

УДК 612.832;612.833

DOI 10.23648/UMBJ.2017.25.5253

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА НА СИЛОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ*

С.А. Федоров, Р.М. Городничев, А.А. Челноков

ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта»,
г. Великие Луки, Россия

e-mail: gorodnichev@vlgafo.ru

Накопленные к настоящему времени сведения литературы указывают, что чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ) может активировать работу генератора шагательных движений в условиях горизонтальной вывески нижних конечностей и модулировать координационную структуру произвольных циклических движений человека. Эти факты позволяют предположить, что продолжительная ЧЭССМ способна повысить силовые возможности скелетных мышц.

Цель работы заключалась в изучении возможностей повышения мышечной силы посредством длительной ритмической электрической стимуляции спинного мозга.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 13 здоровых испытуемых мужского пола в возрасте от 19 до 23 лет. Испытуемым в положении лежа на кушетке в течение 20 мин проводилась ЧЭССМ на уровне T₁₁–T₁₂. Максимальный момент силы при подошвенном сгибании стопы с одновременной записью электрической активности мышц (ЭМГ), М-ответы, а также мышечные ответы мышц голени, вызываемые однократной электрической стимуляцией спинного мозга (ВМО) регистрировались до и после проведения длительной ЧЭССМ.

Результаты. Установлено, что ЧЭССМ в течение 20 мин повышает силовые возможности т. gastrocnemius. Это проявляется в увеличении максимального момента силы на 13,67 %, повышении электрической активности при выполнении подошвенного сгибания стопы и амплитуды ВМО т. gastrocnemius.

Заключение. Длительная чрескожная стимуляция спинного мозга может быть использована как дополнительное средство тренировочного воздействия на моторную систему спортсменов в тех видах спорта, результат в которых зависит от силовых способностей.

Ключевые слова: чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга, максимальный момент сил, электромиография, вызванные моторные ответы, М-ответ, сила.

Введение. К настоящему времени целый ряд исследований специалистов посвящен разработке нетрадиционных методических подходов к целенаправленному изменению состояния и свойств моторной системы человека [1–3 и др.]. В этих работах довольно детально изложены методические подходы к повышению двигательных способностей человека с помощью электрической и магнитной стимуляции скелетных мышц в состоянии покоя и при непосредственном выполнении мышечной работы.

В современных нейрофизиологических исследованиях, направленных на выявление механизмов регуляции локомоций, используются неинвазивные методы стимуляции спинного мозга, которые вызывают произвольные локомоторные движения в условиях внешней вывески ног в горизонтальной плоскости [4–7]. Установлено, что электромагнитная и электрическая стимуляция в области поясничного утолщения спинного мозга активизирует работу генератора шагательных движений. Авторы отметили некоторые особенности генеза произвольных локомоторных движений при вышеназванных видах

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-04-00371.

стимуляционного воздействия на спинной мозг. Результаты этих экспериментов также свидетельствуют о специфике постактивационных эффектов, вызываемых разными видами неинвазивной стимуляции. Методика электрической стимуляции спинного мозга человека применяется для выяснения физиологических механизмов адаптации к спортивной деятельности различной направленности [8], инициации активности генератора шагательных движений [6], целенаправленного изменения скоростно-силовых способностей спортсменов [9], а также при коррекции двигательных нарушений [10, 11]. В то же время в имеющейся литературе отсутствуют сведения о влиянии длительной электрической стимуляции спинного мозга на силовые возможности скелетных мышц у здоровых лиц.

Цель исследования. Изучение возможности изменений мышечной силы человека под влиянием курса продолжительной чрезкожной ритмической электростимуляции спинного мозга.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры Великолукской государственной академии физической культуры и спорта. В эксперименте приняло участие 13 здоровых испытуемых мужского пола в возрасте от 19 до 23 лет. Условия проведения эксперимента были согласованы с комитетом по биоэтике названного вуза, все испытуемые получили детальную информацию о проводимом исследовании и дали письменное согласие на участие в нем в соответствии с Хельсинкской декларацией.

Испытуемым в положении лежа на кушетке лицом вниз в течение 20 мин проводилась ЧЭССМ на уровне грудных позвонков T₁₁–T₁₂ прямоугольными монополярными стимулами с помощью электронейромиографа «Нейро-МВП-8» (ООО «Нейрософт», Россия, 2006). Активный электрод (катод) располагался по средней линии позвоночника между остистыми отростками указанных выше позвонков, индифферентные электроды – билатерально на кожной поверхности гребней подвздошных костей. Интенсивность стиму-

ляции подбирались в предварительных исследованиях (она не вызывала болевых ощущений во время основного эксперимента). Сила стимула у разных испытуемых находилась в диапазоне 20–30 % от индивидуального порога вызванного моторного ответа (ВМО) *m. gastrocnemius*. В течение первых 10 мин стимуляции интенсивность стимула составляла 30 мА, а в последующие – 40 мА. Длительность однократного стимула составляла 0,5 мс, частота следования стимулов – 10 Гц.

Для регистрации мышечной силы испытуемым в положении лежа на кушетке предлагалось выполнить подошвенное сгибание стопы (изометрический тип сокращения) на мультисуставном лечебно-диагностическом комплексе Biodex Multi-Joint System Pro-3 (USA, 2006). У испытуемых до нанесения продолжительной ЧЭССМ и после ее прекращения на 1, 5, 10, 20, 30-й мин регистрировались: максимальный момент силы; поверхностная ЭМГ *m. gastrocnemius* (GM) и *m. tibialis anterior* (TA) при реализации максимального усилия; моторные ответы, вызываемые однократной электростимуляцией спинного мозга; максимальная амплитуда М-ответов названных выше мышц. ВМО и М-ответы GM и TA регистрировались по методикам, описанным в работах [8, 12], с помощью восьмиканального электронейромиографа «Нейро-МВП-8». В процессе регистрации ВМО исследуемых мышц на однократную ЧЭССМ использовались те же стимулирующие электроды, которые применялись для 20-минутной стимуляции спинного мозга. При регистрации М-ответов стимулирующий активный электрод располагался в области подколенной ямки на кожной проекции *n. tibialis* (для GM) и *n. peroneus* (для TA), а референтный – на противоположной стороне конечности (в проекции сухожилия *m. rectus femoris*). Регистрация биопотенциалов скелетных мышц голени осуществлялась поверхностными накожными электродами. Активный электрод (металлический диск диаметром 9 мм) располагался в проекции двигательной точки мышцы, референтный – смещался на расстояние 20 мм к сухожилию.

Статистическая обработка результатов

исследования выполнялась при помощи пакета программы Statistica 10.0. Для оценки координационных взаимодействий мышц в системе «агонист – антагонист» до и после воздействия ЧЭССМ рассчитывался коэффициент реципрокности: амплитуда ЭМГ m. tibialis anterior / амплитуда ЭМГ m. gastrocnemius $\times 100\%$ [12].

Результаты. Результаты анализа зарегистрированных величин максимального момента сил показали, что сразу после окончания 20-минутной ЧЭССМ наблюдалось достоверное увеличение этого параметра (табл. 1). Непосредственно после электростимуляционного воздействия прирост величины мышечной силы по отношению к фоновому уровню составлял 13,17 Н·м ($p < 0,05$). Амплитуды ЭМГ,

ВМО и М-ответа GM и ТА проявляли лишь тенденцию к повышению после окончания электрической стимуляции спинного мозга, однако статистически значимых различий не наблюдалось ($p > 0,05$; табл. 1).

В результате исследования изменения величины максимального момента сил через 5, 10, 20, 30 мин после прекращения 20-минутной стимуляции спинного мозга установлено достоверное увеличение данного показателя на 5-й и 10-й мин восстановления по отношению к значениям, зарегистрированным до ЧЭССМ (табл. 2). В этом случае величина максимального момента сил по отношению к фоновому уровню достоверно увеличилась на 15,40 Н·м ($p < 0,05$) и 17,03 Н·м ($p < 0,05$) соответственно.

Таблица 1

Изменение максимального момента сил, амплитуды ЭМГ, ВМО и М-ответа GM и ТА сразу после воздействия электрической стимуляции на спинной мозг

Показатель	До стимуляции спинного мозга (фон)	После стимуляции спинного мозга (1-я мин)
Максимальный момент сил, Н·м	124,51 \pm 6,07	137,68 \pm 7,52*
ЭМГ GM, мкВ	384,72 \pm 59,92	431,47 \pm 67,32
ВМО GM, мВ	2,38 \pm 0,49	2,52 \pm 0,39
М-ответ GM, мВ	13,49 \pm 1,94	14,79 \pm 1,82
ЭМГ ТА, мкВ	134,25 \pm 38,32	115,63 \pm 21,52
ВМО ТА, мВ	0,38 \pm 0,05	0,38 \pm 0,07
М-ответ ТА, мВ	3,53 \pm 0,42	3,55 \pm 0,38

Примечание. В табл. 1 и 2: * – $p < 0,05$ – уровень достоверных различий между величинами до и после воздействия (Kruskal-Wallis test Anova).

С 20-й по 30-ю мин после окончания электростимуляции отмечалось снижение величины мышечной силы практически до значений без стимуляции спинного мозга, что свидетельствует о постепенном восстановлении исследуемого параметра ($p > 0,05$).

Значения амплитуды ЭМГ, ВМО, М-ответа GM после воздействия электрической стимуляции на спинной мозг, представленные в табл. 2, свидетельствуют о достоверном увеличении амплитуды ЭМГ на 5-й мин ($p < 0,05$), а амплитуды ВМО – на 10-й мин ($p < 0,05$). Напротив, амплитуда ЭМГ, ВМО, М-ответа ТА после воздействия электриче-

ской стимуляцией на спинной мозг не претерпела каких-либо статистически значимых изменений ($p > 0,05$; табл. 2).

Оценка координационных взаимоотношений мышц «агонист (GM) – антагонист (ТА)» с помощью коэффициента реципрокности выявила увеличение реципрокности указанных выше мышц по отношению к фону на протяжении 10 мин постактивационного эффекта электростимуляции. Величина коэффициента реципрокности достоверно уменьшилась к 5-й мин последствия электростимуляции спинного мозга на 21,91 % по отношению к фону, а к 10-й мин – на 22,54 % (рис. 1)

Таблица 2

Изменение величины максимального момента сил, амплитуды ЭМГ, ВМО, М-ответа GM и ТА после воздействия электрической стимуляции на спинной мозг

Показатель	Фон	Время регистрации после окончания стимуляции, мин			
		5	10	20	30
Максимальный момент сил, Н·м	124,57±7,73	139,97±7,45*	141,60±5,84*	136,48±8,06	125,42±5,22
ЭМГ GM, мкВ	384,72±59,92	448,41±70,56*	424,68±54,40	423,50±67,22	412,44±46,84
ВМО GM, мВ	2,38±0,49	2,97±0,48	3,21±0,55*	2,96±0,46	2,23±0,50
М-ответ GM, мВ	13,49±1,94	15,19±2,35	14,84±2,20	15,61±2,19	13,38±1,29
ЭМГ ТА, мкВ	134,25±38,32	107,49±23,59	100,12±24,26	131,01±39	141,91±30,84
ВМО ТА, мВ	0,38±0,05	0,38±0,07	0,42±0,06	0,32±0,05	0,37±0,05
М-ответ ТА, мВ	3,53±0,42	3,55±0,38	3,88±0,38	3,92±0,37	4,00±0,45

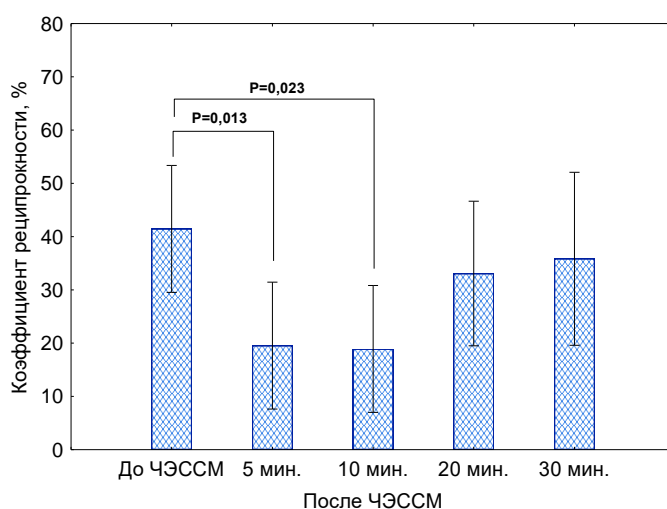


Рис. 1. Изменение коэффициента реципрокности GM и ТА после воздействия ЧЭССМ, %. $p < 0,05$ – уровень достоверных различий между величинами до и после воздействия (Wilcoxon test)

На 20-й мин после окончания электрической стимуляции спинного мозга величина коэффициента реципрокности была меньше по сравнению с фоном лишь на 8,37 % и не имела достоверных отличий от исходных значений ($p > 0,05$; рис. 1). Тенденция к уменьшению величины коэффициента реципрокности сохранялась и на 30-й мин после проведения электрической стимуляции ($p > 0,05$). Такая динамика свидетельствует о продолжающейся тенденции к восстановлению величины коэффициента реципрокности мышц-антагонистов до значений, зарегистрированных до электрической стимуляции спинного мозга.

Обсуждение. В проведенных нами экспериментах продолжительная электрическая стимуляция приводила к увеличению амплитуды мышечных ответов GM, вызываемых однократной стимуляцией поясничного утолщения спинного мозга, что является свидетельством повышения рефлекторной возбудимости соответствующих спинальных мотонейронных пулов. Можно полагать, что нисходящий поток нервных импульсов, адресованный к мотонейронным пулам с повышенным уровнем возбудимости, инициирует рекрутирование дополнительных двигатель-

ных единиц, активность которых обеспечивает прирост мышечной силы при длительном электрическом воздействии на спинной мозг.

Во многих нейрофизиологических исследованиях показано, что ритмическая электрическая стимуляция структур нервной системы приводит к разнообразным функциональным изменениям в синапсах нейронных сетей, зависимым от силы, длительности и частоты стимуляционного воздействия [12–14]. Продолжительная активация вызывает повышение потенциала покоя (гиперполяризацию) мембраны пресинаптической части аксона и способствует увеличению амплитуды потенциала действия. Высокоамплитудный потенциал действия инициирует выброс более значительного количества медиаторов в синаптическую щель. При этом в условиях ритмической активации наблюдается увеличение запаса медиатора, готового к выделению. В связи с этим можно полагать, что применяемая в нашей работе ЧЭССМ вызвала в синапсах спинальных нейронных сетей изменения, аналогичные изложенным выше. Это обстоятельство дает основания предположить, что синаптические изменения, вызываемые ЧЭССМ, могут создавать более оптимальные условия для рекрутирования двигательных единиц, функционирование которых и обеспечивает прирост силовых возможностей мышц.

Гипотетический механизм повышения силовых возможностей, проявляемых в модельном двигательном действии, может быть связан с повышением возбудимости нейронов моторной зоны коры головного мозга под влиянием поступающих по восходящим спинально-корковым путям нервных импульсов, генерируемых в спинном мозге электростимуляционным воздействием.

Известно, что выполнение целенаправленного двигательного действия происходит посредством моторной команды, под которой понимаются сигналы, вырабатываемые центральной нервной системой и непосредственно управляющие движением [14]. Для того чтобы движение достигало поставленной задачи, моторная команда должна активировать нейроны соответствующих сегментов

спинного мозга с определенной интенсивностью, последовательностью и в строго установленных моменты времени. Вопрос о локализации нейронных сетей в структурах мозга, где принимаются решения о начале произвольного движения, а следовательно, и о реализации соответствующей моторной команды, на сегодняшний день остается еще малоизученным. Тем не менее общепризнано, что моторные команды, управляющие сокращением отдельных мышц и осуществляющие координацию сложных двигательных задач, вырабатываются в моторной коре. В исследованиях с использованием методики регистрации активности отдельных нейронов моторной коры показано наличие различных популяций нейронов, кодирующих те или иные параметры двигательного действия [15]. Часть нейронов моторной коры активна во время сгибания, другие – во время разгибания. Частота разрядов пропорциональна усилию, с которым выполняется двигательное действие. Участие в сгибании или разгибании свойственно для кортикоспинальных нейронов, аксоны которых оканчиваются на спинальных α -мотонейронах [16].

Если рассмотреть проявление силы при подошвенном сгибании стопы как решение полноценной двигательной задачи, предусматривающей реализацию сформированной ранее моторной команды на разных уровнях ЦНС и периферического мышечного аппарата, то последовательность событий (механизмов) можно представить следующим образом. Сформированная ранее и реализуемая в данный момент моторная команда в виде паттерна нервных импульсов по соответствующим нисходящим нейронным путям достигает мотонейронных пулов рабочих мышц, возбудимость которых повышена электростимуляционным воздействием на спинной мозг. В этом случае имеющаяся моторная команда будет активировать большее число быстрых α -мотонейронов по сравнению с обычными условиями выполнения двигательного действия, не связанными со стимуляцией. Можно также предположить, что увеличение показателей силы мышцы голени под влиянием длительной ЧЭССМ определяется и модификацией моторной ко-

манды, следующей из коры головного мозга к мотонейронному пулу икроножной мышцы, активность которой обеспечивает выполнение исследуемого двигательного действия – подошвенного сгибания стопы. Такая модификация также может быть связана со специфичностью супраспинальных возбуждающих и тормозных влияний на интернейроны Ia и Ib спинального уровня при выполнении исследуемого произвольного движения [17].

Заключение. В нашей работе сделана попытка разработать методический подход к развитию мышечной силы посредством ЧЭССМ. Установлено, что длительная ЧЭССМ повышает силовые возможности *m. gastrocnemius*. Это проявляется в увеличении максимального

момента силы на 13,67 %, повышении электрической активности *m. gastrocnemius* при выполнении подошвенного сгибания стопы и амплитуды вызванных моторных ответов.

На основе результатов исследования о влиянии длительной электрической стимуляции спинного мозга на функциональное состояние моторной системы нами предложен новый методический подход к развитию мышечной силы посредством электростимуляционного воздействия на спинной мозг. Предлагаемый подход может быть использован как дополнительное средство тренировочного воздействия на моторную систему спортсменов в тех видах спорта, результат в которых зависит от силовых способностей.

Литература

1. Ратов И.П., Попов Г.И., Логинов А.А., Шмонин Б.В. Биомеханические технологии подготовки спортсменов. М.: ФиС; 2007. 120.
2. Городничев Р.М., Беляев А.Г., Шляхтов В.Н. Магнитная стимуляция мышц как новый метод повышения их силовых возможностей. Теория и практика физической культуры. 2015; 6: 8–10.
3. Gondin J., Guette M., Ballay Y. et al. Electromyostimulation training effects on neural drive and muscle architecture. *Med. Sci Sports Exerc.* 2005; 37: 1291–1299.
4. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С., Козенников О.В., Селионов В.А. Существует ли генератор шагательных движений у человека? *Физиология человека.* 1998; 24 (3): 42–50.
5. Guertin P.A. Central pattern generator for locomotion: anatomical, physiological, and pathophysiological considerations. *Frontiers in Neurology Movement Disorders.* 2013; 3. Doi: 10.3389/fneur.2012.00183.
6. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Roy R.R., Lu D.C., Edgerton V.R. Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans. *J. Neurophysiol.* 2015; 113 (3): 834–842.
7. Щербак Н.А., Мошонкина Т.Р., Савохин А.А., Селионов В.А., Городничев Р.М., Герасименко Ю.П. Неинвазивный метод управления спинальными локомоторными сетями человека. *Физиология человека.* 2016; 1 (42): 73–81.
8. Ланская О.В., Андриянова Е.Ю., Ланская Е.В. Пластичность шейных и пояснично-крестцовых спинальных нейрональных сетей двигательного контроля при занятиях спортом. Теория и практика физической культуры. 2015; 6: 14–16.
9. Михайлова Е.А., Козлов В.А., Ершов В.Ю., Городничев Р.М. Повышение эффективности маховых движений при беге посредством чрескожной электрической стимуляции спинного мозга. Теория и практика физической культуры. 2015; 6: 29–31.
10. Gerasimenko Y.P., Lu D.C., Modaber M., Zdunowski S., Gad P., Sayenko D.G., Morikawa E., Haakana P., Ferguson A.R., Roy R.R., Edgerton V.R. Non-invasive reactivation of motor descending control after paralysis. *J. Neurotrauma.* 2015; 32 (24): 1968–1980.
11. Якупов Р.Н., Котова Е.Ю., Балыкин Ю.М., Машин В.В., Балыкин М.В., Герасименко Ю.П. Влияние чрескожной электростимуляции спинного мозга и механотерапии на возбудимость спинальных нейронных сетей и локомоторные функции пациентов с нарушениями мозгового кровообращения. *Ульяновский медико-биологический журнал.* 2016; 4: 121–128.
12. Команцев В.Н., Заболотных В.А. Методические основы клинической электронеуромиографии. СПб.; 2001. 350.
13. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней: руководство для врачей. М.: МЕДпресс-информ; 2014. 488.

14. Николлс Д., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П. От нейрона к мозгу. М.: Издательство ЛКИ; 2008. 672.
15. Jackson A., Mavoori J., Fetz E.E. Correlations between the same motor cortex cells and arm muscles during a trained task, free behavior, and natural sleep in the macaque monkey. *J. Neurophysiol.* 2007; 97 (1): 360–374.
16. Seki K., Perlmutter S.I., Fetz E.E. Task-dependent modulation of primary afferent depolarization in cervical spinal cord of monkeys performing an instructed delay task. *J. Neurophysiol.* 2009; 102(1): 85–99.
17. Челноков А.А., Гладченко Д.А., Федоров С. А., Городничев Р.М. Возрастные особенности спинального торможения скелетных мышц у лиц мужского пола в регуляции произвольных движений. *Физиология человека.* 2017; 1 (43): 35–44.

EFFECT OF PROLONGED SPINAL CORD ELECTRICAL STIMULATION ON SKELETAL MUSCLE STRENGTH

S.A. Fedorov, R.M. Gorodnichev, A.A. Chelnokov

Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sport, Velikiye Luki, Russia.

e-mail: gorodnichev@vlgafc.ru

The accumulated data from the previous studies show that transcutaneous electrical spinal cord stimulation (TESCS) can activate the locomotor-related activity in the spinal cord (spinal stepping generator) in healthy side-lying subjects with their legs suspended and control the coordination structure of arbitrary cyclic movements in humans. These facts suggest that long-term TESCS is able to increase skeletal muscle strength.

The objective of this study was to explore the possibility to increase muscle strength by means of long-term rhythmic electrical spinal cord stimulation.

Materials and Methods. The study involved 13 healthy males aged between 19 and 23. The side-lying patients were subject to TESCS at the T₁₁/T₁₂ level for twenty minutes.

The maximum plantar flexion force of the foot with simultaneous recording of the electromyoelectrical activity (EMG), M-responses, and lower leg muscle responses evoked by a single spinal cord electrical stimulation (MEP) were recorded before and after long-term TESCS.

Results. It was found out that 20 minute TESCS increased m. gastrocnemius strength. This was confirmed by 13.67 % increase of maximum torque and increases of m. gastrocnemius electrical activity during plantar flexion of the foot and its MEP amplitude.

Conclusion. Long-term transcutaneous spinal cord stimulation can be used as an additional athletic training technique which effects the motor system of sportsmen participating in such kinds of sports, where the results depend on their strength.

Keywords: *transcutaneous electrical spinal cord stimulation, maximum torque, electromyography, motor evoked potentials, M-response, strength.*

References

1. Ratov I.P., Popov G.I., Loginov A.A., Shmonin B.V. *Biomekhanicheskie tekhnologii podgotovki sportsmenov* [Biomechanical techniques of athletic training]. Moscow: FiS; 2007. 120 (in Russian).
2. Gorodnichev R.M., Belyaev A.G., Shlyakhtov V.N. Magnitnaya stimulyatsiya myshts kak novyy metod povysheniya ikh silovykh vozmozhnostey [Magnetic stimulation of muscles as a new method to enhance their strength abilities]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury.* 2015; 6: 8–10 (in Russian).
3. Gondin J., Guette M., Ballay Y., et al. Electromyostimulation training effects on neural drive and muscle architecture. *Med. Sci Sports Exerc.* 2005; 37: 1291–1299.
4. Gurfinkel' V.S., Levik Yu.S., Kozennikov O.V., Selionov V.A. Sushchestvuet li generator shagatel'nykh dvizheniy u cheloveka [Is there a spinal stepping generator in humans?]. *Fiziologiya cheloveka.* 1998; 24 (3): 42–50 (in Russian).
5. Guertin P.A. Central pattern generator for locomotion: anatomical, physiological, and pathophysiological considerations. *Frontiers in Neurology Movement Disorders.* 2013; 3. Doi: 10.3389/fneur.2012.00183.
6. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Roy R.R., Lu D.C., Edgerton V.R. Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutane-

- ous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans. *J. Neurophysiol.* 2015. 113 (3): 834–842.
7. Shcherbakova N.A., Moshonkina T.R., Savokhin A.A., Selionov V.A., Gorodnichev R.M., Gerasimenko Yu.P. Neinvazivnyy metod upravleniya spinal'nymi lokomotornymi setyami cheloveka [Noninvasive method to control the human spinal locomotor systems]. *Fiziologiya cheloveka.* 2016; 1 (42): 73–81 (in Russian).
 8. Lanskaya O.V., Andriyanova E.Yu., Lanskaya E.V. Plastichnost' sheynykh i poynichno-kresttsovykh spinal'nykh neyronal'nykh setey dvigatel'nogo kontrolya pri zanyatiyakh sportom [Plasticity of cervical and lumbosacral spinal neuronal networks of motor control during exercise]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury.* 2015; 6: 14–16 (in Russian).
 9. Mikhaylova E.A., Kozlov V.A., Ershov V.Yu., Gorodnichev R.M. Povyshenie effektivnosti makhovykh dvizheniy pri bege posredstvom chreskoznoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga [Enhancement of efficiency of flapping when running via percutaneous electrical stimulation of spinal cord]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury.* 2015; 6: 29–31 (in Russian).
 10. Gerasimenko Y.P., Lu D.C., Modaber M., Zdunowski S., Gad P., Sayenko D.G., Morikawa E., Haakana P., Ferguson A.R., Roy R.R., Edgerton V.R. Non-invasive reactivation of motor descending control after paralysis. *J. Neurotrauma.* 2015; 32 (24): 1968–1980.
 11. Yakupov R.N., Kotova E.Yu., Balykin Yu.M., Mashin V.V., Balykin M.V., Gerasimenko Yu.P. Vliyanie chreskoznoy elektrostimulyatsii spinnogo mozga i mekhanoterapii na vozбудimost' spinal'nykh neyronnykh setey i lokomotornye funktsii patsientov s narusheniyami mozgovogo krovoobrashcheniya [Effect of transcutaneous electrical spinal cord stimulation and mechanotherapy on excitability of spinal neural networks and locomotor function in patients with cerebral circulation disorders]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal.* 2016; 4: 121–128 (in Russian).
 12. Komantsev V.N., Zabolotnykh V.A. *Metodicheskie osnovy klinicheskoy elektroneyromiografii* [Methodological basis of clinical electroneuromyography]. St. Petersburg; 2001. 350 (in Russian).
 13. Zenkov L.R., Ronkin M.A. *Funktsional'naya diagnostika nervnykh bolezney: rukovodstvo dlya vrachey* [Functional diagnostics of nervous diseases: physician's guideline]. Moscow: MEDpress-inform; 2014. 488 (in Russian).
 14. Nikolls D., Martin, R., Vallas B., Fuks P. *Ot neyrona k mozgu* [From neurons to brain]. Moscow: Izdatel'stvo LKI; 2008. 672 (in Russian).
 15. Jackson A., Mavoori J., Fetz E.E. Correlations between the same motor cortex cells and arm muscles during a trained task, free behavior, and natural sleep in the macaque monkey. *J. Neurophysiol.* 2007; 97 (1): 360–374.
 16. Seki K., Perlmutter S.I., Fetz E.E. Task-dependent modulation of primary afferent depolarization in cervical spinal cord of monkeys performing an instructed delay task. *J. Neurophysiol.* 2009; 102(1): 85–99.
 17. Chelnokov A.A., Gladchenko D.A., Fedorov S. A., Gorodnichev R.M. Vozrastnye osobennosti spinal'nogo tormozheniya skeletnykh myshts u lits muzhskogo pola v regulyatsii proizvol'nykh dvizheniy [Age-related features of spinal inhibition in the regulation of voluntary movements in males]. *Fiziologiya cheloveka.* 2017; 1 (43): 35–44 (in Russian).