

<https://doi.org/10.36425/rehab34831>

## Функциональная электростимуляция при восстановлении ходьбы после инсульта. Обзор научной литературы

Е.А. Гурьянова<sup>1, 2</sup>, В.В. Ковальчук<sup>3</sup>, О.А. Тихоплав<sup>2</sup>, Ф.Г. Литвак<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Государственное автономное учреждение Чувашской Республики дополнительного профессионального образования «Институт усовершенствования врачей» Министерства здравоохранения Чувашской Республики, Чебоксары, Российская Федерация

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Российская Федерация

<sup>3</sup> Санкт-Петербургское государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Городская больница № 38 им. Н.А. Семашко», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>4</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Информационно-технический центр Интеграл», Москва, Российская Федерация

В статье приведен систематический обзор результатов исследований, посвященных изучению эффективности применения технологии функциональной электростимуляции (ФЭС) в реабилитации пациентов, перенесших инсульт. Обсуждается влияние ФЭС 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 ФЭС 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.

**Ключевые слова:** инсульт, реабилитация, ФЭС, функциональная электростимуляция, ходьба, нарушение походки, спастичность, падения.

**Для цитирования:** 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;2(3):244–262. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab34831>

**Поступила:** 22.06.2020 **Принята:** 02.07.2020

### Список сокращений

ФЭС — функциональная электростимуляция

ЭМГ — электромиограмма

BTX (botulinum toxin) — ботулотоксин

DGI (Dinamic gait index) — шкала оценки функции ходьбы и риска падения

FIM (Functional independence measure) — шкала функциональной независимости

MEP (Motor evoked potential) — вызванный двигательный потенциал

PCI (Physiologic cost index) — индекс физиологических затрат

SIS (Stroke impact scale) — масштаб последствий инсульта

### Введение

#### Клинико-функциональные изменения походки у пациента после инсульта

Инсульт — это острое заболевание, охватывающее широкий спектр клинических состояний, включающих в себя тромбоз, кровоизлияние и эмболию. Смертность от инсульта колеблется в пределах 12–29%, уступая лишь смертности от заболеваний сердца и злокачественных опухолей. Инсульт имеет тяжелые последствия, часто сопровождается инвалидизацией, и только 20% пациентов, перенесших это патологическое состояние, возвращаются к трудовой деятельности. Инвалидизация после инсульта занимает первое место среди других заболеваний и составляет 3,2 на 10 000 населения [1].

Задачей настоящего обзора является обобщение опубликованных в научной литературе сведений о применении функциональной электростимуляции

# Functional Electrical Stimulation for Restoration of Gait and Motor Recovery After a Stroke. Review of Scientific Literature

E.A. Guryanova<sup>1, 2</sup>, V.V. Kovalchuk<sup>3</sup>, O.A. Tikhoplav<sup>2</sup>, F.G. Litvak<sup>4</sup>

<sup>1</sup> GAU DPO “Institute for Advanced Medical Studies” of the Ministry of Health of the Chuvash Republic, Cheboksary, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Chuvash State University named after I.N. Ulyanova”, Cheboksary, Russian Federation

<sup>3</sup> St. Petersburg State Budgetary Healthcare Institution “City Hospital № 38 of Semashko”, Medical Rehabilitation Center, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>4</sup> ITC Integral LLC, Moscow, Russian Federation

The article presents an analysis of studies on the use of functional electrical stimulation (FES) technology in the rehabilitation of patients after stroke. We reviewed the influence of FES on improving walking speed, kinematics, gait symmetry, the ability to overcome obstacles, the range of motion of the ankle and foot clearance during walking. In the review it is considered FES influence on reducing energy costs for walking, the frequency of falls and spasticity of muscles of the lower limbs. It is also discussed FES influence on increasing confidence and comfort while walking, the speed of adaptation and patient tolerance of functional electrical stimulation devices. A comparison is made of functional electrical stimulation with using ankle orthoses (AFO).

**Keywords:** stroke, post-stroke rehabilitation, FES, functional electrical stimulation, gait disorder, spasticity, falls.

**For citation:** Guryanova EA, Kovalchuk VV, Tikhoplav OA, Litvak FG. Functional Electrical Stimulation for Restoration of Gait and Motor Recovery After a Stroke. Review of Scientific Literature. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2020;2(3):244–262. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab34831>

**Received:** 22.06.2020 **Accepted:** 02.07.2020

в медицинской реабилитации неврологических пациентов, а также анализ опыта, накопленного в мировых медицинских системах по данной проблеме.

С целью осуществления поставленной задачи выполнен систематический поиск информации в базах данных PubMed, Cochrane, Web of Science, ScienceDirect, Embase, Pedro. Поиск проводился по ключевым словам и комбинациям следующих слов: «инсульт», «реабилитация», «ФЭС», «функциональная электростимуляция», «ходьба», «нарушение походки», «спастичность», «падения», «stroke», «post-stroke rehabilitation», «FES», «functional electrical stimulation», «gait disorder», «spasticity», «falls».

Одной из наиболее выраженных проблем, способствующих повышению уровня инвалидизации у пациентов после инсульта, является нарушение походки и ходьбы, что выражается не только снижением скорости ходьбы, но и изменением кинематики походки, ее асимметрией, появлением компенсаторных движений и нестабильности походки, а также быстрой утомляемостью пациентов. Такие негативные факторы, безусловно, могут поставить под угрозу

свободу передвижения пациента, снизить безопасность его ходьбы, а также увеличить число случаев падений, высокая вероятность которых у пациентов, перенесших инсульт, хорошо известна. В свою очередь, падения способствуют травматизации пациентов, что, в конечном итоге, ведет к существенному снижению качества их жизни [1, 2].

Помимо этого, реабилитацию пациентов затрудняет ряд распространенных осложнений, важнейшим из которых является так называемая свисающая стопа (foot drop), которая формируется в результате парезов и параличей мышц, участвующих в подъеме передней части стопы. Главным фактором формирования свисающей стопы является слабость разгибателя голеностопного сустава (дорсифлексия), которая связана с невозможностью сокращения передней большеберцовой мышцы, длинного разгибателя большого пальца стопы и длинного разгибателя пальцев. Слабость мышц, участвующих в экстензии голеностопа и стопы, приводит к многочисленным нарушениям походки, в том числе к снижению скорости ходьбы и асимметрии [3].

Другими негативными последствиями заболевания являются всевозможные варианты нарушения рисунка ходьбы, такие как «перетаскивание» стопы и пальцев ног или применение компенсаторных стратегий, адаптивная пассивная тугоподвижность (плантарфлексия), периферические круговые движения конечностью [4]. Поскольку при ходьбе требуется модулирование длины шага и изменение траектории переноса конечности при переходе через препятствие, их преодоление у пациентов со свисающей стопой становится проблематичным, особенно когда паретичная нога преодолевает преграду со значительно меньшим клиренсом (степень поднятия стопы при ходьбе), чем здоровая конечность. Показано, что у таких пациентов в существенной степени повышается риск падения по сравнению со здоровыми людьми [5, 6].

Высокой клинической значимостью обладает также скорость ходьбы. Как правило, пациент после инсульта, не выходящий из дома, имеет ограниченную способность передвижения — менее 0,4 м/с, что отличает его от здоровых лиц и пациентов без парезов и параличей мышц, скорость ходьбы которых составляет от 0,8 м/с и выше [7].

Асимметрию походки у пациента, перенесшего инсульт, обуславливает спастичность мышц голеностопного сустава [8]. Во время ходьбы динамическая спастичность сгибателей подошвы (плантарфлексия) увеличивает пространственную асимметрию шага, а скованность голеностопного сустава является предиктором падений [9].

Таким образом, все нарушения активного мышечного сокращения, а также асимметричная кинематика походки и компенсаторные стратегии приводят к снижению качества и эффективности походки, а также к увеличению риска падения. При этом частой жалобой пациентов, перенесших инсульт, являются быстрые усталость и утомляемость, которые опасны повышенным риском падения. Установлено, что энергозатраты на ходьбу прямо пропорциональны скорости ходьбы [10], и чем выше энергозатраты пациента на ходьбу, тем быстрее он утомляется [11].

### **Исторические основы функциональной электрической стимуляции в реабилитации**

Функциональная электростимуляция (ФЭС) относится к технологиям, используемым в физической реабилитации пациентов после инсульта. ФЭС передней большеберцовой мышцы, приводящая к тыльному сгибанию голеностопного сустава, может способствовать предотвращению падения стопы (foot drop) в фазе переноса ноги.

Согласно отечественным клиническим рекомендациям по ведению пациентов с ишемическим инсультом и транзиторными ишемическими атаками (2017), «влияние технологий физической реабилитации на исход и степень функционального восстановления оценено как уровень доказательности 1А» [12], а в документе по реабилитации нарушений функции ходьбы и равновесия при синдроме центрального гемипареза в восстановительном периоде инсульта (2017) ФЭС рекомендована моделям пациентов В1 и В2 [13]. При этом пациентом модели В является больной с умеренным или выраженным гемипарезом, т.е. способный самостоятельно стоять и ходить, в том числе с опорой на трость (модель подгруппы В1). Согласно шкале оценки функции ходьбы и риска падения (Dinamic gait index, DGI), такой пациент соответствует II группе (низкий риск падения) при ходьбе с тростью и I группе (высокий риск падения) при ходьбе без опоры; согласно шкале баланса Берг — II группе (ходьба с поддержкой). По шкале мышечной спастичности Эшворта пациент подгруппы В1 имеет 2–3 балла, по шкале функциональной независимости в разделе двигательной активности (Functional independence measure, FIM) — от 39 до 52 баллов. Пациент подгруппы В2 способен самостоятельно стоять и ходить с опорой на трость или ходунки. Согласно шкале оценки функции ходьбы и риска падения (DGI), пациент модели В2 соответствует I группе (высокий риск падения) при ходьбе с тростью, согласно шкале баланса Берг — II группе (ходьба с поддержкой); по шкалам Эшворта и FIM имеет соответственно 2–3 и от 26 до 39 баллов [13].

Технология ФЭС также предусмотрена клиническими рекомендациями по реабилитации пациентов после инсульта Великобритании (2013, 2016) и Канады (2015). Использование ФЭС в мировой медицинской практике признано Национальным институтом качества медицинских услуг в здравоохранении NICE и Королевским медицинским колледжем RCP (более 100 клиник по всему миру) [14–17].

С момента своего появления ФЭС зарекомендовала себя в качестве эффективной методологии восстановления двигательных функций в нижних конечностях, что подтверждается большим количеством систематических исследований.

Одним из широко применяемых методов реабилитации является ФЭС передней большеберцовой и малоберцовой мышц паретичной конечности при ходьбе во время фазы переноса ноги. Практика применения ФЭС для восстановления движений после инсульта имеет убедительные доказательства, что

объясняется, прежде всего, использованием единой парадигмы, состоящей в стимуляции мышц-разгибателей голеностопного сустава в режиме ходьбы.

Данное направление реабилитации, возникшее в начале 60-х годов, стало значительным шагом в мировой медицине. Сущность данного метода заключается в том, что ФЭС используется как способ восстановления движения не только отдельного органа, но и сложного локомоторного акта. Метод ФЭС был впервые использован для восстановления ходьбы в 1961 г. американским ученым В. Либерсоном, который запатентовал его в 1965 г. как метод стимуляции нервно-мышечных образований человека [18, 19]. В. Либерсон (W. Liberson) применял ФЭС малоберцового нерва во время ходьбы. Впоследствии на основе этого изобретения было разработано устройство для помощи в ходьбе пациентам со слабостью передней большеберцовой мышцы [20]. 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 является 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 использует исключительно фазовую электростимуляцию мышц, т.е. осуществляется в фазы возбуждения и сокращения мышц. ФЭС не изменяет программу мышечных сокращений во время 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 должна быть комфортной для пациента и минимально достаточной для получения коррекционного эффекта и поддержания приближенного к физиологическому двигательному стереотипу ходьбы [21, 22].

В многочисленных исследованиях отечественных авторов (Е.В. Лахно, Р.В. Чаговец, Г.Ф. Колесников, Н.Н. Яковлев, В.Ю. Давиденко) отмечается, что электростимуляция оказывает влияние не только на стимулируемые мышцы, но и на весь организм,

и в первую очередь на центральную нервную систему, нейрогуморальные механизмы регуляции функций. В работах особо подчеркивается, что импульсы электрического тока воздействуют не только на мышечные, но и на нервные структуры — рецепторы, нервные волокна, благодаря чему вызываются разнообразнейшие рефлекторные изменения в целостном организме [23].

Еще в прошлом веке в исследованиях Е.В. Лахно и Р.В. Чаговец впервые сформированы представления о целесообразности применения электростимуляции для рефлекторного управления функциональным состоянием организма человека. Видимо, данное обстоятельство привело к тому, что Г.Ф. Колесников предложил проводить электростимуляцию двигательного аппарата в трех режимах — подпороговом, пороговом и надпороговом, при этом подпороговым он предлагает считать такой, при котором сокращений стимулируемой мышцы не происходит, а лишь возникает ощущение прохождения электрического тока через ткани тела. Иными словами, подобный режим служит исключительно для воздействия на многочисленные рецепторы и рефлекторного влияния на процессы как в самой мышце, так и во всем организме.

В табл. 1 приведены показания и противопоказания к использованию ФЭС.

### **Современные технологии функциональной электрической стимуляции и их отличительные особенности**

В современных системах ФЭС, безусловно, произведен ряд усовершенствований. Так, аппараты стали более компактными и беспроводными; отпала необходимость в применении внешних датчиков; форма импульса стала более схожа с физиологической электрической активностью организма человека; значительно повысилась надежность оборудования; появилась возможность создания индивидуальных программ настроек ходьбы для пациентов с учетом нозологии, уровня активности пострадавшего, толерантности к стимуляции, состояния кожных покровов, болевого порога и индивидуальных ощущений от стимуляции. В современных технологиях ФЭС используются датчики под стопой и датчики наклона, которые делают подобные устройства более практичными и удобными для пользователя.

В настоящее время на рынке реабилитационных услуг представлено много моделей медицинских аппаратов ФЭС, разработанных для пациентов с различными неврологическими заболеваниями. Устройства достаточно универсальны по принципу действия и подходят для всех патологий поражения

**Таблица 1.** Показания и противопоказания к использованию функциональной электростимуляции (ФЭС)

Поражение верхнего мотонейрона (прямое показание к ФЭС)	Поражение периферического мотонейрона (ФЭС может оказаться малоэффективной)	Относительные противопоказания к ФЭС
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Инсульт</li> <li>• Поперечный миелит</li> <li>• Рассеянный склероз</li> <li>• Черепно-мозговая травма</li> <li>• Послеоперационное повреждение головного мозга</li> <li>• Церебральный паралич</li> <li>• Неполное повреждение спинного мозга (уровень Th12 и выше)</li> <li>• Наследственная (семейная) параплегия</li> <li>• Наследственный спастический парапарез</li> <li>• Токсическая энцефалопатия</li> <li>• Болезнь Паркинсона</li> <li>• Атаксия</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Травма межпозвоночного диска или операция на пояснично-крестцовом отделе позвоночника</li> <li>• Свисающая стопа вследствие полной замены коленного сустава или эндопротезирования тазобедренного сустава</li> <li>• Ишиас</li> <li>• Спинальный стеноз на уровне нижнего отдела позвоночника</li> <li>• Полиомиелит</li> <li>• Синдром Гийена–Барре</li> <li>• Мышечная травма или заболевание</li> <li>• Амиотрофия Шарко–Мари–Тута</li> <li>• Невропатия различного генеза (в т.ч. диабетическая)</li> <li>• Болезнь Шарко / болезнь Лу Герига / боковой амиотрофический склероз (БАС)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Имплантированный кардиостимулятор или дефибриллятор</li> <li>• Неконтролируемые эпилептические приступы</li> <li>• Беременность</li> <li>• Алкоголизм</li> <li>• Психические расстройства</li> <li>• Злокачественная опухоль в пораженной голени</li> <li>• Открытые раны или симптоматический действующий тромбоз в пораженной голени</li> <li>• Неспособность сделать хотя бы 10 последовательных шагов (в т.ч. со вспомогательными средствами)</li> </ul>

центральной нервной системы (рассеянный склероз, инсульт, церебральный паралич, спинальные травмы и т.д.). К числу наиболее известных электростимуляторов относятся устройства с торговой маркой Европейского союза (европейский сертификат качества, CE) Walkaide, MyGait, Odstock, Bioness L300go, STIMuSTEP, ActiGait и FESIA WALK, разрешенные Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (Food and Drug Administration, FDA) к проведению нервно-мышечной электростимуляции при центральных и периферических парезах и представляющие собой медицинское оборудование средней степени (2а класс) риска [24–26].

Все существующие системы ФЭС в зависимости от уровня инвазивности можно разделить на две группы — имплантируемые и с накладываемыми электродами. Системы STIMuSTEP и ActiGait имплантируются, требуя нейрохирургического вмешательства, при использовании других стимуляторов электроды накладывают на кожу с целью чрескожной электростимуляции.

Большинство современных систем нейростимуляции представляют собой разомкнутые схемы (open-loop), которые весьма популярны сейчас благодаря их простому применению. К сожалению, в системах open-loop отсутствует обратная биологическая связь от мышцы и нерва, т.е. при их использовании остается нерешенной проблема с возникающей мышечной усталостью. Будущие аппараты closed-loop (замкнутая система) предполагают на-

личие обратной связи от мышцы и нерва благодаря технологии с использованием электромио- и электронейрографии [24, 25, 27].

Существуют модели, в которых вместо датчика под стопой используется датчик наклона, который измеряет ориентацию голени в пространстве, вызывая включение стимулятора во время фазы переноса ноги и выключение во время фазы опоры ноги в цикле ходьбы. Датчик наклона расположен в блоке управления, который прикреплен к манжете, расположенной на голени (в проекции большеберцовой кости). Когда голень в конце фазы опоры отклонена назад, датчик наклона срабатывает как триггер и включает стимуляцию, которая отключается в тот момент, когда нога в начале фазы опоры во время контакта пятки с полом наклоняется вперед. Оптимальное время стимуляции обычно длится всю фазу переноса ноги, однако точное время начала и окончания стимуляции адаптируется в соответствии с индивидуальными потребностями каждого конкретного пациента [28].

Результаты ряда исследований подтвердили обоснованность использования и надежность датчиков наклона, а также достоверность данных для мониторинга и измерения показателей функционирования нижних конечностей, получаемых с помощью устройств с акселерометром во время проведения реабилитационных мероприятий при инсульте [28].

Сравнительный анализ различных систем ФЭС, используемых в реабилитации после инсульта, приведен в табл. 2.

**Таблица 2.** Сравнительный анализ различных систем функциональной электростимуляции (ФЭС), используемых в реабилитации после инсульта

Аппараты ФЭС						
Портативные аппараты ФЭС	Страна-производитель	Датчики	Тип электродов	Кол-во каналов	Результат воздействия	Мышца / Нерв
MyGait	Германия	Резистивный датчик давления под пяткой	Чрескожный	2	Дорсифлексия	Перонеальный нерв
Odstock	Великобритания	Резистивный датчик давления под пяткой	Чрескожный	1	Дорсифлексия	Различные
Bioness L300go	США	Резистивный датчик давления под пяткой	Чрескожный	2	Дорсифлексия	Передняя большеберцовая мышца и перонеальный нерв
STIMuSTEP	Великобритания	Резистивный датчик давления под пяткой	Имплантируемый	2	Дорсифлексия	Перонеальный нерв
ActiGait	Германия	Резистивный датчик давления под пяткой	Имплантируемый	4	Дорсифлексия и эверсия	Большеберцовая и малоберцовая мышцы
FESIA WALK	Испания	Инерционный датчик движения	Чрескожный	Multi-rad	Дорсифлексия и плантарфлексия	Передняя большеберцовая мышца и перонеальный нерв
WalkAide	США	Датчик угла наклона — акселерометр	Чрескожный	1	Дорсифлексия	Передняя большеберцовая мышца и перонеальный нерв

**Влияние функциональной электрической стимуляции на скорость ходьбы. Сравнительная характеристика эффективности функциональной электростимуляции и голеностопного ортеза**

Проводя обзор исследований, посвященных влиянию современных устройств ФЭС на восстановление функции ходьбы у пациентов после инсульта, прежде всего мы рассматривали интересующие специалистов-реабилитологов актуальные вопросы в области восстановления ходьбы, такие как повышение скорости ходьбы, диапазон движения голеностопного сустава, клиренс стопы, улучшение кинематики и симметрии походки, уменьшение спастичности мышц, снижение энергозатрат на ходьбу, уменьшение частоты падений, способность преодоления препятствий и повышение уверенности при ходьбе, влияние на нейропластичность, комфорт использования, переносимость и скорость адаптации к ФЭС, а также проводили сравнительную характеристику эффективности с голеностопным ортезом. В табл. 3 приведен сравнительный анализ влияния голеностопного ортеза и устройства ФЭС на параметры ходьбы.

Многочисленные исследования эффективности реабилитации пациентов после инсульта свидетельствуют как об улучшении характеристик ходьбы, так и о значительном увеличении скорости ходьбы в период стимуляции по сравнению с периодом до лечения. Так, в исследованиях С. Barrett и Р. Taylor (2008) [29] эффект стимуляции был зарегистрирован уже на первой неделе лечения, а к 18-й нед — получен значительный тренировочный эффект, в том числе зарегистрировано увеличение скорости ходьбы.

Ряд исследований свидетельствует о статистически значимом улучшении скорости ходьбы во время проведения 10-минутного теста ходьбы (10 min walking test) как при отдельном использовании аппарата ФЭС, так и в сочетании с традиционной реабилитацией [30–32]. Результаты другого исследования показали статистически значимое повышение скорости ходьбы и улучшение последовательности шага после 6 мес применения ФЭС ( $p < 0,001$ ) [33].

Установлено, что включение в программу реабилитации тренировочной ходьбы, выполняемой с нейростимулятором в фазе ранней реабилитации после инсульта, способствует значительному улучшению скорости ходьбы в группе пациентов, у которых

**Таблица 3.** Сравнительный анализ влияния голеностопного ортеза и устройства функциональной электростимуляции (ФЭС) на опорно-двигательный аппарат

Воздействие на опорно-двигательный аппарат пациента	ГСО	ФЭС
Улучшение стабильности походки и баланса	Да	Да
Улучшение мобильности передвижения	Да	Да
Повышение силы и выносливости мышц	Нет	Да
Уменьшение/задержка развития мышечной атрофии	Нет	Да
Улучшение кровообращения в нижней конечности	Нет	Да
Снижение мышечного тонуса	Нет	Да
Поддержание/увеличение диапазона движений в голеностопном суставе	Нет	Да
Поддержание/увеличение плотности костной ткани	Нет	Да
Переобучение моторной функции и выработка нового стереотипа ходьбы	Нет	Да
Воздействие и восстановление нервно-мышечной системы в целом	Нет	Да

Примечание. ГСО — механический ортез для голеностопного сустава.

применялся функциональный электростимулятор (WalkAide), по сравнению с контрольной группой, которая проходила стандартную реабилитацию без его использования [34]. Кроме того, P. Taylor и соавт. (2013) [35] обнаружили, что при использовании ФЭС скорость ходьбы пациентов после инсульта в среднем на 45% больше, в том числе имел место 24% тренировочный эффект, выполнение функционального теста ходьбы (Functional ambulation categories) улучшилось на 52%. Данный тест представляет собой шестибалльную шкалу, которая оценивает способность пациента к передвижению, определяя, нуждается ли пациент в поддержке другого человека при ходьбе, независимо от того, использует или не использует пациент персональное вспомогательное устройство. Согласно результатам исследования, функциональный тест ходьбы у 22 (20%) пациентов улучшился уже в течение первого использования ФЭС, а в течение последующих 16,5 мес данный показатель увеличился до 38% [35]. Подобные результаты получили R. van Swigchem и соавт. (2012) [36]: уже через день от начала тренировки с использованием ФЭС было зарегистрировано повышение скорости ходьбы во время тестирования на преодоление препятствий.

В исследовании F. Vethoux и соавт. (2014) [37] при сравнении параметров ходьбы и качества жизни среди 495 пациентов после инсульта со свисающей стопой при применении ФЭС WalkAide и традиционного ортеза на голеностопный сустав в 30 реабилитационных исследовательских центрах США (242 человека в группе с использованием нейроортеза и 253 в группе с голеностопным ортезом) было выявлено значительное улучшение двигательной активности. Исследуемыми критериями эффективности реабилитации в рамках проведения данного исследования служили скорость ходьбы и суммарный

балл по шкале SIS (Stroke impact scale). Результаты анализа первичных критериев эффективности (скорость ходьбы и суммарный балл по шкале SIS) и первичных критериев безопасности (частота серьезных неблагоприятных явлений, связанных с использованием изделия) показали, что нейроортез не уступает голеностопным ортезам ни по одному критерию. Что касается скорости ходьбы и суммарного балла по шкале SIS, то статистически значимых различий между группами не наблюдалось. Обе группы показали статистически значимое повышение скорости ходьбы и улучшение суммарного балла по шкале SIS через 6 мес от начала исследования. Было заявлено о двух случаях серьезных нежелательных явлений, связанных с использованием голеностопного ортеза, и об отсутствии таковых в группе нейроортеза. Пациенты в группе с нейроортезом в отличие от пациентов, использующих голеностопные ортезы, также продемонстрировали статистически значимое улучшение в отношении функционального улучшения показателей ходьбы, измеряемых посредством теста mEFAP (Modified emory functional ambulation profile): тест определяет способность пациента к передвижению на разной местности с использованием вспомогательных устройств или без таковых.

Результаты данного исследования согласуются с выводом о том, что применение нейроортезов приводит к значимому улучшению функциональной способности передвижения пациентов с клинической точки зрения, и поэтому может считаться эффективной альтернативой традиционному методу фиксации свисающей стопы, в том числе у пациентов после инсульта. Данное исследование также продемонстрировало, что функциональное улучшение ходьбы может быть получено даже в хронической фазе заболевания при условии правильно подобранного лечения.

У пациентов после инсульта, использующих устройство ФЭС (Walkaide), улучшились параметры функционального равновесия и показатели способности передвигаться по дому и вне дома; улучшилось физиологическое сгибание и разгибание в голеностопном суставе с осуществлением всех моторных и сенсорных функций, присущих активному мышечному сокращению, включая повышение скорости ходьбы и улучшение общего качества ходьбы [37].

В многоцентровом рандомизированном контролируемом исследовании D. Everaert и соавт. (2013) [38] в параллельные группы были распределены 93 пациента, перенесшие инсульт в течение последних 12 мес и имеющие, как следствие, резидуальные симптомы свисающей стопы. Сравнивались клинические эффекты применения устройства ФЭС (WalkAide) и голеностопного ортеза. Результаты данного исследования наглядно продемонстрировали эффективность применения ФЭС после инсульта. Пациенты были разделены на 3 параллельные группы, каждая из которых наблюдалась в течение 12 нед (по 6 нед на каждый метод лечения): группа 1 ( $n = 38$ ) — нейроортез и затем голеностопный ортез; группа 2 ( $n = 31$ ) — голеностопный ортез и затем нейроортез; группа 3 ( $n = 24$ ) — голеностопный ортез и затем вновь голеностопный ортез. Функциональное состояние оценивали согласно скорости ходьбы и индексу физиологических затрат на основании 8 двигательных тестов. Моторное (двигательное) тестирование выполнялось с аппаратом и без аппарата на 1; 3; 6; 9 и 12-й нед. Согласно результатам исследования, оба вида аппаратной реабилитации показали значительный ортопедический и терапевтический эффект, прежде всего повышение скорости ходьбы. В то же время, если применение голеностопных ортезов оказало значительное влияние на индекс физиологических затрат и отличалось лучшим ортопедическим эффектом (значимым к 12-й нед), то использование нейроортеза способствовало в статистически значимой степени большему влиянию именно на скорость передвижения по сравнению с применением голеностопных ортезов. Участники исследования высоко оценили безопасность обоих устройств, но значительно чаще предпочитали использование нейроортеза [38].

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на диапазон движений в голеностопном суставе и клиренс стопы**

Изучение диапазона движений в голеностопном суставе и клиренса стопы (расстояние между опорой и стопой) во время ходьбы, а также способности преодоления препятствий как значимого фактора, опре-

деляющего прогноз восстановления пациентов после инсульта, стало предметом нескольких исследований, причем в некоторых из них, выполненных в Европе, а также в клинической практике использовались неинвазивные портативные ФЭС-устройства [38–41].

В исследованиях, проведенных R. van Swigchem и соавт. [42, 43], показано, что как имплантированные, так и поверхностные чрескожные устройства ФЭС позволяют пациенту достичь адекватный подъем стопы. Авторы исследований утверждают, что ФЭС применительно к перонеальной группе мышц эффективно активирует разгибатели голеностопного сустава (dorsiflexion), выводя его наружу (everseion), а также разгибатели пальцев нижней конечности. Вмешательство подобного рода может привести к значительному улучшению паттерна ходьбы и повышению ее скорости по сравнению с ходьбой без использования средств ФЭС.

В исследовании E. Gervasoni и соавт. (2017) [31] использование неинвазивной ФЭС у неврологических пациентов оказало положительный эффект на движения в голеностопном суставе, а также на увеличение клиренса стопы во время фазы переноса ноги в цикле шага.

Активация разгибателей стопы (дорсифлексия) с помощью ФЭС коррелирует с увеличением скорости походки у пациентов с инсультом. По крайней мере 11 европейских исследований продемонстрировали эффективность применения ФЭС с целью улучшения дорсифлексии и увеличения скорости ходьбы у пациентов, имеющих падающую стопу (foot drop). Еще четыре подобных рандомизированных контролируемых [30, 32, 34, 41] и одно когортное [44] исследование доказывают увеличение скорости ходьбы на фоне применения ФЭС. Так, R. van Swigchem и соавт. (2010, 2011) [42, 43] утверждают, что ФЭС перонеальной группы мышц активирует дорсифлексию и эверсию голеностопного сустава, мышцы-разгибатели пальцев нижних конечностей и способствует значительному улучшению паттерна ходьбы по сравнению с ходьбой без посторонней помощи. Авторы обнаружили, что при ФЭС углы сгибания суставов паретичной стороны схожи с аналогичными углами сгибания суставов здоровой стороны. В то же время при использовании голеностопных ортезов характер движений в суставах паретичной и здоровой конечностей существенно отличался, в частности отмечалось смещение по времени в начале фазы переноса ноги. Приведенные результаты свидетельствуют, что при использовании ФЭС характер движения суставов становится более симметричным, а диапазоны движений в голеностопном и коленном суставах и в бедре практически нормализовались



[42, 43]. Согласно исследованию T. Street и соавт. [44], ФЭС оказало наиболее значительный терапевтический и ортопедический эффект на группу пациентов, страдающих незначительными нарушениями ходьбы. По мнению авторов, для того чтобы получить бóльшую ясность в отношении эффективности терапевтического воздействия ФЭС, потребуются дополнительные исследования по применению нейрортеза не только в качестве ассистивного ортопедического устройства, но и как устройства восстановительного лечения двигательной функции.

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на кинематику и симметрию походки**

В метаанализе, проведенном S. Prenton и соавт. (2016) [45], были представлены статистически значимые доказательства эффективности применения современных устройств функциональной электрической стимуляции при свисающей стопе, обеспечивающих эффективное разгибание голеностопного сустава (дорсифлексия) и оказывающих положительное функциональное влияние на ходьбу пациентов, перенесших инсульт. При использовании данных аппаратов происходят активация голеностопного сустава, улучшение рисунка ходьбы и повышение уровня ее безопасности, что подтверждается увеличением скорости, улучшением кинематики и симметрии походки, уменьшением выраженности спастичности, компенсаторных движений и аномальных паттернов, снижением утомляемости и количества падений, повышением уверенности пациента [45].

Нарушения кинематики суставов и асимметрия походки, развивающиеся у больных после инсульта, представляют существенную проблему для проведения реабилитации и восстановления пациентов. Ряд исследований и описание клинического случая показали, что активация мышц-разгибателей стопы с помощью ФЭС коррелирует с улучшением кинематики, симметрии и паттерном походки у пациентов. Так, I. Wilkinson и соавт. (2014) [30] сообщают, что только у пациентов с применением ФЭС отмечается внутригрупповое статистически значимое улучшение по визуальному анализу походки Ривермид (Rivermead Visual Gait Analysis) уже на 8-й нед реабилитации с сохранением улучшений на 20-й нед. S. Djovic и соавт. (2017) [32] свидетельствуют, что использование ФЭС по сравнению с традиционными программами реабилитации более эффективно в отношении улучшения подвижности нижних конечностей, восстановления баланса и ежедневной жизнедеятельности. Другое рандомизированное контролируемое исследование 2017 г., в рамках

проведения которого была использована беспроводная стимуляция малоберцового нерва, где триггером являлся акселерометр (WAFES), показало, что в течение 10-недельной тренировки ходьбы улучшилась кинематика голеностопного сустава (скорость движения голеностопного сустава и максимальный угол его разгибания в пассивном режиме) и кинематика коленного сустава (сгибание коленного сустава на высокой скорости) [41].

Кинематический анализ походки до и после применения ФЭС показал увеличение скорости движения и максимального угла разгибания голеностопного сустава (дорсифлексия в пассивном режиме) и угла сгибания коленного сустава [30, 31, 46]. Было доказано, что ФЭС значительно улучшает симметрию ходьбы, измеряемую с помощью индекса асимметрии походки (Gait asymmetry index) и маркера координации между конечностями (marker of interlimb coordination), который оценивает состояние равновесия и риск падения [47, 48]. Исследования показали, что использование ФЭС может улучшить качество ходьбы путем уменьшения непостоянства походки (variability of gait). Было отмечено, что параметры непостоянства времени переноса ноги и цикла шага, ассоциируемые со стабильностью походки и риском падения, улучшаются при использовании ФЭС [47, 48].

В другом исследовании было продемонстрировано улучшение углов сгибания бедра и колена, а также улучшение симметрии движения бедра и колена во время ходьбы [42]. Данные улучшения углов сгибания, сопровождаемые улучшенным отталкиванием в конце фазы опоры стопы, в сочетании демонстрировали восстановление симметрии походки почти до нормальной [42]. Данные результаты показывают, что ФЭС улучшает не только тыльное сгибание голеностопного сустава и симметрию переноса конечностей, но и всю структуру паттерна шага [42]. Другое исследование показало, что использование ФЭС привело к улучшению визуального анализа походки Ривермид — инструмента, который оценивает степень асимметрии туловища, таза, бедра, колена и голеностопа [30]. Улучшения, показанные во всех этих исследованиях, подтверждают тот факт, что использование ФЭС может положительно повлиять на кинематику и симметрию походки пациента после инсульта.

Исследование K. Lee (2020) [49] было проведено для изучения влияния тренировки баланса с ФЭС, вызванной электромиограммой (ЭМГ), для улучшения статического баланса, динамического баланса и активации мышц голеностопного сустава у пациентов с инсультом. Сорок девять участников (> 6 мес после инсульта) были случайным образом распределены в экспериментальную ( $n = 25$ ) и контрольную

( $n = 24$ ) группы. Экспериментальная группа прошла тренировку баланса с ФЭС, запускаемой ЭМГ, в течение 40 мин/день 5 дней/нед на протяжении 6-недельного периода в дополнение к общей реабилитации. Контрольная группа прошла тренировку баланса без ФЭС, вызванной ЭМГ, наряду с традиционной терапией. Результаты измерения включали в себя способность к статическому и динамическому равновесию, а также активацию мышц ног. Способности к статическому и динамическому равновесию были значительно улучшены после вмешательства в обеих группах ( $p < 0,05$ ), хотя в экспериментальной продемонстрировано большее улучшение, чем в контрольной ( $p < 0,05$ ). Активация мышц ног на пораженной стороне привела к значительным улучшениям в экспериментальной группе ( $p < 0,05$ ) по сравнению с исходным уровнем, но не в контрольной группе. Тренировка баланса с помощью ФЭС, запускаемой ЭМГ, является приемлемым и эффективным вмешательством для улучшения статического баланса, динамического баланса и активации мышц голеностопного сустава у пациентов с инсультом [49].

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на затрачиваемую энергию при ходьбе и уровень активности пациента**

Цель исследования, проведенного S. Matsumoto и соавт. (2019) [50], заключалась в изучении влияния нейроортеза ФЭС на функциональное восстановление и активность повседневной жизни пациентов с симптомами свисающей стопы после инсульта. Участники проводимого исследования ( $n = 203$ ; мужчин — 154, женщин — 49; время после инсульта  $61,6 \pm 31,5$  дней) были рандомизированы в группы ФЭС и контроля. Пациенты обеих групп использовали стандартную программу реабилитации, которая включала в себя переобучение походки, тренировку походки с помощью ортопедического устройства и растяжение мышц. В дополнение к стандартным реабилитационным процедурам пациенты группы ФЭС участвовали в тренировке с электростимулятором в течение 40 мин/день по 5 раз/нед на протяжении 8 нед. Функциональное восстановление оценивали с использованием шестиминутного теста ходьбы, активного диапазона движения при сгибании голеностопного сустава (A-ROM) и теста на скорость (Timed up and go). Активность пациента в повседневной жизни оценивали с помощью 10-метрового теста ходьбы (10MWT), шкалы оценки качества жизни после инсульта (Stroke impact scale) и удовлетворенности пациентов. После проведенных интервенций были получены значительные улучшения в обеих группах, согласно тестам 6MWT, 10MWT, Timed up

and go и Stroke impact scale, по сравнению с исходным уровнем ( $p < 0,0001$ ). Однако значительное улучшение активного сгибания голеностопного сустава было продемонстрировано только в группе пациентов, которым проводилась ФЭС ( $p = 0,0011$ ). Согласно опроснику удовлетворенности, пациенты отдали предпочтение использованию нейроортеза вместо ортопедического устройства ( $p < 0,0001$ ). Результаты текущего исследования продемонстрировали эффективность ФЭС и в отношении функционального восстановления, а также положительное влияние ФЭС на активность пациента после инсульта в повседневной жизни [50].

Для более точного определения прогноза в отношении восстановления пациентов после инсульта необходимо опираться не только на функциональное улучшение походки, но и на энергетические затраты, необходимые на осуществление ходьбы. Важным аспектом, связанным с походкой, при котором пациенты получают пользу от применения ФЭС, является прилагаемое усилие на ходьбу или энергозатраты (расчет энергозатрат возможен в том числе с помощью метабологафа). Пациенты сообщают, что ходьба с помощью ФЭС гораздо «менее утомительна». Факты свидетельствуют о том, что использование ФЭС оказывает положительное воздействие на усилие, необходимое для передвижения [51–54]. Во всех исследованиях, кроме одного [55], для оценки прилагаемых усилий при ходьбе использовался индекс физиологических затрат (Physiologic cost index, PCI), который представляет собой линейную корреляцию между частотой дыхания и частотой сердечных сокращений. Снижение показателя PCI указывает на более низкие затраты энергии. Результаты исследований продолжительностью от 4,5 до 12 мес показали, что ходьба требует значительно меньших усилий при использовании ФЭС, при этом показатель PCI колебался от 10 до 31% [51, 54].

В двухлетнем исследовании эффективности использования ФЭС после инсульта был произведен пространственный кинематический и кинетический анализ паттерна ходьбы на произвольной скорости, выбранной пациентом, сначала идущим без стимулятора, а потом с включенным стимулятором, а также сравнение результатов с контрольной группой, которую составляли здоровые лица. Энергозатраты измерялись с помощью показателя суммарной работы (выработка и поглощение энергии). Выявлено, что энергозатраты, производимые паретичной ногой (как со стимулятором малоберцового нерва, так и без него), были значительно ниже ( $p = 0,005$ ), чем у контролатеральной конечности. Отклонения от контрольной группы наблюдались как на паретичной, так

и на контралатеральной стороне, а эффективность ходьбы была на 57% ниже по сравнению со здоровыми испытуемыми. При использовании электростимулятора скорость ходьбы в группе пациентов после инсульта увеличилась в среднем с 0,77 до 0,84, при этом не наблюдалось увеличения нагрузки на суставы. Были также показаны значительно меньшие общие энергозатраты при ходьбе у пациентов с инсультом при включенном ФЭС по сравнению с контрольной группой. Таким образом, стимулятор малоберцового нерва можно использовать в качестве средства коррекции движения голеностопа у пациентов после инсульта, не повышая энергозатраты и не вызывая увеличения нагрузки на суставы нижних конечностей [56].

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на нейропластичность**

В ранних исследованиях было показано, что физические тренировки оптимизируют задействованные в выполнении функций участки головного мозга, в результате чего человек начинает выполнять многие задачи автоматически. Принцип действия стимуляционных технологий заключается в активации функционально значимых зон головного мозга за счет интенсивной афферентации (периферическая стимуляция–электромиостимуляция) или за счет прямого воздействия (центральные стимуляционные технологии). Целенаправленная интенсивная афферентация со стимулируемых мышц паретичных конечностей способствует растормаживанию временно инактивированных нервных элементов вблизи очага деструкции, помогает в тренировке новых двигательных навыков [57–60]. В работе С. Н. Бушневой и соавт. (2007) [61] с применением функциональной магнитно-резонансной томографии с двигательной парадигмой показано, что после физического тренинга у здоровых испытуемых наблюдается усиление активации основных зон сенсомоторной коры и дополнительных зон в обоих полушариях мозжечка, мозолистом теле, премоторной коре. В группе больных с постинсультным гемипарезом после тренировки отмечалось усиление активации в периинфарктной зоне сенсомоторной коры, в полушариях мозжечка, а также в гомологичных зонах здорового полушария.

По мнению врачей-неврологов, результаты исследований ФЭС, которые демонстрируют положительные нейропластические изменения в корковой активности и моторном контроле, являются наиболее интересными находками. Рассмотрим несколько исследований, где корковая активность измерялась посредством фиксации изменений в вызванных двигательных потенциалах (Motor evoked potential, МЕР)

и где было обнаружено улучшение МЕР при использовании ФЭС [51].

Пластичность моторного контроля была продемонстрирована в 4 исследованиях, результаты которых отмечали увеличение произвольной мышечной активности и максимального произвольного сокращения передней большеберцовой мышцы [51–54]. Эти увеличения корковой активации и мышечной активности были связаны с изменениями в центральной нервной системе, а не с тренировкой или укреплением паретичной передней большеберцовой мышцы. Нейропластические изменения в моторном контроле также можно измерить по улучшению скорости походки, которая сохраняется даже при выключенном устройстве ФЭС. Несколько исследований [53, 55] обнаружили терапевтическое влияние ФЭС на скорость ходьбы, отметив увеличение скорости походки без стимуляции от 14 до 31% [52, 54]. Исследования, проведенные с пациентами после инсульта, позволяют предположить, что повторяющаяся ФЭС постепенно может способствовать восстановлению нейронных путей, контролирующих сокращения мышц.

Исследованиями нейровизуализации идентифицированы различные корковые механизмы в зависимости от типа стимуляции. Выявлено, что перфузия в ипсилезиональную (т.е. на стороне поражения) сенсорно-моторную кору и возбудимость коры головного мозга увеличивались при использовании ФЭС по сравнению с пассивными моделями электростимуляции. Результаты исследований могут указывать на больший потенциал влияния динамической ФЭС на процессы нейропластичности [62–64].

В систематическом обзоре литературы L. Chipchase и соавт. (2011) [65] проводилось исследование влияния ФЭС на кортикальную пластичность у здоровых людей с применением различных параметров настройки, таких как время действия, амплитуда потенциалов и интенсивность электростимуляции. Изучены работы, в которых оценивалась пластичность первичной моторной коры у взрослых, а также исследования, которые оценивали пластичность, используя изменение амплитуды потенциалов, вызванных транскраниальной магнитной стимуляцией моторной коры. Результаты данных исследований убедительно свидетельствуют, что периферическая электростимуляция наиболее устойчиво влияла на модуляцию возбудимости кортикотомоторного пути в стимулированных мышцах. Для повышения возбудимости стимуляция должна быть выше моторного порога (SMD 0,79 мВ, доверительный интервал от -0,10 до 1,64). Кроме того, проявлялся эффект времени, т.е. более длительные периоды

электростимуляции вызывали более устойчивые изменения возбудимости коры. Авторы делают вывод о необходимости проведения дальнейших исследований с последовательной методологией и большим количеством испытуемых [65].

В рамках проведения двух упомянутых выше исследований, посвященных изучению влияния ФЭС на корковую активность с помощью изменений в соматосенсорных вызванных потенциалах, был обнаружен достоверный факт улучшения МЕР при использовании ФЭС, позволяющий предположить, что регулярное использование ФЭС усиливает активацию моторных корковых зон и их остаточных нисходящих связей. Обнаруженная закономерность в значительной мере объясняет благоприятное терапевтическое влияние применения ФЭС на скорость ходьбы [51, 53].

Пластичность моторного контроля была продемонстрирована и в ряде других исследований, результаты которых отмечали увеличение произвольного мышечного сокращения и максимального произвольного сокращения (maximum voluntary contraction, MVC) передней большеберцовой мышцы [66, 67]. Данные улучшения в корковой активации и мышечной активности были связаны именно с изменениями в структурной и функциональной организации центральной нервной системы, а не с тренировкой или укреплением пораженной передней большеберцовой мышцы.

Нейропластические изменения в моторном контроле также можно оценить и по увеличению скорости ходьбы. Результаты ряда вышеперечисленных исследований подтвердили терапевтическое влияние ФЭС на скорость ходьбы, отметив увеличение скорости ходьбы в диапазоне от 14 до 31%, что осталось и после выключения стимуляции ФЭС [48, 52–55].

Таким образом, были продемонстрированы положительные нейропластические изменения в корковой активности и моторном контроле при использовании ФЭС. Повторяющаяся ФЭС пораженной конечности обладает большим потенциалом в области восстановления двигательных функций и улучшения механики ходьбы, а также имеет отличную перспективу в развитии новых нейронных путей.

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на состояние тонуса мышц нижней конечности**

Спастичность рассматривается как двигательное нарушение, как часть синдрома поражения верхнего мотонейрона, характеризуемого скоростьюзависимым повышением мышечного тонуса и сопровождаемого повышением сухожильных рефлексов в результате

гипервозбудимости рецепторов растяжения. Явления спастичности, развивающиеся у пациентов после инсульта, представляют значительную проблему для реабилитации. Некоторые авторы полагают, что синдром спастичности является одним из основных факторов неблагоприятного реабилитационного прогноза, ограничивающего эффективность реабилитации больных с инсультом [1].

В литературе имеется ограниченное количество данных, посвященных влиянию ФЭС на состояние мышечного тонуса у пациентов с инсультом. М. Ghedira и соавт. (2017) [41] считают, что при гемипарезе беспроводная ФЭС, применяемая к малоберцовому нерву, может обладать естественными реабилитационными свойствами. В рамках проведенного авторами исследования анализируется эффективность применения ФЭС в 10-недельной реабилитационной программе у 20 взрослых пациентов с давно возникшим гемипарезом (время после поражения составляло 6–7 лет) и проводится сравнение применения ФЭС с традиционной терапией. Курс включал ежедневную ходьбу в течение 45 мин с использованием ФЭС ( $n = 10$ ), традиционные физические упражнения  $3 \times 45$  мин/нед ( $n = 10$ ). Для оценки результатов использовали измерение скорости, длину шага, частоту шага, максимальную амплитуду и скорость движения бедра, колена и голеностопного сустава во время ходьбы на обычной для пациентов и быстрой скорости без использования и с использованием ФЭС. Была проведена оценка спастичности и силы мышц до и после программы. Выявлено, что улучшение кинематики и спастичности произошло только в группе, где использовался ФЭС: зарегистрировано 15% снижение уровня степени спастичности мышц-сгибателей стопы с помощью ФЭС. После 10 нед тренировки с использованием ФЭС улучшилась кинематика голеностопного и коленного сустава по сравнению с группой, где проводилась только физическая реабилитация [41].

В нескольких исследованиях изучено влияние ФЭС на спастичность мышц-разгибателей путем измерения уровня спастичности в икроножной мышце-антагонисте [34, 36], и в ряде из них обнаружено улучшение показателей спастичности по модифицированной шкале Эшворта (Modified Ashworth scale) и по шкале композитной спастичности (Composite Spasticity Score) [34]. Так, в исследовании Т. Yan и соавт. [39] после 3 нед лечения процент по композитной шкале спастичности (composite spasticity score, CSS) в группе ФЭС составил  $31 \pm 35\%$ , что значительно ниже, чем в группе плацебо и в контрольной группе ( $50 \pm 88$  и  $65 \pm 65\%$  соответственно, оба  $p < 0,05$ ). Другое исследование продемонстрировало

уменьшение выраженности спастичности латеральной головки икроножной мышцы на паретичной ноге при использовании ФЭС перонеального нерва для сокращения пораженной передней большеберцовой мышцы. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что функциональная стимуляция малоберцового нерва для сокращения передней большеберцовой мышцы также ингибирует икроножную мышцу антагониста [36].

В рамках одного из рандомизированных контролируемых исследований изучалось влияние сочетанного использования ботулинического токсина (ВТХ) типа А и функциональной электростимуляции при лечении свисающей стопы у пациентов ( $n = 21$ ), перенесших год назад инсульт [67], 18 из которых успешно завершили исследование. Все пациенты получали по одной инъекции ВТХ (Диспорт) в медиальную и латеральную головки икроножных мышц (по 200U в каждую), а также в заднюю большеберцовую мышцу (по 400U в каждую). В группе ФЭС проводилась электротерапия ежедневно в течение 16 нед с целью улучшения навыков ходьбы. В обеих группах — с/без ФЭС — пациенты занимались физическими упражнениями. За основу оценки результатов были взяты такие показатели, как скорость ходьбы, индекс физиологических затрат, модифицированная шкала Эшворта, оценка двигательной активности Ривермид и опросник состояния здоровья пациента. После 12 нед лечения средняя скорость ходьбы увеличилась как в контрольной группе с ФЭС ( $P = 0,042$ , на 0,09 м/с), так и в группе без стимуляции ( $P = 0,004$ , на 0,04 м/с), что позволило сделать вывод, что комбинированное лечение ботулотоксином и ФЭС достоверно улучшает двигательную функцию и ходьбу [67].

Из проанализированных нами исследований позволим себе заключить, что ФЭС может в потенциале положительно повлиять на уровень спастичности нижних конечностей у пациентов после инсульта в случае правильного сочетания с физическими упражнениями и другими реабилитационными процедурами, благоприятно влияющими на мышечный тонус.

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на частоту падений**

В литературе имеется ограниченное количество данных, посвященных влиянию ФЭС на профилактику падений у пациентов с инсультом. Несмотря на невозможность полного предотвращения падений в учреждениях медицинской реабилитации, проведение адекватной оценки и принятие необходимых профилактических мер приводит к снижению частоты случаев падений, особенно падений с тяжелыми последствиями [68]. Ряд исследований последних

лет демонстрирует, что доказательная база для подтверждения эффективности какого-либо метода лечебного воздействия на частоту падения пациентов отсутствует [69].

В исследовании по преодолению препятствий неврологическими пациентами было обнаружено меньшее количество падений у пациентов, пользующихся ФЭС для перонеальной (малоберцовой) группы мышц, по сравнению с ходьбой без каких-либо ортопедических устройств. Улучшенное разгибание стопы с помощью ФЭС коррелирует с большим клиренсом во время преодоления препятствий и снижением количества падений у пациентов с инсультом [48, 55].

Проспективное лонгитюдное исследование, а также исследование с описанием клинических случаев R. van Swigchem и соавт. (2011) [42] показали, что использование ФЭС при дорсифлексии увеличивало клиренс стопы и степень обхода препятствий наряду со значительным снижением падений. Степень преодоления препятствий была выше при использовании поверхностного и имплантированного ФЭС (68 и 90% соответственно), чем при использовании голеностопных ортезов (0–17%). Использование ФЭС оказывало благоприятное влияние на походку, уменьшая количество падений и улучшая ходьбу. При этом наблюдалось положительное воздействие на голеностопный сустав (увеличился клиренс во время фазы переноса ноги).

В исследовании E. Gervasoni и соавт. (2017) [31] было отмечено общее статистически значимое улучшение клиренса стопы через 4 нед использования ФЭС. Наряду с улучшением клиренса стопы авторы также сообщили о статистически значимом снижении количества падений (с десяти падений в начале исследования до двух падений после восьминедельных тренировок ходьбы). Кроме того, уменьшение падений и улучшение дорсифлексии голеностопного сустава коррелировали с показателями выносливости и скорости ходьбы, о чем свидетельствует более высокая скорость походки во время проведения 10-минутного теста ходьбы по сравнению с первым этапом исследования [31]. Обнадеживает и тот факт, что улучшенный паттерн походки и увеличенный клиренс стопы при использовании ФЭС позитивно воздействует на частоту падений пациентов после инсульта.

### **Влияние функциональной электрической стимуляции на уровень независимости, комфорт и качество жизни пациентов**

Ранее проведенные исследования показали, что ощущение комфорта и уровень качества жизни пациентов коррелируют с улучшением активации раз-

гибателей стопы (дорсифлексия), что в свою очередь достигается с помощью ФЭС.

Результаты многочисленных исследований (рандомизированные контролируемые феноменологические, исследования единого дизайна, когортные и ретроспективные) убедительно продемонстрировали положительную корреляцию при использовании ФЭС с относительным улучшением качества жизни, повышением уверенности и самооценки пациентов. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что учет предпочтений пациентов крайне важен в отношении различных состояний, влияющих на выбор начала лечения, приверженность к лечению, удовлетворенность от результатов и сами результаты лечения [70].

S. Dujović и соавт. (2017) [32] сообщили, что терапия ФЭС в сочетании с традиционной реабилитацией более эффективна в отношении воздействия на нарушенный баланс и на повседневную активность по сравнению со стандартной программой реабилитации. Результаты исследования 16 пациентов, перенесших инсульт, которые случайным образом были распределены в группу терапии ФЭС вместе со стандартной программой реабилитации ( $n = 8$ ) и контрольную группу только со стандартной программой ( $n = 8$ ), показали значительное увеличение скорости походки в группе ФЭС ( $p < 0,001$ ), улучшение функциональной независимости в повседневной жизни, в двигательном восстановлении и походке. Согласно результатам исследования, выполненным I. Wilkinson и соавт. (2014) [30], интеграция ФЭС в программу физической терапии осуществима и необходима для улучшения ходьбы пациентов. В исследовании S. Prenton и соавт. (2016) [45] практически все пациенты отдали предпочтение использованию ФЭС и связали это с возможностью более свободного осуществления движений в голеностопном суставе, более безопасной и комфортной ходьбой, а также большей самостоятельностью.

Пациенты, которые предпочли ФЭС, отметили, что такой вид реабилитации в отличие от использования обычных голеностопных ортезов требовал меньшего уровня осознанного обращения внимания на процесс ходьбы, что может быть связано с пониженным чувством осознанности наличия инвалидности («функция ходьбы как у нормального человека»), а также с удобством и комфортом [70].

Пациенты сообщают, что ФЭС превосходит обычные голеностопные ортезы по некоторым ключевым характеристикам походки и воздействию на их способность ходить. Также пациенты отмечали большую стабильность походки при применении ФЭС, что может быть особенно актуально при ходьбе по неровной и пересеченной местности [43].

ФЭС для коррекции свисающей стопы после инсульта обладает также положительным психоэмоциональным воздействием, а именно благотворным влиянием на уровень восприятия пациентом его качества жизни, уровень адаптивности к электротерапии и степень самоутверждения вследствие психоэмоционального благополучия. Уровень адаптивности был связан с чувством полезности для здоровья и чувством приобретения определенной свободы вследствие эксплуатации устройства, а самоутверждение отражало влияние ФЭС на уверенность в себе и чувство благополучия [35].

Исследователи K. Wilkie и соавт. (2012) [71] на основании полученных ими данных пришли к выводу, что использование ФЭС статистически значимо влияет на улучшение 4 крайне важных для пациентов аспектов жизнедеятельности, в частности: «ходить с ФЭС гораздо легче»; «ФЭС помогла восстановить контроль над жизнью»; «хорошее самочувствие приходит с использованием ФЭС»; «ФЭС не идеален, но обладает высокой ценностью» [71].

Технологии ФЭС в настоящее время представлены по всему миру, помогают десяткам тысяч взрослых и детей восстановить опорно-двигательные функции и, соответственно, улучшить качество различных аспектов жизнедеятельности.

### **Перспективы использования функциональной электрической стимуляции**

В будущем доступность ФЭС-систем будет зависеть от их наличия в реабилитационных и протезно-ортопедических центрах, доступной цены устройств для целевой аудитории, а также от возможности получения денежной компенсации от территориальных органов Фонда социального страхования, включения нейроортезов в индивидуальные программы реабилитации.

В сложившейся системе медико-социальной реабилитации обеспечение техническими средствами реабилитации зависит от уровня ограничения жизнедеятельности и уровня реабилитационного потенциала пациентов. Согласно Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья, степень ограничения жизнедеятельности подразделяется на абсолютные (96–100%), тяжелые (50–95%), умеренные (25–49%) и легкие (5–24%) нарушения функций. При умеренных нарушениях функций (шкала реабилитационной маршрутизации — 3 балла, шкала количественной оценки мышечной силы — 3 балла, шкала функциональной независимости — 54–95 баллов) рекомендуются ходунки (шагающие,

на колесах, с опорой и другие), трость четырехопорная с широким основанием, костыли подмышечные с устройством противоскольжения, ортезы, бандажи на плечевой и коленный сустав, тугор на кисть, стоподержатель и другие приспособления [72, 73].

ФЭС является клинически доказанным инструментом, который может помочь врачам физической и реабилитационной медицины достичь оптимальных функциональных результатов у людей с поражением верхних мотонейронов. Важными компонентами системы являются простота ее эксплуатации врачом и пациентом, способность к быстрой самонастройке, современный дизайн и возможность подбора наиболее комфортных параметров стимуляции с точки зрения ощущения пациентом. Также добавление в ФЭС системы технологии обратной связи для оказания более точной стимуляции в естественные фазы иннервации и сокращения мышц позволит расширить применение ФЭС в разнообразных клинических случаях.

Будущие аппараты будут являться системами closed-loop и иметь возможность обратной связи от мышцы и нерва благодаря применению технологии, использующей электромиографию и электронейрографию. Кроме того, безусловно, будут также совершенствоваться многоканальные стимуляторы, которые позволят синхронно активизировать в движении различные суставы (голеностопный, коленный, тазобедренный).

Комбинирование импульсов переменной и постоянной частоты также может играть важную роль в снижении утомляемости и достижении лучших терапевтических результатов. Область нейроортезирования выиграет и от более глубокого понимания кинематических, кинетических и нервно-мышечных последствий стимуляции.

Безусловно, необходимо развивать методику электростимуляции при восстановлении полностью денервированных мышц с использованием продолжительной ширины импульса (LPWS).

Устройства ФЭС смогут стать для пациентов, перенесших инсульт, практическими техническими средствами реабилитации, позволяющими в значительной степени улучшить их мобильность в повседневной жизнедеятельности, превратить ходьбу в абсолютно безопасный и независимый от посторонней помощи двигательный акт, а также достичь скорости ходьбы здоровых людей [74, 75].

Для выяснения и анализа дополнительного потенциала использования устройств функциональной электростимуляции крайне важными представляются дальнейшие активные клинические наблюдения

и исследования эффективности реабилитации пациентов после инсульта, использующих аппараты ФЭС в повседневной жизнедеятельности.

### Заключение

Таким образом, кратко- и долгосрочное использование устройств, использующих ФЭС является потенциально эффективной стратегией улучшения биомеханических и нейрофизиологических параметров ходьбы пациентов, перенесших инсульт.

Функциональная электростимуляция, согласно результатам многочисленных исследований, является эффективным и безопасным методом нормализации ходьбы. Крайне важно, что ФЭС проводится во время ходьбы именно в тот момент двойного шагового цикла, когда должна включаться передняя большеберцовая мышца, что усиливает ее сокращение и значительно улучшает рисунок походки пациента.

В результате многочисленных исследований получены убедительные свидетельства того, что функциональная электрическая стимуляция с использованием низкочастотных сигналов для активации нервно-мышечных компонентов разгибателей стопы способствует значительному улучшению моторной функции и безопасности ходьбы неврологических пациентов посредством улучшения ее скорости и качества походки, повышения функциональной подвижности, снижения энергозатрат на ходьбу, а также запуска механизмов нейропластичности.

Одним из преимуществ технологии ФЭС при ходьбе является возможность ее использования как в рамках комплексной реабилитации, так и после проведения стандартного курса реабилитации. В последнем случае аппарат ФЭС используется пациентом в повседневной жизни в привычных комфортных домашних условиях.

ФЭС, способствуя увеличению объема движений пациентов, представляет собой одно из эффективных направлений восстановительного лечения, основанного на принципах моторного переобучения. Как показывают результаты различных исследований, повышению эффективности использования ФЭС способствует максимально частое ее применение в адекватных дозах и в наиболее соответствующем контексте терапии в период реабилитации.

Анализ данных литературы убедительно свидетельствует о том, что применение технологий ФЭС является неотъемлемой частью реабилитационного лечения пациентов, перенесших инсульт, и при наличии у больного двигательных расстройств функциональная электростимуляция приобретает ведущее значение в программе нейрореабилитации.

### Источник финансирования

Исследование и публикация статьи осуществлены на личные средства авторского коллектива. Поисково-аналитическая работа проведена на личные средства авторского коллектива.

### Конфликт интересов

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

### Участие авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию до публикации.

### Выражение признательности

Мы благодарим Gary Viles, директора по продажам и операциям на внутреннем и международном рынках корпорации Accelerated Care Plus, за помощь в сборе материала для обзора.

### Список литературы / References

1. Абабков В.А., Авакян Г.Н., Авдюнина И.А., и др. *Неврология: национальное руководство*: в 2 томах / Под ред. Е.И. Гусева, А.Н. Коновалова, В.И. Скворцовой. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1. — М., 2018. [Ababkov VA, Avakyan GN, Avdyunina IA, et al. *Nevrologiya: natsional'noye rukovodstvo*. Ed by E.I. Gusev, A.N. Kononov, V.I. Skvortsova. 2nd ed. revised and updated. Vol. 1. Moscow; 2018. (In Russ.)]
2. Weerdesteyn V, de Niet M, van Duijnhoven HJ, et al. Falls in individuals with stroke. *J Rehabil Res Dev*. 2008; 45(8):1195–1213.
3. Lin PY, Yang YR, Cheng SJ, Wang RY. The relation between ankle impairments and gait velocity and symmetry in people with stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 2006;87(4): 562–568. doi: 10.1016/j.apmr.2005.12.042.
4. Lamontagne A, Malouin F, Richards CL. Contribution of passive stiffness to ankle plantarflexor moment during gait after stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 2000;81(3):351–358. doi: 10.1016/s0003-9993(00)90083-2.
5. Taga G. A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment of human locomotion during obstacle avoidance. *Biol Cybern*. 1998;78(1):9–17. doi: 10.1007/s004220050408.
6. Weerdesteyn V, Nienhuis B, Duysens J. Advancing age progressively affects obstacle avoidance skills in the elderly. *Hum Mov Sci*. 2005;24(5-6):865–880. doi: 10.1016/j.humov.2005.10.013.
7. Schmid A, Duncan PW, Studenski S, et al. Improvements in speed-based gait classifications are meaningful. *Stroke*. 2007;38(7):2096–2100. doi: 10.1161/STROKEAHA.106.475921.
8. Hsu AL, Tang PF, Jan MH. Analysis of impairments influencing gait velocity and asymmetry of hemiplegic patients after mild to moderate stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 2003;84(8):1185–1193. doi: 10.1016/s0003-9993(03)00030-3.
9. Wei TS, Liu PT, Chang LW, Liu SY. Gait asymmetry, ankle spasticity, and depression as independent predictors of falls in ambulatory stroke patients. *PLoS One*. 2017; 12(5):e0177136. doi: 10.1371/journal.pone.0177136.
10. Motl RW, Sandroff BM, Suh Y, Sosnoff JJ. Energy cost of walking and its parameters, daily activity and fatigue in persons with mild to moderate multiple sclerosis. *Neurorehabil Neural Repair*. 2012;26(8):1015–1021. doi: 10.1177/1545968312437943.
11. De Groot MH, Phillips SJ, Eskes GA. Fatigue associated with stroke and neurologic conditions: implications for stroke rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil*. 2003;84(11):1714–1720. doi: 10.1053/s0003-9993(03)00346-0.
12. Алферова В.В., Белкин А.А., Вознюк И.А., и др. *Клинические рекомендации по ведению больных с ишемическим инсультом и транзиторными ишемическими атаками* / Под ред. Л.В. Стаховской. — М., 2017. — 196 с. [Alferova VV, Belkin AA, Voznyuk IA, et al. *Klinicheskiye rekomendatsii po vedeniyu bol'nykh s ishemicheskim insul'tom i tranzitornymi ishemicheskimi atakami*. Ed by L.V. Stakhovskaya. Moscow; 2017. 196 p. (In Russ.)]
13. Диагностика и реабилитация нарушений функции ходьбы и равновесия при синдроме центрального гемипареза в восстановительном периоде инсульта // *Вестник восстановительной медицины*. — 2016. — № 2. — С. 69–85. [Diagnostika i reabilitatsiya narusheniy funktsii khod'by i ravnovesiya pri sindrome tsentral'nogo gemipareza v vosstanovitel'nom periode insul'ta. *Journal of restorative medicine & rehabilitation*. 2016;(2):69–85. (In Russ.)]
14. Stroke rehabilitation in adults. *National Institute for Health and Care Excellence*. 2013. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/cg162>.
15. Functional electrical stimulation for drop foot of central neurological origin. *National Institute for Health and Care Excellence*. 2009. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ipg278>.
16. National clinical guideline for stroke. *Stroke guidelines. Royal College of Physicians*. 2016. Available from: <https://www.rcplondon.ac.uk/guidelines-policy/stroke-guidelines>.
17. Hebert D, Lindsay MP, McIntyre A, et al. Canadian stroke best practice recommendations: Stroke rehabilitation practice guidelines, update 2015. *Int J Stroke*. 2016;11(4): 459–484. doi: 10.1177/1747493016643553.
18. 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.



19. Liberson WT, Offner FF. Method of muscular stimulation in human being to aid in walking. 1967.
20. Moe JH, Post HW. Functional electrical stimulation for ambulation in hemiplegia. *Lancet*. 1962;82:285–288.
21. Витензон А.С., Петрушанская К.А. Физиологические обоснования метода искусственной коррекции движений посредством программируемой электростимуляции мышц при ходьбе // *Российский журнал биомеханики*. — 2010. — Т. 14. — № 2. — С. 7–27. [Vitenzon AS, Petrushanskaya KA. Fiziologicheskiye obosnovaniya metoda iskusstvennoy korrektsii dvizheniy posredstvom programmiruyemyoy elektrostimulyatsii myshts pri khod'be. *Russian Journal of Biomechanics*. 2010;14(2):7–27. (In Russ).]
22. Витензон А.С., Петрушанская К.А. К фазовому анализу ходьбы и некоторых ритмических движений человека // *Российский журнал биомеханики*. — 2005. — Т. 9. — № 1. — С. 19–35. [Vitenzon AS, Petrushanskaya KA. K fazovomu analizu khod'by i nekotorykh ritmicheskikh dvizheniy cheloveka. *Russian Journal of Biomechanics*. 2005;9(1):19–35. (In Russ).]
23. Николаев А.А. *Электростимуляция в спорте*. Учебное пособие для студентов и преподавателей академий и институтов физической культуры. — Смоленск, 1999. — 74 с. [Nikolayev AA. *Elektrostimulyatsiya v sporte*. Uchebnoye posobiye dlya studentov i преподаvateley akademiya i institutov fizicheskoy kul'tury. Smolensk; 1999. 74 p. (In Russ).]
24. Nussbaum EL, Houghton P, Anthony J, et al. Neuromuscular electrical stimulation for treatment of muscle impairment: critical review and recommendations for clinical practice. *Physiother Can*. 2017;69(5):1–76. doi: 10.3138/ptc.2015-88.
25. Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomed Eng Online*. 2020;19(1):34. doi: 10.1186/s12938-020-00773-4.
26. Miller L, Rafferty D, Paul L, Mattison P. A comparison of the orthotic effect of the odstock dropped foot stimulator and the walkaide functional electrical stimulation systems on energy cost and speed of walking in multiple sclerosis. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2015;10(6):482–485. doi: 10.3109/17483107.2014.898340.
27. Gil-Castillo J, Fady A, Aikaterini K, et al. Advances in neuroprosthetic management of foot drop: a review. *J Neuroeng Rehabil*. 2020;17(1):46. doi: 10.1186/s12984-020-00668-4.
28. Dobkin BH, Xu X, Batalin M, et al. Reliability and validity of bilateral ankle accelerometer algorithms for activity recognition and walking speed after stroke. *Stroke*. 2011;42(8):2246–2250. doi: 10.1161/STROKEAHA.110.611095.
29. Barrett C, Taylor P. The effects of the odstock drop foot stimulator on perceived quality of life for people with stroke and multiple sclerosis. *Neuromodulation*. 2010; 13(1):58–64. doi: 10.1111/j.1525-1403.2009.00250.x.
30. Wilkinson IA, Burridge J, Strike P, Taylor P. A randomized controlled trial of integrated electrical stimulation and physiotherapy to improve mobility for people less than 6 months post stroke. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2015; 10(6):468–474. doi: 10.3109/17483107.2014.917125.
31. Gervasoni E, Parelli R, Uszynski M, et al. Effects of functional electrical stimulation on reducing falls and improving gait parameters in multiple sclerosis and stroke. *PMR*. 2017;9(4):339–347.e1. doi: 10.1016/j.pmrj.2016.10.019.
32. Dujovic S, Malesevic J, Malesevic N, et al. Novel multi-pad functional electrical stimulation in stroke patients: A single-double blind randomized study. *Neurorehabilitation*. 2017;41(4):791–800. doi: 10.3233/NRE-172153.
33. Shiels J, Wilkie K, Bulley C, et al. A mixed methods service evaluation of a pilot functional electrical stimulation clinic for the correction of dropped foot in patients with chronic stroke. *Prim Health Care Res Dev*. 2011;12(3):187–199. doi: 10.1017/S1463423611000016.
34. Morone G, Fusco A, Di Capua P, et al. Walking training with foot drop stimulator controlled by a tilt sensor to improve walking outcomes: a randomized controlled pilot study in patients with stroke in subacute phase. *Stroke Res Treat*. 2012;2012:523564. doi: 10.1155/2012/523564.
35. Taylor P, Humphreys L, Swain I. The long-term cost-effectiveness of the use of Functional Electrical Stimulation for the correction of dropped foot due to upper motor neuron lesion. *J Rehabil Med*. 2013;45(2):154–160. doi: 10.2340/16501977-1090.
36. Van Swigchem R, van Duijnhoven HJ, den Boer J, et al. Effect of peroneal electrical stimulation versus an ankle-foot orthosis on obstacle avoidance ability in people with stroke-related foot drop. *Phys Ther*. 2012;92(3):398–406. doi: 10.2522/ptj.20100405.
37. Bethoux F, Rogers HL, Abrams GM, et al. The effects of peroneal nerve functional electrical stimulation versus ankle-foot orthosis in patients with chronic stroke: a randomized controlled trial. *Neurorehabilitation Neural Repair*. 2014; 28(7):688–697. doi: 10.1177/1545968314521007.
38. Everaert DG, Stein RB, Abrams GM, et al. Effect of a foot-drop stimulator and ankle-foot orthosis on walking performance after stroke: a multicenter randomized controlled trial. *Neurorehabil Neural Repair*. 2013;27(7): 579–591. doi: 10.1177/1545968313481278.
39. Yan TB, Hui-Chan CW, Li LS. [Effects of functional electrical stimulation on the improvement of motor function of patients with acute stroke: a randomized controlled trial. (In Chinese)]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*. 2006; 86(37):2627–2631.
40. Sheffler LR, Taylor PN, Gunzler DD, et al. Randomized controlled trial of surface peroneal nerve stimulation for motor relearning in lower limb hemiparesis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2013;94(6):1007–1014. doi: 10.1016/j.apmr.2013.01.024.
41. Ghedira M, Albertsen I, Mardale V, et al. Wireless, accelerometer-triggered peroneal nerve stimulation in spastic paraparesis: A randomized, controlled pilot. *Assist Technol*. 2017;29(2):99–105. doi: 10.1080/10400435.2016.1214933.
42. Van Swigchem R, Weerdesteyn V, van Duijnhoven HJ, et al. Near-Normal gait pattern with peroneal electrical

- stimulation as a neuroprosthesis in the chronic phase of stroke: a case report. *Arch Phys Med Rehabil.* 2011; 92(2):320–324. doi: 10.1016/j.apmr.2010.10.038.
43. Van Swigchem R, Vioothuis J, den Boer J, et al. Is transcutaneous Peroneal stimulation beneficial to patients with chronic stroke using an ankle-foot orthosis? A within subjects study of patients' satisfaction, walking speed and physical activity level. *J Rehabil Med.* 2010;42(2):117–121. doi: 10.2340/16501977-0489.
  44. Street T, Swain I, Taylor P. Training and orthotic effects related to functional electrical stimulation of the peroneal nerve in stroke. *J Rehabil Med.* 2017;49(2):113–119. doi: 10.2340/16501977-2181.
  45. Prenton S, Hollands KL, Kenney LP. Functional electrical stimulation versus ankle foot orthoses for foot-drop: a meta-analysis of orthotic effects. *J Rehabil Med.* 2016;48(8):646–656. doi: 10.2340/16501977-2136.
  46. Da Cunha MJ, Rech KD, Salazar AP, Pagnussat AS. Functional electrical stimulation of the peroneal nerve improves post-stroke gait speed when combined with physiotherapy. A systematic review and meta-analysis. *Ann Phys Rehabil Med.* 2020;S1877-0657(20)30091-9. doi: 10.1016/j.rehab.2020.03.012.
  47. 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.
  48. Hausdorff JM, Ring H. Effects of a new radio frequency-controlled neuroprosthesis on gait symmetry and rhythmicity in patients with chronic hemiparesis. *Am J Phys Med Rehabil.* 2008;87(1):4–13. doi: 10.1097/PHM.0b013e31815e6680.
  49. Lee K. Balance training with electromyogram-triggered functional electrical stimulation in the rehabilitation of stroke patients. *Brain Sci.* 2020;10(2):80. doi: 10.3390/brainsci10020080.
  50. Matsumoto S, Shimodozono M, Noma T. Rationale and design of the therapeutic effects of peroneal nerve functional electrical stimulation for lower extremity in patients with convalescent poststroke hemiplegia (RALLY) study: study protocol for a randomised controlled study. *BMJ Open.* 2019;9(11):e026214. doi: 10.1136/bmjopen-2018-026214.
  51. Street T, Swain I, Taylor P. Training and orthotic effects related to functional electrical stimulation of the peroneal nerve in stroke. *J Rehabil Med.* 2017;49(2):113–119. doi: 10.2340/16501977-2181.
  52. Everaert DG, Thompson AK, Chong SL, Stein RB. Does functional electrical stimulation for foot drop strengthen corticospinal connections? *Neurorehabil Neural Repair.* 2010;24(2):168–177. doi: 10.1177/1545968309349939.
  53. Stein RB, Chong SL, Everaert DG, et al. A multicenter trial of a footdrop stimulator controlled by a tilt sensor. *Neurorehabil Neural Repair.* 2006;20(3):371–379. doi: 10.1177/1545968306289292.
  54. 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.
  55. Taylor PN, Burridge JH, Dunkerley AL, et al. Clinical use of the oddstock dropped foot stimulator: its effect on the speed and effort of walking. *Arch Phys Med Rehabil.* 1999;80(12):1577–1583. doi: 10.1016/s0003-9993(99)90333-7.
  56. Laufer Y, Ring H, Sprecher E, Hausdorff JM. Gait in individuals with chronic hemiparesis: one-year follow-up of the effects of a neuroprosthesis that ameliorates foot drop. *J Neurol Phys Ther.* 2009;33(2):104–110. doi: 10.1097/NPT.0b013e3181a33624.
  57. Voigt M, Sinkjaer T. Kinematic and kinetic analysis of the walking pattern in hemiplegic patients with foot-drop using a peroneal nerve stimulator. *Clin Biomech.* 2000;15(5):340–351. doi: 10.1016/s0268-0033(99)00082-0.
  58. Сидякина И.В., Воронова М.В., Снопков П.С., и др. Современные методы реабилитации постинсультных больных // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* — 2014. — Т. 114. — № 12–2. — С. 76–80. [Sidiakina IV, Voronova MV, Snopkov PS, et al. **Modern methods of rehabilitation for poststroke patients.** S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2014;114(12–2):76–80. (In Russ).]
  59. Тихоплав О.А., Иванова В.В., Гурьянова Е.А., Иванов И.Н. Эффективность роботизированной механотерапии комплекса “Lokomat PRO” у пациентов, перенесших инсульт // *Вестник восстановительной медицины.* — 2019. — № 5. — С. 57–64. [Tihoplav OA, Ivanova VV, Guryanova EA, Ivanov IN. Efficiency of robotized mechanotherapy of the complex “Lokomat PRO” in patients, carrying outsulated. *Journal of restorative medicine & rehabilitation.* 2019;(5):57–64. (In Russ).]
  60. Кадыков А.С., Шахпаронова Н.В., Белопасова А.В., Пряников И.В. Нейропластичность и восстановление нарушенных функций после инсульта // *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* — 2019. — Т. 2. — № 2. — С. 32–36. [Kadykov AS, Shakhparonova NV, Belopasova AV, Prjanikov JV. A neuroplasticity and functional restoration after stroke. *Russian Journal of the Physial Therapy, Balneotherapy and Rehabilitation.* 2019;2(2):32–36. (In Russ).]
  61. Бушенева С.Н., Кадыков А.С., Черникова Л.А. Влияние восстановительной терапии на функциональную организацию двигательных систем после инсульта // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* — 2007. — Т. 1. — № 2. — С. 4–8. [Busheneva SN, Kadykov AS, Chernikova LA. Vliyanie vosstanovitel'noy terapii na funktsional'nyuyu organizatsiyu dvigatel'nykh sistem posle insul'ta. *Annals of clinical and experimental neurology.* 2007;1(2):4–8. (In Russ).]
  62. Eraifej J, Clark W, France B, et al. Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis. *Syst Rev.* 2017; 6(1):40. doi: 10.1186/s13643-017-0435-5.
  63. Hara Y. Rehabilitation with functional electrical stimulation in stroke patients. *Int J Phys Med Rehabil.* 2013;1(6):147. doi: 10.4172/2329-9096.1000147.

64. Joa KL, Han YH, Mun CW, et al. Evaluation of the brain activation induced by functional electrical stimulation and voluntary contraction using functional magnetic resonance imaging. *J Neuroeng Rehabil.* 2012;9:48. doi: 10.1186/1743-0003-9-48.
65. Chipchase LS, Schabrun SM, Hodges PW. Peripheral electrical stimulation to induce cortical plasticity: a systematic review of stimulus parameters. *Clin Neurophysiol.* 2011;122(3):456–463. doi: 10.1016/j.clinph.2010.07.025.
66. Kottink AI, Hermens HJ, Nene A, et al. **Therapeutic effects of an implantable Peroneal nerve stimulator in subjects with chronic stroke and footdrop: a randomized clinical trial.** *Phys Ther.* 2008;88(4):437–448. doi: 10.2522/ptj.20070035.
67. Burridge JH, McLellan DL. Relation between abnormal patterns of muscle activation and response to common peroneal nerve stimulation in hemiplegia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 2000;69(3):353–361. doi: 10.1136/jnnp.69.3.353.
68. Burridge J, Strike P, Wood DE, Swain ID. The effect of combined use of botulinum toxin type a and functional electric stimulation in the treatment of spastic drop foot after stroke: a preliminary investigation. *Arch Phys Med Rehabil.* 2004;85(6):902–909. doi: 10.1016/j.apmr.2003.08.081.
69. Луцки Л., Трегер Ю. Оценка качества медицинской реабилитации // *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* — 2020. — Т. 2. — № 1. — С. 39–48. [Lutsky L, Treger I. Quality assessment in medical rehabilitation. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2020;2(1):39–48. (In Russ).] doi: 10.36425/rehab19266.
70. Cameron ID, Dyer SM, Panagoda CE, et al. Interventions for preventing falls in older people in care facilities and hospitals. *Cochrane Database Syst Rev.* 2018;9(9):CD005465. doi: 0.1002/14651858.CD005465.pub4.
71. Bulley C, Shiels J, Wilkie K, Salisbury L. User experiences, preferences and choices relating to functional electrical stimulation and ankle foot orthoses for foot-drop after stroke. *Physiotherapy.* 2011;97(3):226–233. doi: 10.1016/j.physio.2010.11.001.
72. Wilkie KM, Shiels JE, Bulley C, Salisbury LG. “Functional electrical stimulation (FES) impacted on important aspects of my life”: a qualitative exploration of chronic stroke patients’ and carers’ perceptions of FES in the management of dropped foot. *Physiother Theory Pract.* 2012;28(1):1–9. doi: 10.3109/09593985.2011.563775.
73. Бодрова Р.А., Аухадеев Э.И., Ахунова Р.Р., Хусаинова Э.Р. Подходы к выбору технических средств реабилитации с помощью МКФ // *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* — 2019. — Т. 4. — № 4. — С. 64–71. [Bodrova RA, Aukhadeev EI, Akhunova RR, Khusainova ER. Approaches to the technical means of rehabilitation selection using the ICF. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2019;4(4):64–71. (In Russ).] doi: 10.36425/2658-6843-2019-4-64-71.
74. Пузин С.Н., Гречко А.В., Пряников И.В., и др. Медико-социальная реабилитация как основа преодоления ограничений жизнедеятельности граждан с нарушением здоровья и их социализации // *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* — 2019. — Т. 3. — № 3. — С. 44–53. [Puzin SN, Grechko AV, Pryanikov IV, et al. Medical-social rehabilitation as the basis of overcoming the limitations of living activities of citizens with disturbances of health and their socialization. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2019;3(3):44–53. (In Russ).] doi: 10.36425/2658-6843-2019-2019-3-44-53.
75. Klochkov AS, Khizhnikova AE, Kotov-Smolenskiya AM, et al. Modern technologies of functional stimulation in central paresis. *Human Physiology.* 2019;45(3):342–348. doi: 10.1134/S0362119719030071.

### Информация об авторах

**Е. А. Гурьянова**, д.м.н., доцент [Evgenia A. Guryanova, MD, PhD]; адрес: 428027, Россия, Чувашская Республика, Чебоксары, ул. М. Сеспеля, д. 27 [address: 27, M. Sospel str., Chuvash Republic, 428027 Cheboksary, Russia]; e-mail: z-guryanova@bk.ru, SPIN-код: 1234-3410  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1519-2319>

**В. В. Ковальчук**, д.м.н., профессор [Vitaliy V. Kovalchuk, MD, PhD]; e-mail: vikoval67@mail.ru  
**О. А. Тихоплав** [Oleg A. Tikhoplav]; e-mail: olegtihoplav@hotmail.com, SPIN-код: 8893-5721  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-6656>  
**Ф. Г. Литвак** [Felix G. Litvak]; e-mail: felix.litvak@integral-its.ru, SPIN-код: 8435-6912