

*Амамчян А. Э., Папахчян А. Н.
Ростовский государственный медицинский университет
Ростов-на-Дону, Россия
amashot2011@mail.ru*

ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ МЫШЦ В СПОРТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ: ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотация. Высокий уровень физической активности в спорте неизбежно приводит к значительному риску получения травм. Постоянное, чрезмерное напряжение на тело во время тренировок и соревнований значительно увеличивает вероятность повреждений различной степени тяжести. В этой связи в обзоре проведён анализ отечественной и зарубежной литературы, посвящённый разработке и внедрению эффективных методов профилактики спортивного травматизма, а также разработке инновационных подходов к реабилитации спортсменов после полученных травм. Анализ существующих исследований позволяет сделать вывод о том, что функциональная программируемая электрическая стимуляция (ФПЭС) представляет собой перспективный метод как для профилактики, так и для лечения спортивных травм. По итогам систематизации данных авторами даётся заключение, что, несмотря на очевидные преимущества данной электростимуляции, её применение в спорте находится пока на стадии активного развития и исследования. Тем не менее, существующие данные дают основание считать ФПЭС перспективным инструментом в арсенале спортивной медицины, способным значительно сократить риск травматизма и улучшить результаты спортивной подготовки.

Ключевые слова: «спортивный травматизм», «функциональная программируемая электрическая стимуляция», «реабилитация», «мышечная усталость», «опорно-двигательный аппарат», «восстановление».

*Amamchyan A. E., Papakhchyan A. N.
Rostov State Medical University
Rostov-on-Don, Russia
amashot2011@mail.ru*

THE PHYSIOLOGICAL RATIONALE FOR THE USE OF FUNCTIONAL PROGRAMMABLE MUSCLE ELECTRICAL STIMULATION IN SPORTS MEDICINE: A REVIEW OF SCIENTIFIC LITERATURE

Abstract. A high level of physical activity in sports inevitably leads to a significant risk of injury. Constant, excessive stress on the body during training and competition significantly increases the likelihood of injury of varying severity. In this regard, the review analyzes domestic and foreign literature on the development and implementation of effective methods for the prevention of sports injuries, as well as the development of innovative approaches to the rehabilitation of athletes after injuries. An analysis of existing studies

allows us to conclude that functional programmable electrical stimulation (FPES) is a promising method for both the prevention and treatment of sports injuries. Based on the results of the data systematization, the authors conclude that, despite the obvious advantages of this electrical stimulation, its use in sports is still at the stage of active development and research. Nevertheless, the existing data give reason to consider FPES to be a promising tool in the arsenal of sports medicine, capable of significantly reducing the risk of injury and improving athletic training results.

Keywords: *«sports injury», «functional programmable electrical stimulation», «rehabilitation», «muscle fatigue», «musculoskeletal system», «recovery».*

Актуальность. Спорт, как высокоинтенсивная деятельность, неизбежно сопряжён с риском травм, поскольку постоянные, часто чрезмерные нагрузки, характерные для тренировочного процесса и соревнований, приводят к значительным изменениям в функциональном состоянии организма спортсмена. Несмотря на низкий процент спортивного травматизма в России (около 10%), абсолютные цифры немаленькие, если учесть массовость занятий спортом [1]. Так, по данным Министерства спорта РФ, в 2023 году спортом или физической культурой занимались **75,729 млн человек**.

В связи с этим возникает необходимость усовершенствования мер, направленных на профилактику травматизма, а также поиска методов, способствующих восстановлению функциональных возможностей спортсменов.

В спортивном травматизме отмечается преимущественно поражение суставов – 38%, ушибы – 31%, переломы – 9%, вывихи – 4%. В зимний период травм больше (до 51%), чем в летний период (21,8%), весной и осенью – 27,5%. [2]. К основным причинам спортивного травматизма относятся: недостаточная физическая подготовка, неправильная техника выполнения упражнений, неадекватные тренировочные нагрузки, недостаточное

снаряжение и несоответствие спортивного инвентаря требованиям безопасности, неблагоприятные погодные условия, а также игнорирование сигналов тела о переутомлении или боли. Эффективное сотрудничество спортивного врача, тренера и самого спортсмена является залогом успеха в профилактике травматизма [1]. Важно также отметить роль инновационных методов восстановления утраченных функций вследствие спортивного травматизма, например, применение функциональной программируемой электрической стимуляции (ФПЭС) [3]. Данный метод направлен на активную стимуляцию повреждённых нервных волокон, что, может способствовать усилению пластичности нервных центров [4].

Цель исследования. Множество научных статей посвящено эффективному применению ФПЭС в нейрореабилитации: при инсультах, травмах спинного мозга, ДЦП. Методика направлена на активацию повреждённых нервных путей, восстановление контроля над парализованными конечностями, усиление активности сохранившихся нейронных связей, стимуляцию рефлексорных дуг [5; 6]. Вопрос же об эффективности применения ФПЭС при нарушениях опорно-двигательного аппарата, в частности в спортивной медицине, до сих ак-

туален и остаётся открытым для обсуждения. В связи с этим, целью настоящего обзора является обобщение и анализ накопленных сведений о применении ФПЭС у спортсменов.

Методы исследования. Для осуществления поставленной цели был проведён систематический поиск в базах данных PubMed, КиберЛенинка, eLIBRARY, MEDLINE, Medscape, GoogleScholar. Поиск осуществляли по следующим ключевым словам и их сочетаниям: «функциональная программируемая электрическая стимуляция», «спортивный травматизм», «спортивная травма», «спортивная медицина», «functional electrical stimulation», «sports injury», «sports medicine» «biochemistry of skeletal muscles».

Результаты. *Влияние ФПЭС на состояние мышц.* Механизм действия функциональной программируемой электрической стимуляции направлен прежде всего на увеличение площади волокон и количества капилляров в мышце. Так, в 1999 году канадскими учёными было проведено лонгитюдное обучение [7], целью которого являлось определение влияния тренировок на велоэргометре с функциональной электростимуляцией на гистохимические характеристики мышц. Шесть человек с полным параличом нижних конечностей (возраст 31-50 лет; 3-25 лет после травмы) тренировались с помощью велоэргометра ФПЭС в течение 30 минут 3 раза в неделю в течение 8 недель. До и после тренировочных процессов были взяты биопсии латеральной широкой мышцы бедра и проанализированы на предмет состава волокон, их размера и капилляризации. Большинство мышечных волокон были отнесены ко 2 типу до и после тренировки. Результаты показали, что сред-

няя площадь волокон увеличилась на 23 % ($p < 0,05$), а количество капилляров увеличилось на 39 % ($p < 0,05$) при тренировке.

Немаловажным является изучение биохимических изменений углеводов в мышцах при применении ФПЭС. Jordi Rovira, Jose Maria Irimia, Mario Guerrero et al. в 2012 году [8] провели исследование, в ходе которого определили роль фруктозо-2,6-бисфосфата в контроле гликолиза в мышцах во время сокращения с помощью функциональной электростимуляции. Для проведения эксперимента был использован метод хронической низкочастотной стимуляции передней большеберцовой мышцы кроликов, который длился 24 часа, после чего последовал 48-часовой период отдыха. Результаты показали, что уровень фру-2,6-бисфосфата увеличивался в течение 24 часов стимуляции и оставался на повышенном уровне даже после периода отдыха. Этот метаболит оказался единственным, который сохранял изменения, вызванные хронической низкочастотной стимуляцией в течение отдыха. Гликолитический путь в мышцах, которые подвергались стимуляции, а также в тех, что находились в состоянии отдыха, был более активен по сравнению с контрольными мышцами. Это совпадало с повышенной активностью фермента 6-фосфофруктозо-2-киназы/фруктозо-2,6 бисфосфатазы. Дополнительно было зафиксировано снижение экспрессии изоформы 6-фосфофруктозо-2-киназы/фруктозо-2,6-бисфосфатазы в мышцах, печени и других тканях, в то время как в сердце наблюдалось увеличение экспрессии этой изоформы. То есть благодаря исследованию можно сделать вывод, что ФПЭС увеличивает концентрацию

фруктозо-2,6-бисфосфата и усиливает гликолитические изменения в мышцах.

Использование ФПЭС в спортивной медицине. В ходе исследования B.R. Seeger, D Law, J.E. Creswell et al. в 1989 году [9] первоначальные предположения о значительном превосходстве ФЭС над традиционными изометрическими упражнениями не подтвердились в рамках проведенного перекрестного исследования с участием семи пациентов. Участники в течение одинаковых периодов времени выполняли как упражнения с использованием ФЭС, так и обычные изотонические упражнения, направленные на тренировку отдельных мышц рук. Несмотря на применение функциональной электростимуляции, которая стимулирует мышцы электрическими импульсами, вызывая их сокращение, статистически значимого увеличения максимальной произвольной силы рук у пациентов не наблюдалось ни в группе с ФЭС, ни в контрольной группе. Результаты данного исследования, несмотря на их негативность, имеют важное значение. Они указывают на необходимость более тщательного планирования и проведения исследований, а также более детального анализа факторов, влияющих на эффективность ФЭС в реабилитации пациентов.

Не так давно, в 2019 году, группой израильских специалистов было проведено рандомизированное контролируемое пилотное исследование [10; 11; 12], нацеленное на изучение целесообразности применения функциональной электростимуляции четырехглавой мышцы бедра (ФЭС) во время ходьбы в дополнение к стандартной реабилитации на начальном этапе восстановления после повреждения передней крестообразной связки.

Стоит сказать, что травма передней крестообразной связки является одной из самых частых повреждений в спорте. По данным в обзоре Стива Боллена повреждения ПКС даже опережают по частоте травмы менисков [13]. В исследовании приняли участие пациенты, которые были случайным образом распределены на две группы: на первую группу воздействовали ФПЭС, синхронизированной с ходьбой ($n = 10$), а вторая группа проходила курс нейромышечной электрической стимуляции (НМЭС), которая чаще используется для устранения слабости четырехглавой мышцы бедра, с циклом работы – 10 секунд включения и 10 секунд выключения ($n = 13$). Обе группы получали терапию в течение 10 минут три раза в неделю в дополнение к стандартной программе реабилитации. Обследования проводились за 2 недели до **реконструкции передней крестообразной связки** и по истечении 4 недель. Результаты исследования показали, что у пациентов из обеих групп наблюдалось восстановление скорости и симметрии походки к уровню, существовавшему до операции, через 4 недели реабилитации, при этом между группами не было выявлено значительных различий. Однако, несмотря на то, что максимальная сила квадрицепсов до реконструкции была одинаковой в обеих группах (ФПЭС – 205 Н·м, НМЭС – 225 Н·м, $p = 0,605$), у участников группы ФПЭС было восстановлено 82% от первоначальной силы квадрицепсов по сравнению с 47% в группе НМЭС ($p = 0,02$). Кроме того, через 4 недели в группе ФЭС сила между конечностями была значительно выше: $0,63 \pm 0,15$ против $0,39 \pm 0,18$ в группе НМЭС ($p = 0,01$). Анализ полученных данных свидетельствует о

том, что, хотя пространственно-временные параметры походки не различались между группами, кинетические исследования могут быть полезны для дальнейшего понимания эффектов функциональной программируемой электрической стимуляции четырехглавой мышцы после реконструкции передней крестообразной связки.

В то же время в исследованиях сотрудников Федерального государственного учреждения «Федеральное бюро медико-социальной экспертизы» ФМБА России А. Л. Успенского и М. А. Дымочки в 2011 году [14] было показано, что метод функциональной электростимуляции мышц позволяет уменьшить дефицит мышечной функции, выработать правильный двигательный стереотип и нормализовать работу мышц оперированной конечности спортсмена. Исследование было посвящено оценке эффективности функциональной программируемой электростимуляции мышц нижней конечности у спортсменов после артроскопии коленного сустава. В исследовании приняли участие 47 спортсменов с различными видами спортивных травм коленного сустава, перенёсших артроскопию от 3 до 12 месяцев назад. Все пациенты прошли стандартный курс реабилитации, однако у 95% на момент начала исследования сохранялся стойкий дефицит мышечной силы сгибателей и разгибателей голени от 12 до 40 % по сравнению со здоровой ногой. Было принято решение использовать метод функциональной электростимуляции мышц при ходьбе. Курс лечения проводился на аппаратно-программном комплексе «АкорД» (15 сеансов по 60 минут), который определяет периоды электрического воздействия на мышцы и вызывает со-

кращение мускулатуры в фазе её естественной работы при ходьбе у здорового человека. Результаты показали, что у пациентов, получавших курс ФПЭС мышц при ходьбе, увеличилась максимальная электрическая активность мышц в 1,5 раза. Амплитуда вращательных движений таза в среднем уменьшилась на 25,3 %, плечевого пояса на 28,3 %. Было отмечено улучшение работы мышц в цикле шага: появились чёткие максимумы электрической активности мышц и были оптимизированы временные рамки работы мышц.

Однако при разработке устройств функциональной электростимуляции необходимо соблюдать предельную осторожность, потому что электрический ток, проходящий через ткани организма, может привести к неблагоприятным последствиям, таким как снижение возбудимости, нарушение целостности клетки, утечка внутриклеточного содержимого. Не исключена возможность гибели клетки вследствие термического повреждения, электропорации клеточной мембраны, токсичных продуктов электрохимических реакций на поверхности электрода или чрезмерного возбуждения целевых нейронов или мышц [15].

Критическим ограничением клинического применения функциональной электростимуляции для реабилитационных упражнений является быстрое наступление мышечной усталости. В исследовании Gongkai Ye, Pirashanth Theventhiran, Kei Masani в 2022 году [16] была продемонстрирована эффективность пространственно распределенной последовательной стимуляции (SDSS) в снижении мышечной усталости при функциональной электрической стимуляции в сравнении с тради-

ционной одноэлектродной стимуляцией (SES). Предыдущие исследования показали преимущество SDSS при движениях в одном суставе. Однако, данная работа пошла дальше, оценивая эффективность SDSS в более реалистичной и сложной ситуации – при выполнении гребли, моделирующей реальные условия использования ФЭС в реабилитации. Исследование включало 15 участников трудоспособного возраста (5 женщин и 10 мужчин), у которых проводились тесты на утомляемость мышц во время гребли с использованием как SDSS, так и SES. Стимуляция фокусировалась на четырёхглавой мышце бедра и подколенных сухожилиях – ключевых группах мышц, участвующих в поддержании равновесия и генерации силы при гребле. Важно отметить, что участники гребли с произвольным усилием рук, стараясь при этом максимально расслабить ноги, что приближает эксперимент к реальным условиям реабилитации, где пациент должен сосредоточиться на выполнении движения, а не на напряжении стимулируемых мышц. Утомляемость характеризовалась временем, прошедшим до процентного снижения мощности (TTF), а также продолжительностью испытания, указывающей время, прошедшее до полной остановки гребли. Результаты показали, что В гребле на SDSS длина дистанции была значительно больше, чем на SES (t-критерий, $d=0,71$), при этом среднее соотношение длины дистанции SDSS:SES составило $1,31 \pm 0,47$. TTF SDSS был значительно длиннее, чем TTF SES, при этом медианное соотношение TTF SDSS : TTF SES составляло 1,34 в диапазоне от 1,03 до 5,41 (ранговая сумма Уилкоксона, $r=0,62$). Ни у одного гребца не

наблюдалось снижения TTF при использовании SDSS. В заключение, исследование демонстрирует значительное преимущество SDSS над SES в снижении мышечной усталости при выполнении сложного двигательного действия, такого как гребля, с использованием ФПЭС.

Поражение суставов далеко не единственная травма в спорте. Переломы занимают третью позицию в наиболее частых травмах в спорте (9%) [3]. Поэтому целесообразно рассмотреть эффективность применения функциональной программируемой электрической стимуляции после переломов, в частности после перелома самой крупной трубчатой кости человеческого организма. Перелом бедренной кости - серьёзная травма, при которой нарушается целостность кости и опорная функция. В 2015 году группой американских специалистов было проведено исследование [17], в ходе которого мужчина с хронической параплегией в течение 6 месяцев проходил терапию езды на велосипеде с применением ФПЭС. В ходе эксперимента в независимых от исследования обстоятельствах у мужчины случился перелом бедренной кости. Пациент, однако, продолжил лечение. Показатели исследования включали площадную минеральную плотность костной ткани, микроархитектуру трабекулярной кости, макроархитектуру кортикальной кости, сывороточные маркеры костеобразования / резорбции и мышечный объем. Испытуемый добился незначительного улучшения показателей, связанных с состоянием костей и мышц. Костные маркеры не вернулись к исходному уровню до возобновления велоспорта, что могло повлиять на результаты. Этот случай показывает, что

после перелома дистального отдела бедренной кости можно безопасно возобновить езду на велосипеде с ФПЭС.

ФПЭС на практике применяется не только для восстановления после травм, но и с целью повышения функционального резерва в норме. Так, в исследованиях Thomas Aout, Mickaël Begon, Nicolas Peyrot et al. в 2022 году [18; 19; 20] была выдвинута гипотеза, что применение ФПЭС к икроножной и/или камбаловидной мышцам во время фазы отталкивания повысит мощность голеностопного сустава и, как следствие, усилит поступательное движение вперёд при ходьбе у взрослых людей трудоспособного возраста. Трёхглавая мышца, состоящая из икроножной и камбаловидной мышц, играет важную роль в движении вперед при ходьбе, обеспечивая мощное отталкивание от опоры во время ходьбы и бега. Пятнадцать молодых людей ходили с самостоятельно выбранной скоростью при четырёх условиях: без стимуляции, с двусторонней стимуляцией камбаловидной, икроножной и обеих мышц одновременно. Мышцы стимулировались чуть ниже порога дискомфорта во время отталкивания, то есть от пятки к носку. Результаты исследования продемонстрировали статистически значимое увеличение мощности голеностопного сустава при использовании ФПЭС. Увеличение составило от 22 % до 28 %, в зависимости от стимулируемой мышцы (или комбинации мышц). Параллельно с этим наблюдалось повышение толкающей силы (от +15% до +18%) и скорости ходьбы (от +14% до +20%). Кроме того, скорость ходьбы была значительно выше (+ 5%) при комбинированной стимуляции камбаловид-

ной мышцы и икроножной мышцы по сравнению с одной стимуляцией икроножной мышцы, что свидетельствует о синергическом эффекте совместной работы этих мышц. Полученные данные указывают на значительный потенциал ФПЭС в улучшении параметров ходьбы.

Заключение. Анализ научной литературы показывает, что ФПЭС пока не получила широкого распространения в спортивной медицине. Наиболее перспективная и развивающаяся область применения ФПЭС – лечение повреждений коленного сустава. Исследования показывают, что функциональная электростимуляция способствует значительному сокращению времени реабилитации после спортивных травм. Более того, она демонстрирует потенциал для повышения физических возможностей даже у здоровых людей, увеличивая их функциональные резервы. Таким образом, хотя применение ФПЭС в спорте пока ограничено, её потенциал для лечения травм, особенно коленного сустава, и улучшения спортивной подготовки не вызывает сомнений и активно изучается.

Список литературы

1. Шихов, А. В. Медико-педагогические аспекты спортивного травматизма / А. В. Шихов, Г. И. Семёнова // Учеб. пособ. Мин-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – С. 128.
2. Агранович, В. О. Анализ спортивного травматизма при занятиях физической культурой и спортом и создание условий по его снижению / В. О. Агранович, Н. В. Агранович // Здоровье и образование в XXI веке.

Журнал научных статей, 2017. – №2. – С. 77-81.

3. Vitenzon, A. S. Functional electrostimulation of muscles as a method for restoring motor functions / A. S. Vitenzon, E. M. Mironov, K. A. Petrushanskaya // Neuroscience and behavioral physiology. – 2005. – №35 (7). – P. 709-714.

4. Амамчян, А. Э. Нейропластичность как основа двигательной реабилитации / А. Э. Амамчян, Г. Ш. Гафиятуллина // Медицинский вестник Юга России. – 2023. – №14 (4). – С. 122-128.

5. Juckett, L. The Effect of Electrical Stimulation on Nerve Regeneration Following Peripheral Nerve Injury / L. Juckett, T. M. Saffari, B. Ormseth, J. L. Senger, A. M. Moore // Biomolecules. – 2022. – №12 (12). – P. 1856.

6. Zuo, K. J. Electrical stimulation to enhance peripheral nerve regeneration: Update in molecular investigations and clinical translation / K. J. Zuo, T. Gordon, K. M. Chan, G. H. Borschel // Experimental neurology. – 2020. – №332. – P. 113397.

7. Chilibeck, P. D. Histochemical changes in muscle of individuals with spinal cord injury following functional electrical stimulated exercise training / P. D. Chilibeck, J. Jeon, C. Weiss, G. Bell, R. Burnham // Spinal cord. – 1999. – № 37 (4). – P. 264-268.

8. Rovira, J. Upregulation of heart PFK-2/FBPase-2 isozyme in skeletal muscle after persistent contraction / J. Rovira, J. M. Irimia, M. Guerrero, J. A. Cadefau, R. Cusso // Pflugers Archiv : European journal of physiology. – 2012. – № 463 (4). – P.603-613.

9. Seeger, B. R. Functional electrical stimulation for upper limb strengthening in traumatic quadriplegia / B. R. Seeger, D. Law, J. E. Creswell, L. M. Stern,

G. Potter // Archives of physical medicine and rehabilitation. – 1989. – № 70 (9). – P.663-667.

10. Moran, U. Functional electrical stimulation following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled pilot study / U. Moran, U. Gottlieb, A. Gam, S. Springer // Journal of neuroengineering and rehabilitation. – 2019. – № 16 (1). – P.89.

11. Lepley, L. K. Deficits in Quadriceps Strength and Patient-Oriented Outcomes at Return to Activity After ACL Reconstruction: A Review of the Current Literature / L. K. Lepley // Sports health. – 2015. – №7 (3). – P.231-238.

12. Zwolski, C. The influence of quadriceps strength asymmetry on patient-reported function at time of return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction / C. Zwolski, L. C. Schmitt, C. Quatman-Yates, S. Thomas, T. E. Hewett, M. V. Paterno // The American journal of sports medicine. – 2015. – № 43 (9). – P. 2242-2249.

13. Bollen, S. Epidemiology of knee injuries: diagnosis and triage / S. Bollen // British journal of sports medicine. – 2000. – №34 (3). – С.227-228.

14. Успенский, А. С. Применение функциональной электростимуляции мышц в комплексном восстановительном лечении спортивной травмы коленного сустава» / А. С. Успенский М. А. Дымочка // Спортивная медицина. Здоровье и физическая культура. Сочи 2011: М-лы Всерос. науч. - практ. конф., – Сочи, 2011.

15. Reichel, M. Simulation of the three-dimensional electrical field in the course of functional electrical stimulation / M. Reichel, T. Breyer, W. Mayr, F. Ratay // Artificial organs. – 2002. – №26 (3). – P. 252-255.

16. Ye, G. Effect of Spatially Distributed Sequential Stimulation on Fatigue in Functional Electrical Stimulation Rowing / G. Ye, P. Theventhiran, K. Masani // IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – 2022. – № 30. – P. 999-1008.

17. Johnston, T. E. Cycling with Functional Electrical Stimulation Before and After a Distal Femur Fracture in a Man with Paraplegia / T. E. Johnston, R. J. Marino, C. V. Oleson, M. Schmidt-Read, C. M. Modlesky // Topics in spinal cord injury rehabilitation. – 2015. – №21 (4). – P. 275-281.

18. Aout, T. Société de Biomécanique young investigator award 2022: Effects of applying functional electrical stimulation to ankle plantarflexor muscles on forward propulsion during walking in young healthy adults / T. Aout, M. Begon, N. Peyrot, T. Caderby // Journal of biomechanics. – 2024. – №168. – P. 112114.

19. Aout, T. Effects of Functional Electrical Stimulation on Gait Characteristics in Healthy Individuals: A Systematic Review / T. Aout, M. Begon, B. Jegou, N. Peyrot, T. Caderby // Sensors (Basel, Switzerland). – 2023. – № 23 (21). – P.8684.

20. Browne, M. G. Does dynamic stability govern propulsive force generation in human walking? / M. G. Browne, J. R. Franz // Royal Society open science. – 2017. – №4 (11). – P.171673.

References

1. Shihov, A. V. Medikopedagogicheskie aspekty sportivnogo travmatizma / A. V. Shihov, G. I. Semyonova // Ucheb. posob. Min-vo nauki i

vysshego obrazovaniya RF. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2020. – С. 128.

2. Agranovich, V. O. Analiz sportivnogo travmatizma pri zanyatiyah fizicheskoy kul'turoj i sportom i sozdanie uslovij po ego snizheniyu / V. O. Agranovich, N. V. Agranovich // Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke. Zhurnal nauchnyh statej, 2017. – №2. – S. 77-81.

3. Vitenzon, A. S. Functional electrostimulation of muscles as a method for restoring motor functions / A. S. Vitenzon, E. M. Mironov, K. A. Petrushanskaya // Neuroscience and behavioral physiology. – 2005. – №35 (7). – P. 709-714.

4. Amamchyan, A. E. Nejroplastichnost' kak osnova dvigatel'noj rehabilitacii / A. E. Amamchyan, G. Sh. Gafiyatullina // Medicinskij vestnik Yuga Rossii. – 2023. – №14 (4). – С. 122-128.

5. Juckett, L. The Effect of Electrical Stimulation on Nerve Regeneration Following Peripheral Nerve Injury / L. Juckett, T. M. Saffari, B. Ormseth, J. L. Senger, A. M. Moore // Biomolecules. – 2022. – №12 (12). – P. 1856.

6. Zuo, K. J. Electrical stimulation to enhance peripheral nerve regeneration: Update in molecular investigations and clinical translation / K. J. Zuo, T. Gordon, K. M. Chan, G. H. Borschel // Experimental neurology. – 2020. – №332. – P. 113397.

7. Chilibeck, P. D. Histochemical changes in muscle of individuals with spinal cord injury following functional electrical stimulated exercise training / P. D. Chilibeck, J. Jeon, C. Weiss, G. Bell, R. Burnham // Spinal cord. – 1999. – № 37 (4). – P. 264-268.

8. Rovira, J. Upregulation of heart PFK-2/FBPase-2 isozyme in skeletal muscle after persistent contraction / J. Rovira, J. M. Irimia, M. Guerrero, J. A. Cadefau, R. Cusso // Pflugers Ar-

chiv : European journal of physiology. – 2012. – № 463 (4). – P.603-613.

9. Seeger, B. R. Functional electrical stimulation for upper limb strengthening in traumatic quadriplegia / B. R. Seeger, D. Law, J. E. Creswell, L. M. Stern, G. Potter // Archives of physical medicine and rehabilitation. – 1989. – № 70 (9). – P.663-667.

10. Moran, U. Functional electrical stimulation following anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled pilot study / U. Moran, U. Gottlieb, A. Gam, S. Springer // Journal of neuroengineering and rehabilitation. – 2019. – № 16 (1). – P.89.

11. Lepley, L. K. Deficits in Quadriceps Strength and Patient-Oriented Outcomes at Return to Activity After ACL Reconstruction: A Review of the Current Literature / L. K. Lepley // Sports health. – 2015. – №7 (3). – P.231-238.

12. Zwolski, C. The influence of quadriceps strength asymmetry on patient-reported function at time of return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction / C. Zwolski, L. C. Schmitt, C. Quatman-Yates, S. Thomas, T. E. Hewett, M. V. Paterno // The American journal of sports medicine. – 2015. – № 43 (9). – P. 2242-2249.

13. Bollen, S. Epidemiology of knee injuries: diagnosis and triage / S. Bollen // British journal of sports medicine. – 2000. – №34 (3). – C.227-228.

14. Uspenskij, A. S. *Primenenie funkcional'noj elektrostimulyacii myshc v kompleksnom vosstanovitel'nom lechenii sportivnoj travmy kolennogo sustava* / A. S. Uspenskij M. A. Dymochka // Sportivnaya medicina. Zdorov'e i fizicheskaya kul'tura. Sochi 2011: M-ly Vseros. nauch. - prakt. konf., – Sochi, 2011.

15. Reichel, M. Simulation of the three-dimensional electrical field in the course of functional electrical stimulation / M. Reichel, T. Breyer, W. Mayr, F. Ratay // Artificial organs. – 2002. – №26 (3). – P. 252-255.

16. Ye, G. Effect of Spatially Distributed Sequential Stimulation on Fatigue in Functional Electrical Stimulation Rowing / G. Ye, P. Theventhiran, K. Masani // IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – 2022. – № 30. – P. 999-1008.

17. Johnston, T. E. Cycling with Functional Electrical Stimulation Before and After a Distal Femur Fracture in a Man with Paraplegia / T. E. Johnston, R. J. Marino, C. V. Oleson, M. Schmidt-Read, C. M. Modlesky // Topics in spinal cord injury rehabilitation. – 2015. – №21 (4). – P. 275-281.

18. Aout, T. Société de Biomécanique young investigator award 2022: Effects of applying functional electrical stimulation to ankle plantarflexor muscles on forward propulsion during walking in young healthy adults / T. Aout, M. Begon, N. Peyrot, T. Caderby // Journal of biomechanics. – 2024. – №168. – P. 112114.

19. Aout, T. Effects of Functional Electrical Stimulation on Gait Characteristics in Healthy Individuals: A Systematic Review / T. Aout, M. Begon, B. Jegou, N. Peyrot, T. Caderby // Sensors (Basel, Switzerland). – 2023. – № 23 (21). – P.8684.

20. Browne, M. G. Does dynamic stability govern propulsive force generation in human walking? / M. G. Browne, J. R. Franz // Royal Society open science. – 2017. – №4 (11). – P.171673.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Амамчян Ашот Эдуардович – доцент, кандидат медицинских наук, преподаватель кафедры нормальной физиологии, Ростовский государственный медицинский университет (РостГМУ). Ростов-на-Дону, Россия. 344022, г. Ростов-на-Дону, переулок Нахичеванский, 29. Эл. почта: amashot2011@mail.ru

Папахчян Артём Николаевич – студент, Ростовский государственный медицинский университет (РостГМУ). Ростов-на-Дону, Россия. 344022, г. Ростов-на-Дону, переулок Нахичеванский, 29.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Amamchyan Ashot – Associate Professor, Candidate of Medical Sciences, Lecturer at the Department of Normal Physiology, Rostov State Medical University (RostSMU). Rostov-on-Don, Russia. Nakhichevansky Lane, 29, Rostov-on-Don, 344022. E-mail: amashot2011@mail.ru

Papakhchyan Artyom – a student, Rostov State Medical University (RostSMU). Rostov-on-Don, Russia. Nakhichevansky lane, 29, Rostov-on-Don, 344022.