФЭС у больных со спастической формой ЦП изменились в сторону нормализации координаторные взаимоотношения мышц, о чем свидетельствует уменьшение коэффициента реципрокности в мышцах нижних конечностей. Достаточно глубокие перестройки механизмов двигательного управления, стойкие и клинически значимые эффекты ФЭС подтверждают патогенетическую целесообразность метода нейромоторного перевоспитания пациентов с заболеваниями центральной нервной системы и оправдывают включение ФЭС в комплексное восстановительное лечение [26].

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на дорсифлексию**

Изучение диапазона движений в голеностопном суставе и клиренса стопы (расстояние между опорой и стопой) во время ходьбы, а также способности преодоления препятствий стало предметом нескольких исследований. Применение системы анализа движения для измерения дорсифлексии во время переноса ноги показало значительное увеличение как максимального, так и среднего значения дорсифлексии [17, 18, 27, 28].

Коллектив А. Prosser, L. A. Curatalo и соавт. (2012) обнаружил улучшение кинематики голеностопного сустава, наблюдаемое при использовании ФЭС [17].

Как на медленной, так и на быстрой скорости ходьбы наблюдалось значительное увеличение дорсифлексии с ФЭС при начальном контакте с опорой ( $p=0,017$  для медленной и  $0,032$  для быстрой), максимального значения дорсифлексии ( $p=0,015$  для обеих скоростей) и среднего значения дорсифлексии ( $p=0,011$  для медленной и  $0,014$  для быстрой) во время переноса ноги по сравнению с состоянием без ФЭС [17]. Отмечено сохранение некоторых движений подошвенного сгибания (плантарфлексия) с помощью ФЭС. Наблюдался значительный сдвиг в сторону улучшения дорсифлексии во всех временных точках, как при медленной, так и при быстрой скорости, при применении ФЭС по сравнению с состоянием без ФЭС ( $p=0,033$  и  $0,038$  соответственно) [17].

В исследовании S.R. Pierce и соавт. (2004) было проведено сравнение прямых эффектов поверхностной функциональной электрической стимуляции (S-ФЭС) и чрескожной функциональной электрической стимуляции (P-ФЭС) передней большеберцовой мышцы, применяемых во время ходьбы у детей с гемиплегической формой ЦП. Результаты показали, что как P-ФЭС, так и S-ФЭС увеличивали тыльное сгибание при начальном контакте, максимальное тыльное сгибание при переносе и среднее тыльное сгибание при переносе по сравнению с ходьбой без стимуляции. Увеличение тыльного сгибания было больше при использовании P-ФЭС по сравнению с S-ФЭС [28].

Исследование S.R. Pierce и соавт. (2004) продемонстрировало увеличение угла тыльного сгибания голеностопного сустава при начальном контакте с опорой, максимальное тыльное сгибание во время фазы переноса, среднее тыльное сгибание во время переноса и работу голеностопного сустава во время раннего положения с одной лишь стимуляцией передней большеберцовой мышцы и комбинированной стимуляцией икроножной и передней большеберцовой мышцы. Авторы предполагают, что чрескожная внутримышечная ФЭС эффективна для улучшения параметров кинематики и кинетики голеностопного сустава у детей с гемиплегической формой ЦП [10].

Согласно данным D.L. Damiano и соавт. (2013), при использовании устройства ФЭС (WalkAide), стимулирующего общий малоберцовый нерв для тыльного сгибания голеностопного сустава, 12 из 14 участников показали улучшенную максимальную дорсифлексию при переносе ноги с включенным устройством ФЭС по сравнению с состоянием без ФЭС. Кроме того, площадь анатомического поперечного сечения и толщина мышц увеличились во время вмешательства по сравнению с исходным уровнем и с контралатеральной стороной и сохранялись при последующем наблюдении. Прирост мышц сохранился при последующем наблюдении [18].

В исследовании N. Postans и соавт. (2005) изучалось влияние функциональной электростимуляции (ФЭС), применяемой во время ходьбы, на походку детей со

спастическим церебральным параличом (ЦП). Восемь детей (5 мальчиков, 3 девочки; средний возраст 13 лет 2 мес) с диагнозом диплегический ( $n=6$ ) или гемиплегический ( $n=2$ ) спастический ЦП завершили исследование. Влияние ФЭС на походку отслеживали с помощью трехмерного анализа движений. У детей были зарегистрированы последовательные клинически значимые улучшения кинематических данных, включая постановку стопы на опору во время применения ФЭС [30]. Улучшено положение голеностопного сустава и стопы во время фазы опоры, а также пережат с пятки на носок [31, 32].

Об улучшении параметров походки и ходьбы говорит исследование S. Durham и соавт. (2004), в котором изучалась эффективность использования ФЭС для улучшения походки детей с церебральным параличом. Исследовалось два подхода к стимуляции: стимуляция дорсифлексоров (передняя большеберцовая мышца) в движении, и стимуляция подошвенных сгибателей (икр) в опоре. Стимуляция малоберцового нерва и сокращение передней большеберцовой мышцы приводят к улучшению походки, улучшается как положение голеностопного сустава, так и пережат с пятки на носок. В обоих случаях дети хорошо перенесли электростимуляцию [11].

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на качество походки, кинематику, симметрию и скорость ходьбы**

Некоторые исследования также продемонстрировали тенденцию к увеличению скорости и ритма ходьбы [1–3, 10, 19]. Целью исследования В. Danino и соавт. (2013) была оценка ФЭС как метода улучшения походки у пациентов с гемиплегией, используя в качестве критериев три различных метода оценки походки. Кинематические, кинетические и временные пространственные данные были определены с использованием анализа движения и суммированы с помощью трех методов оценки: оценки профиля походки (Gait Profile Score, GPS), индекса отклонения походки (Gait Deviation Index, GDI) и индекса походки Gillette (Gillette Gait Index, GGI). При сравнении походки с электростимуляцией и без нее все методы оценки показали улучшение. Значительно улучшились показатели GPS и GDI паретичной ноги:  $12,23-10,23^\circ$  ( $p=0,017$ ) и  $72,36-78,08^\circ$  ( $p=0,002$ ) соответственно. GGI пораженной ноги улучшился, но без статистической значимости:  $168,88-131,64^\circ$  ( $p=0,221$ ). Общий GPS ног и GPS, GDI и GGI здоровой ноги показали улучшение без статистической значимости. В течение года использования устройства ФЭС все пациенты выражали высокую степень удовлетворения и продолжали его применение. Таким образом, функциональная электрическая стимуляция тыльного сгибания улучшает походку у пациентов с гемиплегией, в том числе ее скорость и ритм [32].

М.К. Carroll и соавт. (2014) оценивали влияние ФЭС в качестве вспомогательного устройства на биомеханические характеристики коленного сустава. Для оценки

результатов использовали тесты на падение с помощью маятника (Pendulum Knee Drop Test), модифицированную шкалу Эшворта (Modified Ashworth Scale, MAS) и скорость походки на исходном уровне через один и три месяца после использования ФЭС. Результаты продемонстрировали ортопедические и терапевтические преимущества после внедрения ФЭС. Авторы отметили, что для окончательного обобщения результатов, полученных в этом исследовании, необходимы дальнейшие исследования с еще большим количеством участников [34].

Значительная часть исследований, изучающих использование ФЭС для улучшения походки у детей с ЦП, демонстрирует эффективность систем ФЭС за счет изменения кинематики и симметрии походки. Функциональные характеристики переноса ноги ребенка и постановка стопы при первоначальном контакте с опорой являются важными критериями, поскольку такого рода нарушения могут привести к нестабильности и увеличению числа падений. Использование ФЭС для активации функций дорсифлексоров во время переноса ноги напрямую влияет на эффективность походки, о чем свидетельствует снижение подволакивания стопы и количества падений [16, 17]. D. Pool и соавт. (2014) сообщают о значительном снижении частоты падений ( $p=0,03$ ) и волочения стопы и пальцев ног при ходьбе ( $p=0,02$ ) при использовании ФЭС в течение как минимум 6 нед [16, 17].

В ряде работ было продемонстрировано общее улучшение качества походки, выраженное в увеличении симметрии длины шага и уменьшении отклонений походки от нормативных значений у детей с ЦП [33]. В исследовании, проведенном М.К. Carroll и соавт. (2014), было отмечено заметное увеличение длины шага и уменьшение ширины шага после использования аппарата Walkaide [34]. S.M. El-Shamy и соавт. (2016) обнаружили статистически значимое увеличение длины шага, улучшение темпа ходьбы, увеличение скорости, фазы опоры в цикле ходьбы, и сделали вывод, что функциональная электростимуляция WalkAide является эффективным инструментом для улучшения паттерна походки и расхода энергии на ходьбу у детей с гемиплегической формой церебрального паралича [35].

Улучшение качества походки может также способствовать функциональной мобильности детей, о чем свидетельствуют результаты нескольких исследований, демонстрирующих тенденцию к увеличению скорости и нормализации ритма ходьбы [2, 7, 10]. Исследование J.R. Meilahn и соавт. (2013) с небольшим числом испытуемых показало, что скорость ходьбы увеличилась на 50% [19].

В систематическом обзоре I. Moll и соавт. (2017) представлены ограниченные доказательства уменьшения частоты падений. По шести базам данных был проведен поиск исследований, в которых применялись вмешательства для пациентов в возрасте до 20 лет. Результаты были классифицированы в соответствии

с Международной классификацией функционирования, инвалидности и здоровья (International Classification of Functioning, Disability and Health, ICF). Только пять статей (три исследования) имели уровень доказательности от I до III. На уровне участия и активности ICF имеются ограниченные данные о снижении самооценки частоты перетягивания пальцев ног и падений. На уровне структуры и функций тела ICF есть четкие доказательства (I–III), что ФЭС увеличивал (активный) угол тыльного сгибания голеностопного сустава, силу и улучшал избирательный контроль моторики, баланс и кинематику походки, но снижал скорость ходьбы. Побочные эффекты включали раздражение кожи и проблемы с переносимостью стимуляции [22]. Авторы делают вывод, что данных, подтверждающих функциональный выигрыш ФЭС по активности и уровню участия, недостаточно. Однако данные указывают на роль ФЭС как более эффективной альтернативы статическому ортезу у детей со спастическими формами ЦП.

### Влияние функциональной электрической стимуляции на силу мышц, моторный контроль и энергозатраты

Известно, что паретичные мышцы детей с гемиплегической формой церебрального паралича обладают меньшим мышечным объемом, площадью поперечного сечения, толщиной и длиной мышечного брюшка по сравнению с непаретичными конечностями и со здоровыми сверстниками [2]. Два исследования: одно рандомизированное контрольное [2] и одно с единым предметом дизайна [9] — рассматривали анатомическую площадь поперечного сечения и толщину передней большеберцовой мышцы в качестве показателей улучшения функций мышц при ФЭС. С помощью ультразвуковых измерений было показано значительное увеличение площади поперечного сечения передней большеберцовой мышцы и мышечной массы в периоды от 1 мес до 3 мес использования ФЭС в качестве электронного нейроортеза. Так, исследование I. Karabay и соавт. (2014) показало, что площадь поперечного сечения передней большеберцовой (ТА) и икроножной (ГС) мышц были выше в группе получающих нейромышечную электростимуляцию, чем в группе традиционной физиотерапии ( $p=0,001$  и  $p=0,003$  соответственно) [2]. Также в исследованиях I. Karabay и соавт. (2014) было показано увеличение толщины мышцы: значения площади поперечного сечения передней большеберцовой мышцы ( $238,7\pm 61,5$  против  $282,0\pm 67,1$  мм) и икроножной мышцы ( $207,9\pm 48,0$  против  $229,5\pm 52,4$  мм) ( $p<0,001$  и  $p=0,008$  соответственно) были увеличены после лечения в группе с использованием ФЭС. Значения площади поперечного сечения передней большеберцовой мышцы уменьшились ( $257,3\pm 64,7$  против  $239,7\pm 60,0$  мм) после лечения в группе традиционной терапии ( $p<0,001$ ) [20]. В работе D.L. Damiano и соавт. исследовалось более

долгосрочное (в течение 3 мес) влияние ФЭС на изменение площади поперечного сечения и на мышечную массу по истечении 3 мес использования ФЭС. Было обнаружено, что улучшение обоих показателей поддерживалось в течение последующих 3 мес после интервенции [18].

По данным A. Seifart (2010), некоторые испытуемые показали увеличение мышечной силы после использования ФЭС несмотря на то, что эти показатели не достигли статистической значимости. Существует предположение, что ФЭС может улучшить изометрические показатели силы дорсифлексора в голеностопе в нейтральном положении. По-видимому, для этого требуется более длительный период использования ФЭС, чтобы достигнутое увеличение силы могло закрепиться и остаться после проводимой интервенции [27].

В исследовании D. Pool и соавторов (2014) получены результаты, показывающие снижение спастичности в группах мышц-агонистов и антагонистов нижних конечностей, из чего можно заключить, что ФЭС благотворно влияет на общий баланс тонуса мышц и контроль двигательных паттернов, используемых в походке [16]. Было обнаружено значительное снижение баллов по Австралийской шкале оценки спастичности (Australian Spasticity Assessment Scale, ASAS) во время ( $p=0,03$ ) и после ( $p<0,01$ ) применения ФЭС [16, 35].

Расход энергии помогает определить эффективность походки и может быть косвенно оценен путем измерения потребления кислорода. Наиболее легко измерение производится путем сбора выдыхаемых газов изо рта, исходя из того, что весь энергетический метаболизм в организме зависит от утилизации кислорода [34]. S.M. El-Shamy и соавт. (2016) сообщают об улучшении средних энергозатрат после лечения в группе ФЭС на  $8,18\pm 0,88$  мл/кг против  $9,16\pm 0,65$  мл/кг в минуту для группы без ФЭС. Согласно результатам исследования, 3-месячная комбинированная программа ФЭС с помощью аппарата WalkAide совместно с физической терапией, демонстрирует улучшение паттерна походки и повышение выносливости по сравнению с 3-месячной программой только с физической терапией [34].

Дети относятся терпимо к электростимуляции и соблюдают правила ношения устройств ФЭС. Исследования влияния ФЭС на походку детей с ЦП также описывают степень комфорта и переносимости устройства. Обычно дети переносят ФЭС очень хорошо: 18 из 19 пациентов, которые применяли ФЭС, приняли решение использовать ФЭС в повседневной жизни. Среднее ежедневное использование устройства составило 5–6 ч [16, 17, 19, 38].

В исследовании J.R. Meilahn и соавт. 10 участников (100%) носили устройство в течение 6 нед и успешно переносили настройку и программирование ФЭС-аппарата; 7 из 10 пациентов (70%) носили прибор в течение полного 3-месячного периода тестирования; 6 из 10 (60%)



продолжали пользоваться прибором после завершения тестирования. Переносимость электростимуляции была высокой среди тех, кто использовал прибор от 2 до 11 ч/сут [19].

Безопасность применения ФЭС у детей обусловлена удобством его применения и простотой конструкции. В приведенных выше исследованиях были зарегистрированы как положительные эффекты от применения ФЭС, так и некоторые побочные действия. Представленные выше результаты исследований служат хорошими предпосылками к тому, что ФЭС станет неотъемлемым инструментом для улучшения ходьбы в повседневной жизни.

### Российский опыт применения функциональной электрической стимуляции при церебральном параличе

В исследовании К.А. Петрушанской и А.С. Витензона (2009) описана методика исследования биомеханических и электромиографических параметров ходьбы больных с ЦП, спастической диплегией, установлены особенности биомеханической и иннервационной структур локомоторного акта у 25 больных с диплегической формой ЦП, для которых была типична комбинация пареза преимущественно мышц-разгибателей со спастичностью мышц-сгибателей нижних конечностей. Больные ходили на полусогнутых, приведенных и ротированных внутрь ногах с опорой на передние отделы стоп. Основным показанием для ФЭС у больных с ЦП является дефицит мышечной функции (ДМФ), проявляющийся во время ходьбы патологическими элементами локомоции. Наиболее часто встречается ДМФ трехглавой мышцы голени, передней большеберцовой, большой и средней ягодичной и мышц — разгибателей и сгибателей голени [4].

При диплегической форме ЦП основным видом коррекции является усиление разгибательно-отводящих движений в тазобедренном суставе путем ФЭС большой и средней ягодичной мышц в первые  $2/3$  опорной фазы. Этот вид коррекции было целесообразно сочетать с подъемом стопы в голеностопном суставе посредством ФЭС передней большеберцовой мышцы в конце опорной и в течение переносной фаз ног. Указанные коррекции облегчили перенос конечности и позволили начать следующий шаг с опоры на пятку. Отличный эффект лечения больных ЦП методом ФЭС был достигнут при комбинировании ФЭС больших ягодичных мышц в первой половине опорной фазы и передних большеберцовых мышц в конце опорной и в течение переносной фаз [4].

Под влиянием 20-дневного курса электростимуляционной тренировки было зарегистрировано два типа изменений: улучшилось функциональное состояние мышц и частично нормализовалась биомеханическая и иннервационная программы ходьбы. Были оптимизированы биомеханические параметры ходьбы: рост длины шага и темпа передвижения, увеличилась скорость ходьбы

в среднем на 12%, стало более правильным соотношение основных фаз цикла благодаря большей продолжительности (на 12%) переносной фазы. Инструментальные исследования показали прирост силы и максимальной электрической активности стимулируемых мышц 1,3 раза, что свидетельствует о частичном восстановлении их функции. Результаты коррекционной тренировки остаются стабильными в течение 6–12 мес, после чего необходима дополнительная тренировка, которая может быть осуществлена в домашних условиях с помощью портативных нейроортезов, таких как WalkAide [4].

### Возможности сочетанного использования функциональной электрической стимуляции в движении после проведения ботулинотерапии

В исследовании S. Galen и соавт. (2012) рассматривается вопрос о том, может ли электростимуляция потенцировать результат, получаемый от ботулинотерапии [36]. Контроль эффективности проводился в начале и в конце каждого из описанных этапов. Вначале пациентам вводили ботокс в икроножную мышцу паретичной конечности и ждали 3 нед, чтобы убедиться, что ботокс оказывает требуемое воздействие на спастическую мышцу. Вторым этапом пациенты прошли 4-недельный курс использования ФЭС. На третьем этапе 4-недельный перерыв без каких-либо интервенций. На четвертом этапе пациенты получили второй 4-недельный курс с ФЭС. Пятый этап — вторичный 4-недельный перерыв без каких-либо интервенций [36]. Стимуляцию применяли непосредственно к передней большеберцовой мышце во время ходьбы, стимуляция была динамичной, запускалась с помощью датчика внутри обуви. Устройство ФЭС пациенты носили в течение 30 мин ежедневно под контролем. Из-за отсутствия контрольной группы было невозможно сравнить эффект от лечения по отдельности только для ФЭС и только для ботулинотерапии. Тем не менее большинство пациентов отметили увеличение диапазона движения в голеностопе (дорсифлексия) во время переноса конечности в течение всего испытания по сравнению с исходным состоянием.

Некоторым испытуемым удавалось поддерживать улучшенную дорсифлексию и на этапе без интервенций после ФЭС, а некоторые продолжали демонстрировать улучшение во время следующего контрольного этапа. Таким образом, полученные от ФЭС эффекты (улучшенная дорсифлексия при переносе, улучшенное позиционирование стопы в опоре и улучшенный ответ голеностопного сустава на нагрузку) стали долгосрочным терапевтическим остаточным воздействием. Следовательно, ФЭС может служить инструментом для повышения эффективности ботулинотерапии и в некоторой степени способствовать мышечному переобучению при комбинировании этих двух методик [36].

В исследовании А.Л. Куренкова и соавт. (2020) была рассмотрена эффективность комбинированного применения ботулинотерапии (с целью коррекции спастичности и повышенного мышечного тонуса икроножных мышц, формирующих эквинусное положение стопы) и ФЭС в движении (для усиления функции передней большеберцовой мышцы как мышцы-антагониста с явлениями пареза) у 40 детей с ЦП I–III уровней по системе GMFCS (Gross Motor Function Classification System — Система классификации больших моторных функций при церебральном параличе) в возрасте 2–12 лет. В 1-ю (основную) группу были включены 20 детей — 10 со спастической диплегией и 10 с гемипаретической формой ЦП, получавших лечение с применением как ботулинотерапии, так и ФЭС. Вторую (контрольную) группу составили 20 детей — 11 со спастической диплегией и 9 с гемипаретической формой ЦП, которым проводилась только ботулинотерапия без последующей ФЭС. До начала лечения пациентов этих групп сравнили по основным анализируемым параметрам: уровню повышения мышечного тонуса в икроножных мышцах, степени спастичности икроножных мышц, объему движений в голеностопном суставе при пассивном движении и при максимальном произвольном усилии во время разгибания в нем [37].

Пациенты 1-й группы со следующего после инъекций дня также начинали дополнительно получать курс ФЭС в течение 10 дней с помощью аппарата WalkAide. ФЭС проводилась в режиме ходьбы ребенка с комфортной скоростью передвижения. Лечебные сеансы ФЭС проводили ежедневно длительностью не менее 1 ч в течение 10 дней. В обеих группах после ботулинотерапии и ФЭС назначалось стандартное восстановительное лечение, которое включало физические методы реабилитации (массаж, индивидуальные занятия лечебной физкультурой, кинезиотейпирование, терапию с биологической обратной связью (БОС), метод сухой иммерсии и др.) [26].

Через 2 нед после окончания курса лечения было отмечено, что мышечный тонус и спастичность достоверно снижались в обеих группах, что указывало на высокую эффективность проведенной ботулинотерапии. По результатам гониометрического исследования объем движений в голеностопном суставе в 1-й группе после ботулинотерапии в сочетании с ФЭС был достоверно больше, чем у пациентов 2-й группы. Это различие наблюдалось не только при проведении пассивного тыльного сгибания стопы ( $p=0,044$ ), но и при выполнении пациентами максимального произвольного мышечного сокращения ( $p=0,036$ ). Еще большие различия в объеме движений в голеностопном суставе между группами после лечения были получены в подгруппе пациентов с гемиплегической формой ЦП.

Авторы сделали вывод, что технология ФЭС является дополнительным эффективным средством, которое повышает силу ослабленных мышц, увеличивает

диапазон движений в голеностопном суставе и улучшает в целом паттерн ходьбы детей с ЦП. После курса ботулинотерапии это приводило к значительно большему увеличению объема движений в ГСС по сравнению с контрольной группой без ФЭС, причем как при пассивном тестировании, так и при выполнении ребенком произвольного максимального возможного тыльного сгибания стопы [37].

## Перспективы научных исследований

Полученные результаты по применению ФЭС малоберцового нерва при лечении свисающей стопы у детей с ЦП очень обнадеживающие с точки зрения переносимости стимуляции, кинематических улучшений и пластичности мышц, а также снижения энергозатрат при ходьбе. Использование ФЭС в движении в детской неврологии и реабилитации становится все более распространенным. Такие технологии ФЭС, как WalkAide, становятся стандартом доказательной медицины и обещают стать неотъемлемой частью будущих физиотерапевтических неинвазивных интервенций в педиатрии [38].

В будущем целесообразно изучить, какие группы пациентов наиболее восприимчивы и обладают наибольшим потенциалом к ФЭС: в каком возрасте, при какой выраженности спастичности, каковы должны быть психические особенности ребенка. Актуален расчет корректной дозировки ФЭС для достижения оптимального результата в различных клинических случаях, возможности сочетания ФЭС с другими методами реабилитации и физиотерапии.

Перспективы совершенствования технологии нейрорезервирования с ФЭС связывают с использованием аппаратов с БОС, дистанционной настройкой оборудования и сбором информации, а также с добавлением ЭМГ-триггерной стимуляции. В настоящее время также отсутствуют рекомендации по единому протоколу эффективных входящих настроек (input) и системе оценки эффективности тренировок с ФЭС, т. е. объективизации результатов (output). Технология также должна становиться более доступной для более широкой целевой аудитории благодаря более низкой цене и упрощенному, адаптированному для человека с инвалидностью, дизайну.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ данных исследований свидетельствует о том, что аппараты ФЭС хорошо переносятся детьми и эффективны для лечения свисающей стопы у пациентов с ЦП. Современный портативный функциональный электростимулятор — перспективный альтернативный вариант восстановительного лечения для детей с парезами нижних конечностей центрального генеза [12, 38].

Следует отметить, что при проведении реабилитации, включающей ФЭС и другие инновационные технологии,

повышается социальный статус детей: у ряда пациентов появляется возможность самостоятельного передвижения, самообслуживания, освоения ранее недоступных профессий и наблюдается более быстрая инклюзия в обществе.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что включение метода функциональной электростимуляции в комплексное лечение пациентов с ЦП позволяет проводить нейрореабилитацию в стационаре в соответствии с европейскими подходами, ускоряя процесс восстановления более физиологической походки и улучшая физические возможности больных. После прохождения курса реабилитации в стационаре пациент может продолжить эксплуатацию аппаратов ФЭС в более привычной домашней среде, тем самым не прерывая процесс лечения.

Метод ФЭС помогает значительному количеству людей с такими заболеваниями, как инсульт и рассеянный склероз, и, возможно, это только вопрос времени, прежде чем его использование будет расширено за счет включения еще большего числа детей с ЦП в программу реабилитации с ФЭС. Функциональная электрическая стимуляция в динамике движения открывает широкие перспективы для того, чтобы вернуть детям с ЦП подвижность, свободную от неловкости и боли. Хотя это восстановительное лечение еще не является широкодоступным, его очевидная эффективность и безопасность означают, что использование ФЭС, без сомнения, станет еще более распространенным в будущем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.А., Намазова-Баранова Л.С., Куренков А.Л., Ключкова О.А. Комплексная оценка двигательных функций у пациентов с ЦП. Москва: ПедиатрЪ, 2014.
2. Vax M., Goldstein M., Rosenbaum P., et al. Proposed definition and classification of cerebral palsy, April 2005 // *Dev Med Child Neurol*. 2005. Vol. 47, N 8. P. 571–576. doi: 10.1017/s001216220500112x
3. Витензон А.С., Мионов Е.М., Петрушанская К.А., Скоблин А.А. Структура ходьбы больных детским церебральным параличом и ее коррекция посредством фазовой электростимуляции мышц. Искусственная коррекция движений при патологической ходьбе. Москва: ООО Зеркало, 1999.
4. 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. Т. 109, № 1. С. 1–27.
5. Гурьянова Е.А., Ковальчук В.В., Тихоплав О.А., Литвак Ф.Г. Функциональная электростимуляция при восстановлении ходьбы после инсульта. Обзор научной литературы // *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2020. Т. 2, N 3. С. 244–262.
6. Гурьянова Е.А., Кирьянова В.В. Эффективность функциональной стимуляции при рассеянном склерозе (обзор литературы) // *Вестник восстановительной медицины*. 2020. № 99. С. 107–119.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ / DISCLAIMERS

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

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

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

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

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

**Наибольший вклад распределен следующим образом:** Е.Г. Гурьянова, Н.В. Чебаненко, Ф.Г. Литвак — концепция и дизайн исследования; Ф.Г. Литвак, Е.Г. Гурьянова, В.П. Зыков — сбор и обработка материала; Е.Г. Гурьянова, Н.В. Чебаненко — написание текста; Е.Г. Гурьянова, В.П. Зыков — редактирование.

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

**Author contributions:** E.G. Guryanova, N.V. Chebanenko, F.G. Litvak, created the study concept and design; F.G. Litvak, E.G. Guryanova, V.P. Zykov, collected and processed the material; E.G. Guryanova, N.V. Chebanenko, wrote the text; E.G. Guryanova, V.P. Zykov, edited the text.

7. Stein R.B., Everaert D.G., Thompson A.K., et al. Long-term therapeutic and orthotic effects of a foot drop stimulator on walking performance in progressive and nonprogressive neurological disorders // *Neurorehabil Neural Repair*. 2010. Vol. 24, N 2. P. 152–167. doi: 10.1177/1545968309347681
8. Orlin M.N., Pierce S.R., Stackhouse C.L., et al. Immediate effect of percutaneous intramuscular stimulation during gait in children with cerebral palsy: a feasibility study // *Dev Med Child Neurol*. 2005. Vol. 47, N 10. P. 684–690. doi: 10.1017/S0012162205001398
9. Семёнова К.А. Восстановительное лечение детей с перинатальным поражением нервной системы и детским церебральным параличом. Москва: Кодекс, 2007.
10. Pierce S.R., Laughton C.A., Smith B.T., et al. Direct effect of percutaneous electric stimulation during gait in children with hemiplegic cerebral palsy: a report of 2 cases // *Arch Phys Med Rehabil*. 2004. Vol. 85, N 2. P. 339–343. doi: 10.1016/s0003-9993(03)00473-8
11. Куренков А.И. Оценка двигательных нарушений при детском церебральном параличе и других болезнях нервной системы детей: дисс. ... док.мед.наук. 2005. Москва.
12. Притыко А.Г., Чебаненко Н.В., Зыков В.П., и др. Опыт применения проприоцептивного моделирования ходьбы у детей раннего возраста с двигательными расстройствами // *Русский журнал детской неврологии*. 2019. Т. 14, № 3. С. 16–27. doi: 10.17650/2073-8803-2019-14-3-16-27.

- 13.** Соколов П.Л., Чебаненко Н.В., Притыко А.Г., и др. Клиническая эффективность метода опорной пневмостимуляции в коррекции моторного дефицита у детей с церебральными параличами. *Детская и подростковая реабилитация*. 2020. Т. 1, №41. С. 12-17.
- 14.** Титаренко Н.Ю. Оптимизация неинвазивных методов лечения больных спастическими формами детского церебрального паралича в поздней резидуальной стадии: дисс.. канд. мед. наук. Москва, 2014.
- 15.** Liberson W.T., Holmquest H.J., Scot D., Dow M. Functional electrotherapy: stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients // *Arch Phys Med Rehabil*. 1961. Vol. 42, N. P. 101-105.
- 16.** Pool D., Blackmore A.M., Bear N., Valentine J. Effects of short-term daily community walk aide use on children with unilateral spastic cerebral palsy // *Pediatr Phys Ther*. 2014. Vol. 26, N 3. P. 308-317. doi: 10.1097/PEP.0000000000000057
- 17.** Prosser L.A., Curatalo L.A., Alter K.E., Damiano D.L. Acceptability and potential effectiveness of a foot drop stimulator in children and adolescents with cerebral palsy // *Dev Med Child Neurol*. 2012. Vol. 54, N 11. P. 1044-1049. doi: 10.1111/j.1469-8749.2012.04401.x
- 18.** Damiano D.L., Prosser L.A., Curatalo L.A., Alter K.E. Muscle plasticity and ankle control after repetitive use of a functional electrical stimulation device for foot drop in cerebral palsy // *Neurorehabil Neural Repair*. 2013. Vol. 27, N 3. P. 200-207. doi: 10.1177/1545968312461716
- 19.** Meilahn J.R. Tolerability and effectiveness of a neuroprosthesis for the treatment of footdrop in pediatric patients with hemiparetic cerebral palsy // *PM R*. 2013. Vol. 5, N 6. P. 503-509. doi: 10.1016/j.pmrj.2012.11.005
- 20.** Karabay I., Ozturk G.T., Malas F.U., et al. Short-Term effects of neuromuscular electrical stimulation on muscle architecture of the tibialis anterior and gastrocnemius in children with cerebral palsy: preliminary results of a prospective controlled study // *Am J Phys Med Rehabil*. 2015. Vol. 94, N 9. P. 728-733. doi: 10.1097/PHM.0000000000000238
- 21.** van der Linden M. Functional electrical stimulation in children and adolescents with cerebral palsy // *Dev Med Child Neurol*. 2012. Vol. 54, N 11. P. 972. doi: 10.1111/j.1469-8749.2012.04419.x
- 22.** Moll I., Vles J.S.H., Soudant D., et al. Functional electrical stimulation of the ankle dorsiflexors during walking in spastic cerebral palsy: a systematic review // *Dev Med Child Neurol*. 2017. Vol. 59, N 12. P. 1230-1236. doi: 10.1111/dmcn.13501
- 23.** Jackman M., Novak I., Lannin N., et al. Effectiveness of Cognitive Orientation to daily Occupational Performance over and above functional hand splints for children with cerebral palsy or brain injury: a randomized controlled trial // *BMC Pediatr*. 2018. Vol. 18, N 1. P. 248. doi: 10.1186/s12887-018-1213-9
- 24.** Jackman M., Novak I., Lannin N. Effectiveness of hand splints in children with cerebral palsy: a systematic review with meta-analysis // *Dev Med Child Neurol*. 2014. Vol. 56, N 2. P. 138-147. doi: 10.1111/dmcn.12205
- 25.** Clinicaltrials.gov [интернет]. Fatal-Valvski A, Segal I, Alexander M. Effects of functional electrical stimulation on gait in children with hemiplegic and diplegic cerebral palsy: Interventional clinical trial [дата доступа: 06.06.2021]. Режим доступа: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT02462018>
- 26.** Доценко В.И., Куренков А.Л., Кочетков А.В. Теоретическое обоснование и практическое использование технологии функциональной программируемой электростимуляции в ходьбе неврологических больных // *Вестник восстановительной медицины*. 2012. № 2. С. 21-28
- 27.** Seifart A., Unger M., Burger M. Functional electrical stimulation to lower limb muscles after botox in children with cerebral palsy // *Pediatr Phys Ther*. 2010. Vol. 22, N 2. P. 199-206. doi: 10.1097/PEP.0b013e3181dbd806
- 28.** Pierce S.R., Orlin M.N., Lauer R.T., et al. Comparison of percutaneous and surface functional electrical stimulation during gait in a child with hemiplegic cerebral palsy // *Am J Phys Med Rehabil*. 2004. Vol. 83, N 10. P. 798-805. doi: 10.1097/01.phm.0000137318.92035.8c
- 29.** van der Linden M.L., Hazlewood M.E., Hillman S.J., Robb J.E. Functional electrical stimulation to the dorsiflexors and quadriceps in children with cerebral palsy // *Pediatr Phys Ther*. 2008. Vol. 20, N 1. P. 23-29. doi: 10.1097/PEP.0b013e31815f39c9
- 30.** Ho C.L., Holt K.G., Saltzman E., Wagenaar R.C. Functional electrical stimulation changes dynamic resources in children with spastic cerebral palsy // *Phys Ther*. 2006. Vol. 86, N 7. P. 987-1000.
- 31.** Durham S., Eve L., Stevens C., Ewins D. Effect of functional electrical stimulation on asymmetries in gait of children with hemiplegic cerebral palsy // *Physiotherapy*. 2004. Vol 90, N 2. P. 82-90. doi: 10.1016/j.physio.2004.02.003
- 32.** Danino B., Khamis S., Hemo Y., et al. The efficacy of neuroprosthesis in young hemiplegic patients, measured by three different gait indices: early results // *J Child Orthop*. 2013. Vol. 7, N 6. P. 537-542. doi: 10.1007/s11832-013-0540-5
- 33.** Carroll M. K., Toelle C. A., Kim S. H., et al. The effect of the walk aide functional electrical stimulation unit on gait asymmetry in a child with cerebral palsy: a case report. *Technology and Innovation*. 2014. Vol 15, N 4. P. 287-292. doi: 10.3727/194982413X13844488878899
- 34.** El-Shamy S.M., Abdelaal A.A. WalkAide Efficacy on Gait and Energy Expenditure in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy: A Randomized Controlled Trial // *Am J Phys Med Rehabil*. 2016. Vol. 95, N 9. P. 629-638. doi: 10.1097/PHM.0000000000000514
- 35.** Daichman J., Johnston T. E., Evans K., Tecklin J. S. The effects of a neuromuscular electrical stimulation home program on impairments and functional skills of a child with spastic diplegic cerebral palsy: A Case Report. *PediatrPhysTher*. 2003; 15: 153-158.
- 36.** Galen S., Wiggins L., McWilliam R., Granat M. A combination of Botulinum Toxin A therapy and Functional Electrical Stimulation in children with cerebral palsy--a pilot study // *Technol Health Care*. 2012. Vol. 20, N 1. P. 1-9. doi: 10.3233/THC-2011-0648
- 37.** Kurenkov A.I., Fisenko D.A., Kuzenkova L.M., et al. The effectiveness of combined use of botulinum toxin therapy and functional electrical stimulation in ambulatory patients with spastic forms of cerebral palsy // *L.O. Badalyan neurological journal*. 2020. Vol. 1, N 2. P. 80-90.
- 38.** Mooney J.A., Rose J. A Scoping Review of Neuromuscular Electrical Stimulation to Improve Gait in Cerebral Palsy: The Arc of Progress and Future Strategies // *Front Neurol*. 2019. Vol. 10, N. P. 887. doi: 10.3389/fneur.2019.00887

## REFERENCES

1. Baranov AA, Namazova-Baranova LS, Kurenkov AL, Klochkova OA. *Comprehensive assessment of motor functions in patients with cerebral palsy*. Moscow: Pediatr; 2014. (In Russ).
2. Bax M, Goldstein M, Rosenbaum P, et al. Proposed definition and classification of cerebral palsy, April 2005. *Dev Med Child Neurol*. 2005;47(8):571-576. doi: 10.1017/s001216220500112x
3. Vitenzon AS, Mironov EM, Petrushanskaja KA, Skoblin AA. *The structure of walking in patients with infantile cerebral palsy and its correction by means of phase electrical muscle stimulation. Artificial correction of movements in pathological walking*. Moscow: Zerkalo; 1999.
4. Petrushanskaja KA, Vitenzon AS. Rehabilitation treatment of patients with infantile cerebral palsy through functional electrical muscle stimulation while walking. *Journal of Neurology and Psychiatry. SS Korsakov*. 2009;109(1):1-27.
5. Guryanova EA, Koval'chuk VV, Tihoplav OA, Litvak FG. Functional electrical stimulation in the recovery of walking after a stroke. Review of scientific literature. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2020;2(3):244-262.
6. Guryanova EA, Kiryanova VV. The effectiveness of functional stimulation in multiple sclerosis (literature review). *Herald of restorative medicine*. 2020;(99):107-119.
7. Stein RB, Everaert DG, Thompson AK, et al. Long-term therapeutic and orthotic effects of a foot drop stimulator on walking performance in progressive and nonprogressive neurological disorders. *Neurorehabil Neural Repair*. 2010;24(2):152-167. doi: 10.1177/1545968309347681
8. Orlin MN, Pierce SR, Stackhouse CL, et al. Immediate effect of percutaneous intramuscular stimulation during gait in children with cerebral palsy: a feasibility study. *Dev Med Child Neurol*. 2005;47(10):684-690. doi: 10.1017/S0012162205001398
9. Semyonova KA. Rehabilitation treatment of children with perinatal lesions of the nervous system and infantile cerebral palsy. Moscow: Codex; 2007.
10. Pierce SR, Loughton CA, Smith BT, et al. Direct effect of percutaneous electric stimulation during gait in children with hemiplegic cerebral palsy: a report of 2 cases. *Arch Phys Med Rehabil*. 2004;85(2):339-343. doi: 10.1016/s0003-9993(03)00473-8
11. Kurenkov AI. Assessment of motor disorders in infantile cerebral palsy and other diseases of the nervous system of children [doctoral dissertation]. 2005. Moscow.
12. Prityko AG, Chebanenko NV, Zykov VP, et al. Experience of using proprioceptive walking modeling in young children with movement disorders. *Russian Journal of Child Neurology*. 2019;14(3):16-27. doi: 10.17650/2073-8803-2019-14-3-16-27.
13. Sokolov PL, Chebanenko NV, Prityko AG, et al. Clinical effectiveness of the method of supporting pneumostimulation in the correction of motor deficits in children with cerebral palsy. *Rehabilitation for children and adolescents*. 2020;1(41):12-17.
14. Titarenko NY. Optimization of non-invasive methods of treatment of patients with spastic forms of infantile cerebral palsy in the late residual stage [dissertation]. Moscow; 2014.
15. Liberson WT, Holmquest HJ, Scot D, Dow M. Functional electrotherapy: stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients. *Arch Phys Med Rehabil*. 1961;42:101-105.
16. Pool D, Blackmore AM, Bear N, Valentine J. Effects of short-term daily community walk aide use on children with unilateral spastic cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther*. 2014;26(3):308-317. doi: 10.1097/PEP.0000000000000057
17. Prosser LA, Curatalo LA, Alter KE, Damiano DL. Acceptability and potential effectiveness of a foot drop stimulator in children and adolescents with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2012;54(11):1044-1049. doi: 10.1111/j.1469-8749.2012.04401.x
18. Damiano DL, Prosser LA, Curatalo LA, Alter KE. Muscle plasticity and ankle control after repetitive use of a functional electrical stimulation device for foot drop in cerebral palsy. *Neurorehabil Neural Repair*. 2013;27(3):200-207. doi: 10.1177/1545968312461716
19. Meilahn JR. Tolerability and effectiveness of a neuroprosthesis for the treatment of footdrop in pediatric patients with hemiparetic cerebral palsy. *PM R*. 2013;5(6):503-509. doi: 10.1016/j.pmrj.2012.11.005
20. Karabay I, Ozturk GT, Malas FU, et al. Short-Term effects of neuromuscular electrical stimulation on muscle architecture of the tibialis anterior and gastrocnemius in children with cerebral palsy: preliminary results of a prospective controlled study. *Am J Phys Med Rehabil*. 2015;94(9):728-733. doi: 10.1097/PHM.0000000000000238
21. van der Linden M. Functional electrical stimulation in children and adolescents with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2012;54(11):972. doi: 10.1111/j.1469-8749.2012.04419.x
22. Moll I, Vles JSH, Soudant D, et al. Functional electrical stimulation of the ankle dorsiflexors during walking in spastic cerebral palsy: a systematic review. *Dev Med Child Neurol*. 2017;59(12):1230-1236. doi: 10.1111/dmcn.13501
23. Jackman M, Novak I, Lannin N, et al. Effectiveness of Cognitive Orientation to daily Occupational Performance over and above functional hand splints for children with cerebral palsy or brain injury: a randomized controlled trial. *BMC Pediatr*. 2018;18(1):248. doi: 10.1186/s12887-018-1213-9
24. Jackman M, Novak I, Lannin N. Effectiveness of hand splints in children with cerebral palsy: a systematic review with meta-analysis. *Dev Med Child Neurol*. 2014;56(2):138-147. doi: 10.1111/dmcn.12205
25. Clinicaltrials.gov [internet]. Fatal-Valvski A, Segal I, Alexander M. Effects of functional electrical stimulation on gait in children with hemiplegic and diplegic cerebral palsy: Interventional clinical trial [updated: July 2019; access date: 6 Jun 2021]. Available from: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT02462018>
26. Dotsenko VI, Kurenkov AL, Kochetkov AV. Theoretical substantiation and practical use of the technology of functional programmed electrical stimulation in walking in neurological patients. *Herald of restorative medicine*. 2012;2:21-28.
27. Seifart A, Unger M, Burger M. Functional electrical stimulation to lower limb muscles after botox in children with cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther*. 2010;22(2):199-206. doi: 10.1097/PEP.0b013e3181dbd806
28. Pierce SR, Orlin MN, Lauer RT, et al. Comparison of percutaneous and surface functional electrical stimulation during gait in a child with hemiplegic cerebral palsy. *Am J Phys Med Rehabil*. 2004;83(10):798-805. doi: 10.1097/01.phm.0000137318.92035.8c

- 29.** van der Linden ML, Hazlewood ME, Hillman SJ, Robb JE. Functional electrical stimulation to the dorsiflexors and quadriceps in children with cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther.* 2008;20(1):23-29. doi: 10.1097/PEP.0b013e31815f39c9
- 30.** Ho CL, Holt KG, Saltzman E, Wagenaar RC. Functional electrical stimulation changes dynamic resources in children with spastic cerebral palsy. *Phys Ther.* 2006;86:987-1000. doi: 10.1093/ptj/86.7.987
- 31.** Durham S, Eve L, Stevens C, Ewins D. Effect of functional electrical stimulation on asymmetries in gait of children with hemiplegic cerebral palsy. *Physiotherapy.* 2004; 90(2):82-90. doi: 10.1016/j.physio.2004.02.003
- 32.** Danino B, Khamis S, Hemo Y, et al. The efficacy of neuroprosthesis in young hemiplegic patients, measured by three different gait indices: early results. *J Child Orthop.* 2013;7(6):537-542. doi: 10.1007/s11832-013-0540-5
- 33.** Carroll MK, Toelle CA, Kim SH, et al. The effect of the walk aide functional electrical stimulation unit on gait asymmetry in a child with cerebral palsy: a case report. *Technology and Innovation.* 2014;15(4):287-292. doi: 10.3727/194982413X13844488878899
- 34.** El-Shamy SM, Abdelaal AA. WalkAide Efficacy on Gait and Energy Expenditure in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy: A Randomized Controlled Trial. *Am J Phys Med Rehabil.* 2016;95(9):629-638. doi: 10.1097/PHM.0000000000000514
- 35.** Daichman J, Johnston TE, Evans K, Tecklin JS. The effects of a neuromuscular electrical stimulation home program on impairments and functional skills of a child with spastic diplegic cerebral palsy: a case report. *Pediatr Phys Ther.* 2003;15(3):153-158. doi: 10.1097/01.PEP.0000083121.26982.1D
- 36.** Galen S, Wiggins L, McWilliam R, Granat M. A combination of Botulinum Toxin A therapy and Functional Electrical Stimulation in children with cerebral palsy--a pilot study. *Technol Health Care.* 2012;20(1):1-9. doi: 10.3233/THC-2011-0648
- 37.** Kurenkov AI, Fisenko DA, Kuzenkova LM, et al. The effectiveness of combined use of botulinum toxin therapy and functional electrical stimulation in ambulatory patients with spastic forms of cerebral palsy. *L.O. Badalyan neurological journal.* 2020;1(2):80-90.
- 38.** Mooney JA, Rose J. A Scoping Review of Neuromuscular Electrical Stimulation to Improve Gait in Cerebral Palsy: The Arc of Progress and Future Strategies. *Front Neurol.* 2019;10:887. doi: 10.3389/fneur.2019.00887

## ОБ АВТОРАХ

**\*Гурьянова Евгения Аркадьевна** – д. м. н., профессор; адрес: Россия, 428015, Чебоксары, Московский проспект, 45; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1519-2319>, e-mail: z-guryanova@bk.ru

**Чебаненко Наталья Владимировна**, к.м.н., доцент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7231-0249>, e-mail: nataqwe@yandex.ru

**Литвак Феликс Григорьевич**, SPIN-код: 8435-6912, e-mail: litvak.felix@gmail.com

**Зыков Валерий Петрович**, д.м.н., профессор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1401-5479>, e-mail: childneur@mtu-net.ru

## AUTHORS INFO

**\*Evgeniya A. Guryanova**, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor; address: 45, Moskovsky str., 428015, Cheboksary, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1519-2319>, e-mail: z-guryanova@bk.ru

**Natalya V. Chebanenko**, MD, Cand. Sci. (Med.), assistant professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7231-0249>, e-mail: nataqwe@yandex.ru

**Felix G. Litvak**, SPIN-code: 8435-6912, e-mail: litvak.felix@gmail.com

**Valery P. Zykov**, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1401-5479>, e-mail: childneur@mtu-net.ru