

УДК 612.832;612.833

DOI 10.23648/UMBJ.2018.30.14055

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И КРАТКОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА НА ПАРАМЕТРЫ ВЫЗВАННЫХ МЫШЕЧНЫХ ОТВЕТОВ ЧЕЛОВЕКА\*

Л.В. Рощина, В.В. Маркевич, С.М. Иванов, Р.М. Городничев, А.А. Челноков

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

e-mail: and-chelnokov@yandex.ru

*Методы неинвазивной электрической (ЧЭССМ) и электромагнитной стимуляции спинного мозга применяются в исследованиях сенсорно-моторной регуляции локомоторных движений, для развития мышечной силы, при коррекции двигательных нарушений. Остаются малоизученными вопросы, связанные с влиянием электрической и электромагнитной стимуляции спинного мозга на параметры моторных ответов (ВМО), вызываемых транскраниальной магнитной стимуляцией (ТМС).*

*Цель исследования состояла в изучении изменений мышечных ответов, вызываемых ТМС коры головного мозга, при продолжительной электрической и кратковременной электромагнитной стимуляции спинного мозга.*

*Материалы и методы. В эксперименте приняли участие 14 здоровых испытуемых мужского пола в возрасте от 19 до 23 лет. Испытуемым наносилась ЧЭССМ (20 мин) и электромагнитная стимуляция (10 с) на спинной мозг в области T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков. До стимуляционного воздействия и после его окончания регистрировалась амплитуда ВМО т. gastrocnemius и т. tibialis anterior.*

*Результаты. Длительная чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга приводила к повышению амплитуды моторного ответа т. gastrocnemius, вызываемого ТМС моторной зоны коры головного мозга, в течение 10 мин после окончания стимуляции. Амплитуда максимального ВМО данной мышцы до стимуляции составляла 0,196 мВ, а через 10 мин после ее окончания – 0,270 мВ ( $p < 0,05$ ). Амплитуда вызванных моторных ответов т. tibialis anterior не претерпевала статистически значимых изменений и практически оставалась на том же уровне, как и до воздействия электрической стимуляции и поясничное утолщение спинного мозга. Кратковременная электромагнитная стимуляция спинного мозга не сопровождалась достоверными изменениями амплитуды ВМО исследуемых мышц.*

**Ключевые слова:** вызванный моторный ответ, электрическая и электромагнитная стимуляция, спинной мозг, головной мозг.

**Введение.\*** Известно, что электромагнитная и электрическая стимуляция спинного мозга в области T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков активизирует работу генератора шагательных движений [1, 2]. Такие стимуляционные воздействия на спинной мозг у здорового человека вызывают сложный моторный ответ в проксимальных и дистальных мышцах нижних конечностей [1–5]. Методы неинвазивной электрической и электромагнитной сти-

муляции спинного мозга применяются в исследованиях сенсорно-моторной регуляции локомоторных движений [6, 7], для развития мышечной силы [8–10], при коррекции двигательных нарушений [11–13]. Установлено, что латентность и амплитуда вызванных моторных ответов мышц верхних и нижних конечностей, кинематические и электромиографические параметры локомоторных движений, вызываемых неинвазивной стимуляцией спинного мозга, во многом зависят от вида стимуляции и её локализации [6, 14].

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

Для решения ряда исследовательских задач также используется методика электромагнитной стимуляции коры головного мозга – транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС). Показано, что подпороговая ТМС в области первичной моторной коры оказывает влияние на кортикоспинальную возбудимость и усиливает спинальные двигательные реакции, вызываемые чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга (ЧЭССМ) на уровне T<sub>11</sub>–T<sub>12</sub> позвонков [3]. ЧЭССМ в сочетании с ТМС может возбуждать одну и ту же группу двигательных единиц одного мотонейронного пула [15]. Тем не менее в имеющейся литературе отсутствуют сведения о влиянии длительной электрической и краткосрочной электромагнитной стимуляции спинного мозга на параметры моторных ответов, вызываемых ТМС коры головного мозга.

**Цель исследования.** Изучение изменений параметров мышечных ответов, вызываемых ТМС коры головного мозга, при продолжительной электрической и кратковременной электромагнитной стимуляции 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 14 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.

В первой серии экспериментов (8 испытуемых) изучалась динамика амплитуды мышечных ответов, вызываемых ТМС коры головного мозга, под воздействием длительной электрической стимуляции спинного мозга. Испытуемым в положении лежа на кушетке лицом вниз в течение 20 мин наносилась ЧЭССМ на уровне грудных позвонков T<sub>11</sub>–T<sub>12</sub> прямоугольными монополярными стимулами с помощью электронейромиогра-

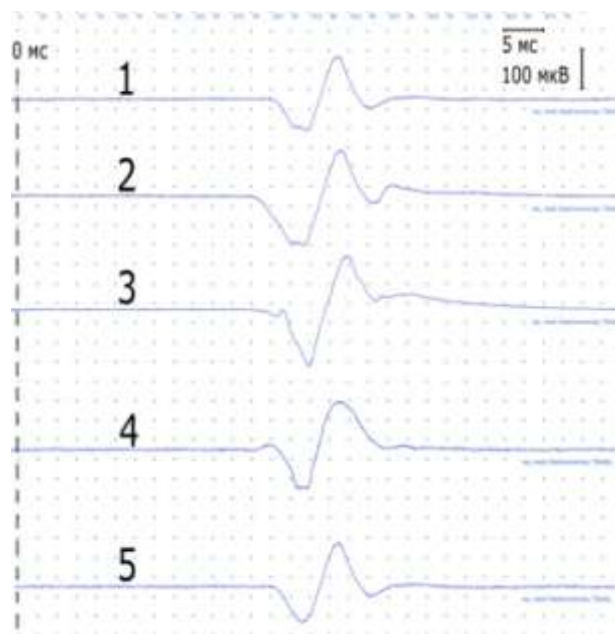
фа «Нейро-МВП-8» (ООО «Нейрософт», Россия, 2006). Активный электрод (катод) располагался по средней линии позвоночника между остистыми отростками указанных выше позвонков, индифферентные электроды – билатерально на кожной поверхности гребней подвздошных костей. Интенсивность стимуляции подбиралась в предварительных исследованиях так, чтобы 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*. Длительность однократного стимула составляла 0,5 мс, частота следования стимулов – 10 Гц [10].

Во второй серии экспериментов (6 испытуемых) исследовались изменения параметров мышечных ответов, вызываемых ТМС, при кратковременной электромагнитной стимуляции спинного мозга. В этом случае стимуляция наносилась посредством электромагнитного стимулятора Magstim-Rapid 2 (Великобритания). Кольцевую катушку стимулятора диаметром 70 мм размещали поверхностно по средней линии позвоночного столба, плоскостью к поверхности спины в области T<sub>11</sub>–T<sub>12</sub> позвонков. Частота стимуляционного воздействия составляла 3 Гц, интенсивность магнитного стимула – 70 % от максимального выхода стимулятора, продолжительность воздействия – 10 с.

В каждой серии опытов для регистрации ВМО *m. gastrocnemius* (GM) и *m. tibialis anterior* (TA) электромагнитный стимул наносился с помощью магнитного стимулятора Magstim Rapid 2 в области представительства названных мышц с использованием угловой L-катушки размером 2×100 мм. Магнитный стимулятор был синхронизирован с электронейромиографом «Нейро-МВП-8». Интенсивность одиночных стимулов подбиралась индивидуально для каждого испытуемого. Регистрация амплитуды ВМО GM и TA осуществлялась при пороговой и максимальной силе ТМС (55,37±2,73 и 95,00±2,50 % от максимального выхода стимулятора соответственно). В первой серии опытов стимулы наносились до и после ЧЭССМ на 1, 10, 20, 30-й мин последствия, а во второй серии –

до стимуляции и на 1, 5, 10-й мин после ее прекращения. Амплитуда ВМО GM и ТА при ТМС моторных зон коры головного мозга оценивалась в указанные выше временные интервалы. Амплитуда ВМО GM и ТА опре-

делялась от негативного до позитивного пика. Оригинальные записи мышечных ответов, вызванных электромагнитной стимуляцией моторной зоны коры, представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Образцы записи моторных ответов *m. gastrocnemius*, вызываемых ТМС коры головного мозга, до и после длительной ЧЭССМ: до ЧЭССМ (1), после ее воздействия на 1-й мин (2), 10-й мин (3), 20-й мин (4) и 30-й мин (5)

Статистическая обработка данных проводилась с помощью парного критерия Student T-test. Определялась эффективность постактивационного эффекта длительной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга на 1, 10, 20, 30-й мин и краткосрочной электромагнитной стимуляции – на 1, 5, 10-й мин по значениям амплитуды ВМО мышц-антагонистов голени, вызываемых пороговой и максимальной ТМС, по отношению к величинам, зарегистрированным до стимуляционного воздействия на спинной мозг. Результаты статистического анализа считались достоверными, если вероятность ошибки была менее 0,05.

**Результаты.** Анализ величин моторных ответов мышц голени, вызываемых пороговой и максимальной электромагнитной стимуляцией коры головного мозга, показал, что после 20-минутной ЧЭССМ отмечалось достоверное увеличение амплитуды ВМО GM на 1-й и 10-й мин ( $p < 0,05$ ) последствия по от-

ношению к величинам, зарегистрированным до стимуляции (табл. 1). При пороговой ТМС амплитуда ВМО GM на 1-й и 10-й мин последствия ЧЭССМ повысилась на 0,032 мВ ( $p < 0,05$ ) и 0,038 мВ ( $p < 0,05$ ) по отношению к значениям, наблюдаемым до стимуляционного воздействия на спинной мозг. На 20-й и 30-й мин после ЧЭССМ амплитуда ВМО GM была выше на 0,015 и 0,003 мВ соответственно ( $p > 0,05$ ) и не имела достоверных отличий от величин, зарегистрированных до стимуляции спинного мозга. Полученные данные свидетельствуют, что амплитуда ВМО GM полностью восстановилась к 20-й мин после окончания стимуляции спинного мозга.

В то же время амплитуда ВМО ТА, вызываемых пороговой и максимальной электромагнитной стимуляцией коры головного мозга, не претерпевала статистически значимых изменений и практически оставалась на том же уровне, как и до воздействия электрической стимуляции на спинной мозг (табл. 1).

Так, с 1-й по 30-ю мин последствия электрической стимуляции на спинной мозг амплитуда ВМО ТА, вызываемых пороговой стимуляцией коры головного мозга, повышалась в пределах от 0,033 до 0,094 мВ ( $p>0,05$ ), но не достигала достоверных отличий от значений, зарегистрированных до стимуляции спинного мозга. Аналогичные результаты

получены при нанесении максимального электромагнитного стимула на моторную зону коры головного мозга. В этом случае амплитуда ВМО ТА после стимуляции спинного мозга в течение 30 мин последствия варьировала от 0,21 до 0,43 мВ ( $p>0,05$ ) по сравнению с фоновыми значениями (табл. 1).

Таблица 1

**Амплитуда ВМО GM и ТА, вызываемых ТМС коры головного мозга, до и после длительной электрической стимуляции спинного мозга ( $M\pm SE$ ,  $n=8$ ), мВ**

Сила стимула	Мышцы	До стимуляции спинного мозга	После стимуляции спинного мозга			
			1-я мин	10-я мин	20-я мин	30-я мин
Пороговая	GM	0,039±0,010	0,071±0,020*	0,077±0,030*	0,054±0,010	0,042±0,070
	ТА	0,119±0,030	0,213±0,070	0,210±0,060	0,175±0,050	0,152±0,040
Максимальная	GM	0,196±0,050	0,240±0,070*	0,270±0,040*	0,229±0,030	0,189±0,030
	ТА	1,470±0,510	1,900±0,500	1,770±0,590	1,690±0,420	1,68±0,480

**Примечание.** \* – достоверность различий с исходными величинами ( $p<0,05$ , Student T-test).

Во второй серии исследований оценивалось влияние кратковременной электромагнитной стимуляции спинного мозга в области грудных позвонков T<sub>11</sub>–T<sub>12</sub> на мышечные ответы, вызываемые ТМС коры головного мозга.

Анализ полученных данных позволил установить, что при ТМС моторной зоны коры головного мозга наибольшая амплитуда ВМО наблюдалось в ТА (табл. 2). Эффект электро-

магнитного воздействия на спинной мозг был наиболее выражен через 5 мин после его окончания. В этом случае при пороговой силе ТМС амплитуда ВМО GM увеличилась на 0,013 мВ ( $p>0,05$ ) по сравнению с фоновым значением, а при максимальной интенсивности стимула – на 0,053 мВ ( $p>0,05$ ). Спустя 10 мин после воздействия электромагнитной стимуляции амплитуда ВМО GM возвращалась к фоновым значениям.

Таблица 2

**Амплитуда ВМО GM и ТА, вызываемых ТМС коры головного мозга, до и после кратковременного электромагнитного воздействия на спинной мозг ( $M\pm SE$ ,  $n=6$ ), мВ**

Сила стимула	Мышцы	До стимуляции спинного мозга	После стимуляции спинного мозга		
			1-я мин	5-я мин	10-я мин
Пороговая	GM	0,058±0,010	0,064±0,01	0,071±0,01	0,058±0,01
	ТА	0,469±0,090	0,686±0,14	0,445±0,11	0,466±0,10
Максимальная	GM	0,153±0,040	0,161±0,03	0,206±0,04	0,152±0,03
	ТА	2,038±0,350	1,754±0,34	2,129±0,34	1,994±0,37

Амплитуда ВМО ТА, вызываемых пороговой силой ТМС коры головного мозга, увеличилась сразу после электромагнитной стимуляции спинного мозга на 47,82 % ( $p > 0,05$ ) по сравнению с фоновым значением. Через 5 и 10 мин после воздействия амплитуда ВМО практически достигла исходных значений. При максимальной силе ТМС зарегистрировано снижение амплитуды ВМО ТА непосредственно после воздействия. К 5-й мин восстановления амплитуда ВМО ТА увеличилась на 4,41 %, на 10-й мин – снизилась на 2,20 %.

**Обсуждение.** В нашем исследовании обнаружено, что амплитуда ВМО GM, вызываемых максимальной электромагнитной стимуляцией коры головного мозга, до и после ЧЭССМ была меньше по сравнению с величиной ВМО ТА (табл. 1, 2). В исследованиях с использованием методики регистрации активности отдельных нейронов моторной коры показано наличие различных популяций нейронов, кодирующих те или иные параметры двигательного действия [16]. Часть нейронов моторной коры активна во время сгибания, другие – во время разгибания. Известно, что участие в сгибании или разгибании свойственно кортикоспинальным нейронам, аксоны которых оканчиваются на спинальных  $\alpha$ -мотонейронах [17]. Факт более высокой амплитуды ВМО ТА, вероятно, можно объяснить тем, что в норме у здоровых людей мышцы-сгибатели (икроножная и камбаловидная) находятся под более выраженным тормозным супраспинальным контролем [3, 15].

Результаты собственных исследований свидетельствуют о повышении амплитуды ВМО GM, вызываемых электромагнитной стимуляцией моторной зоны коры головного мозга, в первые 10 мин после прекращения длительной электрической стимуляции спинного мозга. С учетом того, что спинальная система объединяет и передает множество афферентных сигналов по восходящим нейрональным путям в структуры головного мозга, можно предположить, что длительная ЧЭССМ повышает возбудимость нейронов коры головного мозга в области представления данной мышцы. В этом случае одинаковый по силе (до и после электрической стимуляции спинного мозга) электромагнитный стимул вызовет моторный ответ GM с более высокой амплитудой.

**Заключение.** Длительная электрическая стимуляция спинного мозга в области T<sub>11</sub>–T<sub>12</sub> грудных позвонков приводила к повышению амплитуды моторного ответа *m. gastrocnemius*, вызываемого электромагнитной стимуляцией моторной зоны коры головного мозга, в течение 10 мин после окончания стимуляции. Напротив, амплитуда ВМО *m. tibialis anterior* не претерпевала статистически значимых изменений и практически оставалась на том же уровне, как и до воздействия электрической стимуляции на поясничное утолщение спинного мозга. Кратковременная электромагнитная стимуляция спинного мозга не сопровождалась достоверными изменениями ВМО исследуемых мышц.

## Литература

1. Gerasimenko Y., Savochin A., Gorodnichev R., Machueva E., Pivovarova E., Semyenov D., Roy R.R., Edgerton V.R. Novel and direct access to the human locomotor spinal circuitry. *J. Neuroscience*. 2010; 30 (10): 3700–3708.
2. Городничев Р.М., Пивоварова Е.А., Пухов А.М., Моисеев С.А., Савохин А.А., Мошонкина Т.Р., Щербанова Н.А., Климин В.А., Селионов В.А., Козловская И.Б., Эджерстон Р., Герасименко Ю.П. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека. *Физиология человека*. 2012; 38 (2): 46–56.
3. Яфарова Г.Г., Милицкова А.Д., Шульман А.А., Спиридонова К.Н., Бикчентаева Л.М. Влияние транскраниальной магнитной стимуляции на ответы мышц голени, вызванные чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга. *Практическая медицина*. 2017; 8 (109): 201–205.
4. 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.

5. Щербакова 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.
6. Gerasimenko Y., Moshonkina T., Savochin A., Gad P., Sayenko D., Edgerton V.R., McKinney Z., Gorodnichev R., Puhov A., Selionov V., Shigueva T., Tomilovskaya E., Kozlovskaya I. Integration of sensory, spinal, and volitional descending inputs in regulation of human locomotion. Journal of Neurophysiology. 2016; 116 (1): 98–105.
7. Герасименко Ю.П., МакКинней З.Б., Саенко Д.Г., Гэд П., Городничев Р.М., Грундфест У., Эдджертон В.Р., Козловская И.Б. Спинальная и сенсорная нейромодуляция спинальных нейронных сетей человека. Физиология человека. 2017; 43 (5): 6–16.
8. Городничев Р.М., Беляев А.Г., Пивоварова Е.А., Шляхтов В.Н. Влияние электромагнитной стимуляции на показатели мышечной силы. Физиология человека. 2014; 40 (1): 76.
9. Якупов Р.Н., Балыкин Ю.М., Котова Е.Ю., Балыкин М.В., Герасименко Ю.П. Изменение силовых показателей мышц нижних конечностей при чрескожной электрической стимуляции спинного мозга. Ульяновский медико-биологический журнал. 2015; 4: 99–103.
10. Федоров С.А., Городничев Р.М., Челноков А.А. Влияние длительной электрической стимуляции спинного мозга на силовые возможности скелетных мышц. Ульяновский медико-биологический журнал. 2017; 1: 123–130.
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. Балыкин М.В., Якупов Р.Н., Машин В.В., Котова Е.Ю., Балыкин Ю.М., Герасименко Ю.П. Влияние неинвазивной электрической стимуляции спинного мозга на локомоторные функции пациентов с двигательными нарушениями центрального генеза. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2017; 94 (4): 4–9.
13. Solopova I.A., Sukhotina I.A., Zhvansky D.S., Ikoeva G.A., Vissarionov S.V., Baidurashvili A.G., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P., Moshonkina T.R. Effects of spinal cord stimulation on motor functions in children with cerebral palsy. Neuroscience Letters. 2017; 639: 192–198.
14. Гладченко Д.А., Иванов С.М., Мачуева Е.Н., Пухов А.М., Мусеев С.А., Пискунов И.В., Городничев Р.М. Параметры моторных ответов человека при чрескожной электрической и электромагнитной стимуляции различных сегментов спинного мозга. Ульяновский медико-биологический журнал. 2016; 2: 132–140.
15. Knikou M. Transspinal and transcortical stimulation alter corticospinal excitability and increase spinal output. PLoS One. 2014; 9 (7): 1–12.
16. 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.
17. 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; (1021): 85–99.

## EFFECT OF LONG-TERM ELECTRIC AND SHORT-TERM ELECTROMAGNETIC STIMULATION OF SPINAL CORD ON PARAMETERS OF CAUSED MUSCLE RESPONSE IN HUMANS

L.V. Roshchin, V.V. Markevich, S.M. Ivanov, R.M. Gorodnichev, A.A. Chelnokov

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

e-mail: and-chelnokov@yandex.ru

*Methods of non-invasive electric and electromagnetic stimulation of the spinal cord are used to study sensory-motor regulation of locomotor movements, to develop muscle strength, and to correct motor disorders. However, the influence of electric and electromagnetic stimulation of the spinal cord on the param-*

ters of motor responses caused by transcranial magnetic stimulation (TMS) remain poorly understood. The aim of the study was to analyze the changes in muscle responses caused by TMS of the cerebral cortex, under long-term electric and short-term electromagnetic stimulation of the spinal cord.

**Materials and Methods.** Fourteen healthy males aged 19–23 were enrolled in the experiment. They underwent electric (20 min.) and electromagnetic (10 sec.) stimulation of the spinal cord at T<sub>11</sub>–T<sub>12</sub> region. The amplitude of *m. gastrocnemius* and *m. tibialis anterior* motor responses was recorded before and after the stimulation.

**Results.** Long-term percutaneous electric stimulation of the spinal cord resulted in an increase in *m. gastrocnemius* motor response amplitude, caused by TMS of the cerebral cortex motor zone, within 10 min after the stimulation. The amplitude of the maximum motor response of this muscle before stimulation was 0.196 mV, and 10 minutes after the stimulation it was 0.270 mV ( $p < 0.05$ ). The amplitude of *m. tibialis anterior* motor responses did not undergo any statistically significant changes and remained practically at the same level as it had been before the electrical stimulation on the lumbar spinal cord thickening. Short-term electromagnetic stimulation of the spinal cord was not accompanied by significant changes in the amplitude of the motor responses of the analyzed muscles.

**Keywords:** induced motor response, electric and electromagnetic stimulation, spinal cord, brain.

## References

1. Gerasimenko Y., Savochin A., Gorodnichev R., Machueva E., Pivovarova E., Semyenov D., Roy R.R., Edgerton V.R. Novel and direct access to the human locomotor spinal circuitry. *J. Neuroscience*. 2010; 30 (10): 3700–3708.
2. Gorodnichev R.M., Pivovarova E.A., Pukhov A.M., Moiseev S.A., Savokhin A.A., Moshonkina T.R., Shcherbakova N.A., Kilimnik V.A., Selionov V.A., Kozlovskaya I.B., Edgerton R., Gerasimenko Yu.P. Chreskozhnaya elektricheskaya stimulyatsiya spinnogo mozga nein vazivnyy sposob aktivatsii generatorov shagatelnykh dvizheniy u cheloveka [Percutaneous electrical stimulation of the spinal cord: a non-invasive way to activate the generators of pacing movements in humans]. *Fiziologiya cheloveka*. 2012; 38 (2): 46–56 (in Russian).
3. Yafarova G.G., Militskova A.D., Shul'man A.A., Spiridonova K.N., Bikchentaeva L.M. Vliyanie transkraniyalnoy magnitnoy stimulyatsii na otvety myshts goleni vyzvannyye chreskozhnoy elektricheskoy stimulyatsiey spinnogo mozga [The effect of transcranial magnetic stimulation on the responses of the leg muscles caused by percutaneous electric stimulation of the spinal cord]. *Prakticheskaya meditsina*. 2017; 8 (109): 201–205 (in Russian).
4. 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.
5. 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 human spinal locomotor systems]. *Fiziologiya cheloveka*. 2016; 1 (42): 73–81 (in Russian).
6. Gerasimenko Y., Moshonkina T., Savochin A., Gad P., Sayenko D., Edgerton V.R., McKinney Z., Gorodnichev R., Puhov A., Selionov V., Shigueva T., Tomilovskaya E., Kozlovskaya I. Integration of sensory, spinal, and volitional descending inputs in regulation of human locomotion. *Journal of Neurophysiology*. 2016; 116 (1): 98–105.
7. Gerasimenko Yu.P., McKinney Z., Saenko D.G., Gad P., Gorodnichev R.M., Grundfest W., Edgerton V.R., Kozlovskaya I.B. Spinalnaya i sensornaya neyromodulyatsiya spinalnykh neyronnykh setey cheloveka [Spinal and sensory neuromodulation of spinal neuronal networks in humans]. *Fiziologiya cheloveka*. 2017; 43 (5): 6–16 (in Russian).
8. Gorodnichev R.M., Belyaev A.G., Pivovarova E.A., Shlyakhtov V.N. Vliyanie elektromagnitnoy stimulyatsii na pokazateli myshechnoy sily [The effect of electromagnetic stimulation on the parameters of muscular strength]. *Fiziologiya cheloveka*. 2014; 40 (1): 76 (in Russian).

9. Yakupov R.N., Balykin Yu.M., Kotova E.Yu., Balykin M.V., Gerasimenko Yu.P. Izmenenie silovykh pokazateley myshts nizhnikh konechnostey pri chreskozhoynoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga [Changes in the strength parameters of the lower extremity muscles under percutaneous electric stimulation of the spinal cord]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2015; 4: 99–103 (in Russian).
10. Fedorov S.A., Gorodnichev R.M., Chelnokov A.A. Vliyanie dlitel'noy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga na silovye vozmozhnosti skeletnykh myshts [Effect of prolonged spinal cord electrical stimulation on skeletal muscle strength]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2017; 1: 123–130 (in Russian).
11. Yakupov R.N., Kotova E.Yu., Balykin Yu.M., Mashin V.V., Balykin M.V., Gerasimenko Yu.P. Vliyanie chreskozhoynoy elektrostimulyatsii spinnogo mozga i mekhanoterapii na vozбудimost spinal'nykh neyronnykh setey i lokomotornye funktsii patsientov s narusheniyami mozgovogo krovoobrascheniya [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. Balykin M.V., Yakupov R.N., Mashin V.V., Kotova E.Yu., Balykin Yu.M., Gerasimenko Yu.P. Vliyanie neinvazivnoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga na lokomotornye funktsii patsientov s dvigatel'nymi narusheniyami tsentralnogo geneza [Influence of non-invasive electrical stimulation of the spinal cord on locomotor function of patients with motor disorders of the central genesis]. *Voprosy kurortologii fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kultury*. 2017; 94 (4): 4–9 (in Russian).
13. Solopova I.A., Sukhotina I.A., Zhvansky D.S., Ikoeva G.A., Vissarionov S.V., Baidurashvili A.G., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P., Moshonkina T.R. Effects of spinal cord stimulation on motor functions in children with cerebral palsy. *Neuroscience Letters*. 2017; 639: 192–198.
14. Gladchenko D.A., Ivanov S.M., Machueva E.N., Pukhov A.M., Moiseev S.A., Piskunov I.V., Gorodnichev R.M. Parametry motornykh otvetov cheloveka pri chreskozhoynoy elektricheskoy i elektromagnitnoy stimulyatsii razlichnykh segmentov spinnogo mozga [Parameters of motor evoked potentials in humans under transcutaneous electrical and electromagnetic stimulation of different segments of spinal cord]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2016; 2: 132–140 (in Russian).
15. Knikou M. Transspinal and transcortical stimulation alter corticospinal excitability and increase spinal output. *PLoS One*. 2014; 9 (7): 1–12.
16. 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.
17. 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; (1021): 85–99.