thymus of rats during different age periods in health and at experimental immunostimulation]. *Morfologiya*. 2013; 7 (4): 11–17.

ФИЗИОЛОГИЯ

УДК 612.832;612.833

ПАРАМЕТРЫ МОТОРНЫХ ОТВЕТОВ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ РАЗЛИЧНЫХ СЕГМЕНТОВ СПИННОГО МОЗГА*

Д.А. Гладченко, С.М. Иванов, Е.Н. Мачуева, А.М. Пухов, С.А. Моисеев, И.В. Пискунов, Р.М. Городничев

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

e-mail: gorodnichev@vlgafc.ru

Известно, что значительную роль в управлении локомоциями человека играют нейрональные сети интернейронов спинного мозга, называемые генераторами шагательных движений. Установлена возможность внешней неинвазивной активации этих сетей различными способами. Мышечные ответы, вызванные разными видами активации, имеют специфические особенности. Ранее нами были изучены особенности активации нейрональных сетей спинного мозга на уровне Т11–Т12. На данном этапе изучались особенности параметров мышечных ответов при стимуляции различных сегментов спинного мозга. В работе использованы методы чрескожной электрической стимуляции (ЧЭССМ) и электромагнитной стимуляции (ЭМС) спинного мозга. Для статистической обработки данных применялся метод однофакторного анализа для повторных измерений (ANOVA). Некоторые параметры вызванных моторных ответов (ВМО) имели достоверные различия при стимуляции ростральных и каудальных сегментов поясничного утолщения. Так, значительно отличались пороги активации мышц при ЧЭССМ ростральных и каудальных сегментов. Последовательность активации мышц при ЧЭССМ ростральных и каудальных сегментов была одинакова, однако изменялась под воздействием ЭМС. Латентность ВМО зависела от локализации стимуляционного воздействия. Амплитуда ВМО при ЧЭССМ значительно превышала аналогичные величины при ЭМС. При обоих видах стимуляции шейного отдела пороги ВМО были достоверно ниже, чем у мышечных ответов нижних конечностей, вызываемых стимуляцией поясничного утолщения. Амплитуда ВМО большинства исследуемых мышц руки при стимуляции на уровне С7-Т1 была значительно выше под воздействием ЧЭССМ, чем при ЭМС. Таким образом, параметры ВМО в определённой степени зависят от вида стимуляции и её локализации.

Ключевые слова: *чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга, электромагнитная стимуляция спинного мозга, интернейрональные сети, ростральные и каудальные сегменты поясничного утолщения, моторные ответы.*

Введение. Осуществление целенаправленных произвольных движений представляет собой важнейший аспект управляющей деятельности головного и спинного мозга человека. Известно, что существенное значение в общей системе управления циклическими движениями (локомоциями) у человека имеют нейрональные сети интернейронов спинного мозга, локализованные в поясничном

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-04-00371, 16-34-01250.

утолщении [1, 2]. Эти нейрональные сети принято называть генераторами шагательных движений (ГШД). В настоящее время установлена возможность активации ГШД неинвазивными способами. Непроизвольные шагательные движения ног у здоровых испытуемых в положении внешней вывески можно вызвать вибрацией сухожилий мышц бедра и голени [1], электрической стимуляцией периферического нерва [3], механической стимуляцией опорной поверхности стопы [4], электромагнитной стимуляцией (ЭМС) спинного мозга [2], чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга (ЧЭССМ) [5]. Активация ГШД под воздействием вибрации, механической стимуляции стопы, электрической стимуляции периферических нервов осуществляется поступающей в спинной мозг афферентной импульсацией от активированных проприорецепторов и возбужденных афферентов. В случае использования ЭМС и ЧЭССМ воздействие направлено на спинальные нейрональные локомоторные сети. Кинематические параметры непроизвольных шагательных движений, вызываемых этими различными по своей природе воздействиями, имеют специфические особенности. Вероятно, специфика координационной структуры вызванных движений определяется локализацией процессов возбуждения, генерируемых в определенных нейрональных структурах спинного мозга под влиянием электромагнитной и электрической стимуляции.

Ранее нами приводились экспериментальные доказательства возможности активирования моно- и полисинаптических нейрональных сетей, участвующих в инициации активности ГШД, посредством ЭМС и ЧЭССМ на уровне грудных позвонков Т11–Т12 [2, 5].

Цель исследования. Изучение параметров мышечных ответов, вызываемых однократной электромагнитной и чрескожной электрической стимуляцией различных сегментов 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 исследовании приняли участие 10 взрослых здоровых испытуемых мужского пола в возрасте 20–25 лет (студенты академии). В соответствии с принципами Хельсинкской декларации было получено письменное информированное согласие испытуемых на участие в экспериментах и разрешение комитета по этике названного вуза на проведение исследований.

Испытуемые располагались на кушетке в положении лёжа на левом боку, при этом ноги размещались на независимых от кушетки и друг от друга горизонтальных подвесах, закреплённых на гибких тросах к потолку по принципу качелей [1, 3]. Высота подвесов регулировалась исходя из анатомических особенностей испытуемого. Точки опоры горизонтальных подвесов поддерживали ноги испытуемых в области голени и позволяли им свободно двигать нижними конечностями в горизонтальной плоскости с максимальной амплитудой. Участникам исследования давались устные стандартные инструкции, призывающие испытуемых лежать спокойно, не препятствуя и не способствуя сокращениям мышц нижних конечностей.

Регистрация вызванных мышечных ответов (ВМО) осуществлялась по методике K. Minassian et al. [6] с помощью электронейромиографа «Нейро МВП-8» (ООО «Нейрософт», Россия). Активный стимулирующий гибкий дисковый электрод (катод) диаметром 30 мм из самоклеющейся токопроводящей резины (FIAB, Италия) располагался поочерёдно в трёх точках по средней линии позвоночника накожно на уровне шейного (позвонки С7–Т1) и поясничного утолщений спинного мозга: рострально (позвонки Т11–Т12) и каудально (позвонки L1–L2) между остистыми отростками. Индифферентные накожные электроды (анод) – гибкие пластины прямоугольной формы (45×80 мм), изготовленные из самоклеющейся токопроводящей резины (FIAB, Италия), – располагались симметрично на ключицах (при стимуляции на уровне С7–Т1) либо на подвздошных гребнях тазовых костей (в случае стимуляции на уровнях Т11–Т12, L1–

L2) [5]. Стимулирующий импульс имел прямоугольную форму, длительность 1 мс, интенсивность от 0 до 100 мА. С целью предотвращения следовых эффектов пауза между импульсами составляла не менее 15 с.

Электромагнитная стимуляция осуществлялась посредством стимулятора Magstim Rapid 2 (Magstim Co. Ltd, U.K.) на тех же уровнях, что и ЧЭССМ. Для стимуляции шейного утолщения использовалась катушка диаметром 70 мм, центр катушки размещался по средней линии позвоночника на уровне позвонков C7–T1. При стимуляции поясничного утолщения использовалась катушка типа HP90 диаметром 130 мм. Катушка располагалась на уровнях T11–T12, L1–L2 плоской поверхностью вплотную к телу испытуемого двумя способами: при первом способе центр катушки размещался на средней линии позвоночника; при втором – над средней линией позвоночника была кромка катушки, при этом сама катушка смещалась латерально вправо. В обоих случаях силовые линии были направлены против часовой стрелки.

В случае стимуляции уровня C7–T1 ответы записывались с четырёх мышц правой руки: m. biceps brachii (BB), m. triceps brachii (TB), m. flexor carpi radialis (FCR), m. abductor pollicis brevis (APB). При стимуляции на уровнях T11–T12 и L1–L2 ответы регистрировались с мышц правой ноги: m. rectus femoris (RF), m. biceps femoris (BF), m. tibialis anterior (TA), m. gastrocnemius medialis (MG).

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью специализированной программы Statistica 10. Рассчитывали среднее арифметическое (M) и ошибку среднего арифметического (m). Достоверность различий параметров мышечных ответов при различных видах стимуляции определяли с помощью однофакторного анализа для повторных измерений (ANOVA). При $p<0,05$ различия считали статистически значимыми.

Результаты. При чрескожной электрической и электромагнитной стимуляции исследуемых сегментов спинного мозга у всех испытуемых были зарегистрированы моторные ответы. Пороги мышечных ответов, вызываемых ЧЭССМ и ЭМС рострального сегмента поясничного утолщения, были выше в сравнении со значениями при стимуляции каудального сегмента. Так, в среднем по группе у всех исследуемых мышц пороги при чрескожной электрической стимуляции рострального сегмента находились в диапазоне 56–61 мА, а при стимуляции каудального отдела – 45–54 мА.

Увеличение интенсивности стимуляционного воздействия приводило к повышению амплитуды мышечных ответов. Первой при чрескожной электрической стимуляции рострального сегмента активировалась икроножная мышца, затем последовательно BF, TA и RF. Последовательность активации мышц в случае нанесения ЧЭССМ в области каудального сегмента была практически аналогична описанной выше.

Порядок появления моторных ответов, вызываемых электромагнитной стимуляцией, был другим. При ЭМС как рострального, так и каудального сегментов первыми активировались мышцы бедра, затем – мышцы голени. Таким образом, порядок появления моторных ответов в определенной мере зависит от вида стимуляционного воздействия на спинной мозг.

Сопоставительный анализ ВМО при различных видах стимуляции выявил ряд специфических особенностей в параметрах мышечных ответов. Так, максимальная амплитуда мышечных ответов, вызванных ЧЭССМ рострального сегмента, была значительно выше в сравнении с аналогичными значениями, зарегистрированными в условиях электромагнитного воздействия (табл. 1, рис. 1).

Латентное время возникновения мышечных ответов на электрическую и электромагнитную стимуляцию в мышцах RF, TA и MG достоверно не различалось. Латентность появления моторного ответа BF была достоверно меньше при электромагнитной стимуляции.

При стимуляции каудального сегмента амплитуда ВМО также была меньше при электромагнитном воздействии на спинной мозг (табл. 2). В этом случае латентный период был достоверно короче в условиях элек-

тромагнитной стимуляции у трех мышц: BF, TA, MG.

Таблица 1

Параметры ВМО при электрической и электромагнитной стимуляции рострального сегмента поясничного утолщения спинного мозга (M±m)

Мышцы	Параметры	ЧЭССМ	ЭМС	p
RF	Латентность, мс	7,11±1,90	7,34±0,44	0,9059
	Амплитуда, мВ	0,42±0,13	0,19±0,06	0,1224
BF	Латентность, мс	**12,82±1,08**	**8,37±1,07**	0,0098
	Амплитуда, мВ	**0,91±0,16**	**0,07±0,01**	0,0001
TA	Латентность, мс	19,85±2,04	18,71±0,72	0,6061
	Амплитуда, мВ	**0,33±0,06**	**0,10±0,01**	0,0033
MG	Латентность, мс	17,94±0,61	18,31±0,17	0,5665
	Амплитуда, мВ	**1,90±0,50**	**0,12±0,02**	0,0028

Примечание. Здесь и далее полужирным шрифтом выделены достоверно различающиеся значения параметров.

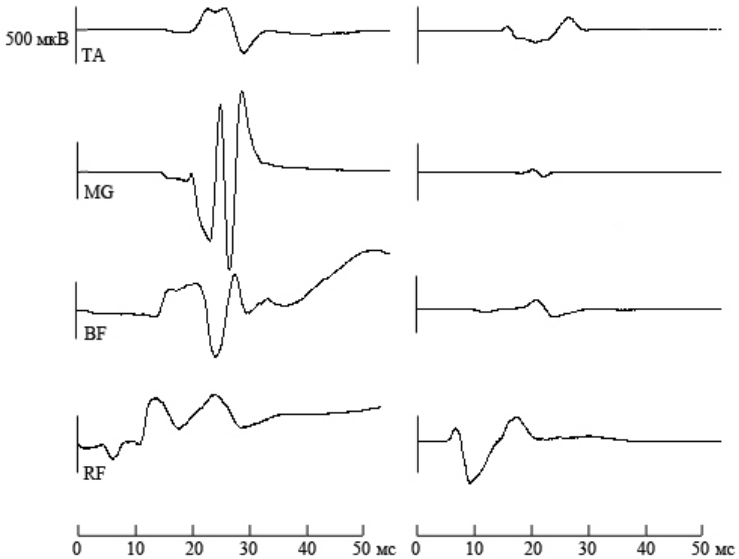

Рис. 1. Моторные ответы мышц правой ноги на ЧЭССМ (слева) и ЭМС (справа)

Таблица 2

Параметры ВМО при электрической и электромагнитной стимуляции каудального сегмента поясничного утолщения спинного мозга

Мышцы	Параметры	ЧЭССМ	ЭМС	p
RF	Латентность, мс	5,90±0,18	6,27±0,17	0,1642
	Амплитуда, мВ	**0,46±0,02**	**0,28±0,07**	0,0358
BF	Латентность, мс	**20,62±2,08**	**8,21±0,59**	0,0001

	Амплитуда, мВ	**1,18±0,16**	**0,28±0,08**	0,0001
TA	Латентность, мс	**20,91±0,14**	**15,39±0,56**	0,0001
	Амплитуда, мВ	**0,35±0,03**	**0,22±0,03**	0,0149
MG	Латентность, мс	**18,95±0,56**	**16,24±0,48**	0,002
	Амплитуда, мВ	**4,22±0,75**	**0,13±0,05**	0,0001

Пороговая интенсивность обоих видов стимуляционного воздействия на шейный отдел спинного мозга, необходимая для возникновения ВМО мышц верхних конечностей, была ниже по сравнению с величиинами порогов, применяемых для активации мышц ног. Среднегрупповые значения порогов при ЧЭССМ составляли 67–72 % от значений, регистрируемых в условиях стимуляции рострального отдела поясничного утолщения.

При исследовании ВМО мышц верхних конечностей, регистрируемых под влиянием двух видов стимуляционного воздействия, обнаружены некоторые отличия. У большинства исследуемых мышц максимальная амплитуда моторных ответов была значительно больше под воздействием ЧЭССМ, чем при ЭМС (табл. 3, рис. 2). Амплитуда максимальных ответов m. biceps brachii на ЧЭССМ и ЭМС достоверно не отличалась и составляла 3,62±0,64 и 3,60±0,47 мВ соответственно.

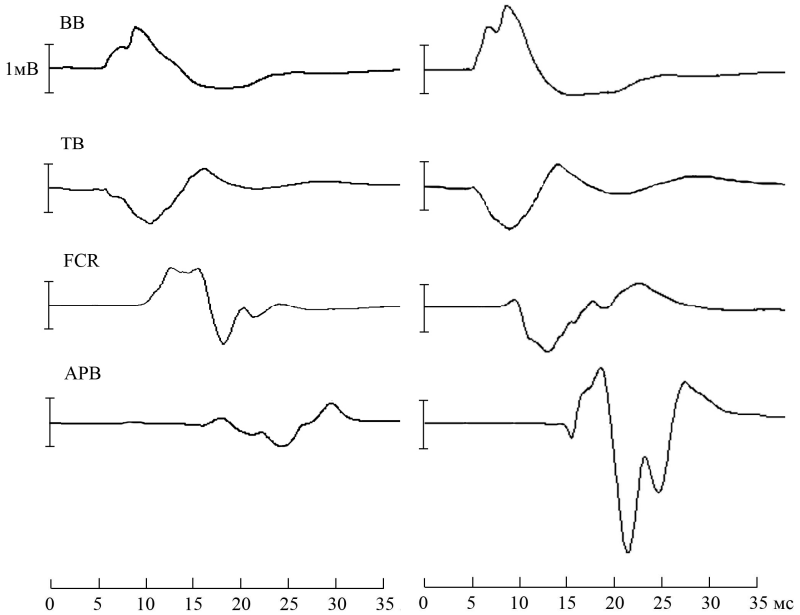

Рис. 2. Моторные ответы мышц правой руки на ЧЭССМ (слева) и ЭМС (справа)

Таблица 3

Параметры ВМО при неинвазивной стимуляции шейного отдела спинного мозга (M±m)

Мышцы	Параметры	ЧЭССМ	ЭМС	p
BB	Латентность, мс	**6,78±0,23**	**5,76±0,10**	0,0001
	Амплитуда, мВ	3,62±0,64	3,60±0,47	0,8206

TB	Латентность, мс	5,93±0,17	5,86±0,21	0,7855
	Амплитуда, мВ	**1,35±0,19**	**0,78±0,11**	0,0086
FCR	Латентность, мс	8,81±0,11	8,65±0,13	0,3611
	Амплитуда, мВ	**4,68±0,49**	**2,80±0,48**	0,008
APB	Латентность, мс	**16,51±0,17**	**15,35±0,23**	0,0001
	Амплитуда, мВ	**3,12±0,62**	**1,73±0,27**	0,0396

Латентность мышечных ответов при стимуляции спинного мозга на уровне C7–T1 шейных позвонков была больше у дистальных мышц по сравнению с проксимальными. Наиболее короткий латентный период на оба вида стимуляции наблюдался у m. biceps brachii и самый длительный – у m. abductor pollicis brevis. У этих мышц латентный период ответов на ЧЭССМ был достоверно больше по сравнению с ЭМС. В других мышцах статистически значимых различий длительности латентного периода на электрическую и электромагнитную стимуляцию не отмечалось.

Обсуждение. Применение неинвазивного электромагнитного и чрескожного раздражения нейронных сетей спинного мозга дает возможность получить доступ для управления спинальными нейрональными структурами, ответственными за инициацию непроизвольной локомоторной активности в условиях внешней поддержки ног [2, 7, 8]. Кинематические и электромиографические характеристики таких непроизвольных шагательных движений во многом аналогичны параметрам произвольных циклических движений, имитирующих шагание в условиях снижения сил гравитации. Есть основания полагать, что в основе этих вызванных и произвольных движений лежат одни и те же нейрофизиологические механизмы. Что касается генеза локомоторной активности, вызываемой различными видами стимуляционного воздействия на спинной мозг, то его механизмы имеют некоторые особенности, определяемые спецификой применяемой стимуляции [2, 3, 5, 9]. Сравнительный анализ параметров ВМО при нанесении однократных электромагнитных и чрескожных электрических стимулов на спинной мозг позволяет приблизиться к пониманию механизмов регуляции локомоторных движений, вызванных ЭМС и ЧЭССМ.

Одним из результатов нашей работы является тот факт, что при электромагнитной стимуляции первыми активировались мышцы бедра, затем – мышцы голени. При использовании ЧЭССМ самой первой активировалась икроножная мышца голени, затем – двуглавая бедра и лишь за ней – другие исследуемые мышцы. Более ранняя активация мышц – сгибателей голени и бедра может в некоторой степени объяснить выявленный ранее феномен опережения непроизвольного движения в коленном суставе движения в тазобедренном суставе при электрической стимуляции спинного мозга в области поясничного утолщения [5].

Другим важным результатом наших исследований является обнаружение более высокой амплитуды моторных ответов, вызванных чрескожным электрическим воздействием на поясничное утолщение спинного мозга в сравнении с ЭМС. Можно предположить, что ЭМС вызывает активацию меньшего количества двигательных единиц, входящих в мотонейронные пулы соответствующих исследуемых мышц нижних конечностей. Вероятно, это связано с локализацией процессов возбуждения в определенных спинальных нейронных сетях, инициируемых электромагнитной стимуляцией спинного мозга. В то же время ЧЭССМ может привести к большей генерализации процессов возбуждения в спинном мозге, так как воздействует и на афференты, расположенные в дорсальных корешках [10–12].

Интересным представляется также факт отсутствия достоверных различий в величинах латентных периодов мышечных ответов, вызываемых двумя видами стимуляции рост-

рального сегмента поясничного утолщения, и, напротив, более короткой латентности появления моторных ответов у трех мышц ног при электромагнитном воздействии на каудальный сегмент спинного мозга в сравнении со значениями, зарегистрированными при ЧЭССМ того же сегмента. Можно предположить, что в последнем случае ЭМС не только вызывает процессы возбуждения в самих интернейронах спинного мозга, но активирует и часть двигательных нервных волокон передних корешков, расположенных на уровне позвонков L1–L2. Наличие такой возможности вытекает из сведений о механизмах электромагнитного воздействия на различные структуры ЦНС, изложенных в публикации P.M. Rossini et al. [13].

Заключение. Электромагнитная и чрескожная электрическая стимуляция ростального и каудального сегментов поясничного утолщения спинного мозга вызывает моторные ответы с мышц нижних конечностей. Параметры вызванных мышечных ответов зависят от вида стимуляционного воздействия и его локализации. Специфические особенности характеристик вызванных мышечных ответов, отражающиеся в латентности, порогах их возникновения и амплитуде, имеют определенное значение для понимания механизмов непроизвольных шагательных движений, вызываемых ЭМС и ЧЭССМ.

Литература

1. *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.
2. *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.
3. *Селионов В.А., Солопова И.А., Иваненко Ю.П.* Активация шагания электрической стимуляцией у человека в условиях разгрузки и его изменения под действием афферентных влияний. Физиология человека. 2009; 35 (3): 42–52.
4. *Томиловская Е.С., Мошонкина Т.Р., Городничев Р.М., Шигуева Т.А., Закирова А.З., Пивоварова Е.А., Савохин А.А., Селионов В.А., Семенов Ю.С., Бревнов В.В., Китов В.В., Герасименко Ю.П., Козловская И.Б.* Механическая стимуляция опорных зон стоп: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека. Физиология человека. 2013; 39 (5): 34–41.
5. *Городничев Р.М., Пивоварова Е.А., Пухов А.М., Моисеев С.А., Савохин А.А., Мошонкина Т.Р., Щербакова Н.А., Килимник В.А., Селионов В.А., Козловская И.Б., Эджертон Р., Герасименко Ю.П.* Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека. Физиология человека. 2012; 38 (2): 46–56.
6. *Minassian K., Persy I., Rattay F., Dimitrijevic M.R., Hofer C., Kern H.* Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord. Muscle Nerve. 2007; 35 (3): 327–336.
7. *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.
8. *Городничев Р.М., Михайлова Е.А., Ершов В.Ю., Герасименко Ю.П., Шляхтов В.Н.* Влияние чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на функциональные свойства моторной системы спортсменов. Теория и практика физической культуры. 2013; 12: 35–38.
9. *Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puchov A., Moshonkina T., Savokhin A., Roy R.R., Edgerton V.R.* Multi-site transcutaneous electrical srimulation of the spinal cord effectively facilitates the locomotor circuitry in non-injured humans (Abstract). Soc. Neurosci. 85.04/MM 14, 2012.
10. *Андриянова Е.Ю., Ланская О.В.* Механизмы двигательной пластичности спинномозговых нервных цепей на фоне долговременной адаптации к спортивной деятельности. Физиология человека. 2014; 40 (3): 73–85.
11. *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.

12. *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.
13. *Rossini P.M., Burke D., Chen R., Cohen L.G., Daskalakis Z., Di Iorio R., Di Lazzaro V., Ferreri F., Fitzgerald P.B., George M.S., Hallett M., Lefaucheur J.P., Langguth B., Matsumoto H., Miniussi C., Nitsche M.A., Pascual-Leone A., Paulus W., Rossi S., Rothwell J.C., Siebner H.R., Ugawa Y., Walsh V., Ziemann U.* Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an I.F.C.N. Committee. Clin. Neurophysiol. 2015; 126 (6): 1071–1107.

PARAMETERS OF MOTOR EVOKED POTENTIALS IN HUMANS UNDER TRANSCUTANEOUS ELECTRICAL AND ELECTROMAGNETIC STIMULATION OF DIFFERENT SEGMENTS OF SPINAL CORD

D.A. Gladchenko, S.M. Ivanov, E.N. Machueva, A.M. Pukhov, S.A. Moiseev, I.V. Piskunov, R.M. Gorodnichev

Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikiye Luki, Russia

e-mail: gorodnichev@vlgafc.ru

It's known that spinal interneuron networks have a significant effect on human locomotion. These networks are usually called central pattern generators for locomotion. It has been proved that remote non-invasive activation of these networks is possible in a number of ways. The parameters of motor evoked potentials (MEP) caused by different activation types have specific features. Previously we studied the peculiarities of spinal cord neuronal networks activation at T11–T12 level. At that stage, we studied the characteristics of MEP parameters under different spinal cord segments stimulation. We used the method of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) and electromagnetic stimulation (EMS) of the spinal cord. Method of univariate analysis for repeated measurements was applied for statistical data processing (ANOVA). Some MEP parameters had significant differences under rostral and caudal segments stimulation of the lumbar enlargement. Thus, thresholds of muscles activation under TENS of rostral and caudal segments differed greatly. The MEP latency during TENS of rostral and caudal segments was the same but it changed under EMS influence. MEP latency did not changed under different types of stimulation, but depended on the stimulation location. MEP amplitude under TES significantly exceeded the similar values under EMS. MEP thresholds of upper limb muscles during both types of cervical segment stimulation were significantly lower than those of the lower limbs muscular responses, caused by stimulation of the lumbar enlargement. MEP amplitude of the majority of upper limb muscles during stimulation at C7–T1 level was significantly higher under TES than under EMS. Thus, MEP parameters depend on the type of stimulation and its location.

Keywords: *transcutaneous electrical nerve stimulation of spinal cord, electromagnetic stimulation, spinal interneuron networks, rostral and caudal segments of lumbar enlargement, motor evoked potentials.*

References

1. Gurfinkel' V.S., Levik Yu.S., Kozennikov O.V., Selionov V.A. Sushchestvuet li generator shagatel'nykh dvizheniy u cheloveka? [Does the central pattern generator for locomotion exist in humans?]. *Fiziologiya cheloveka.* 1998; 24 (3): 42–50 (in Russian).
2. 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.
3. Selionov V.A., Solopova I.A., Ivanenko Yu.P. Aktivatsiya shaganiya elektricheskoy stimulyatsiey u cheloveka v usloviyakh razgruzki i ego izmeneniya pod deystviem afferentnykh vliyaniy [Activation of walking by electrical stimulation in humans under the conditions of muscle unloading and its variations under the effect of afferent influences]. *Fiziologiya cheloveka*. 2009; 35 (3): 42–52 (in Russian).

4. Tomilovskaya E.S., Moshonkina T.R., Gorodnichev R.M., Shigueva T.A., Zakirova A.Z., Pivovarova E.A., Savokhin A.A., Selionov V.A., Semenov Yu.S., Brevnov V.V., Kitov V.V., Gerasimenko Yu.P., Kozlovskaya I.B. Mekhanicheskaya stimulyatsiya opornykh zon stop: neinvazivnyy sposob aktivatsii generatorov shagatel'nykh dvizheniy u cheloveka [mechanical stimulation of soles' support zones: Noninvasive method of activation of central pattern generator for locomotion in humans]. *Fiziologiya cheloveka*. 2013; 39 (5): 34–41 (in Russian).
5. 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., Edzherton R., Gerasimenko Yu.P. Chreskozhnaya elektricheskaya stimulyatsiya spinnogo mozga: neinvazivnyy sposob aktivatsii generatorov shagatel'nykh dvizheniy u cheloveka [Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: a noninvasive tool for the activation of stepping pattern generators in humans]. *Fiziologiya cheloveka*. 2012; 38 (2): 46–56 (in Russian).

6. Minassian K., Persy I., Rattay F., Dimitrijevic M.R., Hofer C., Kern H. Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord. *Muscle Nerve*. 2007; 35 (3): 327–336.
7. 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.
8. Gorodnichev R.M., Mikhaylova E.A., Ershov V.Yu., Gerasimenko Yu.P., Shlyakhtov V.N. Vliyanie chreskozhnoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga na funktsional'nye svoystva motornoy sistemy sportsmenov [The effect of transcutaneous electrical stimulation of spinal cord on functionalities of athletes' motor system]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*. 2013; 12: 35–38 (in Russian).
9. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puchov A., Moshonkina T., Savokhin A., Roy R.R., Edgerton V.R. Multi-site transcutaneous electrical srimulation of the spinal cord effectively facilitates the locomotor circuitry in non-injured humans (Abstract). *Soc. Neurosci*. 85.04/MM 14, 2012.
10. Andriyanova E.Yu., Lanskaya O.V. Mekhanizmy dvigatel'noy plastichnosti spinnomozgovykh nervnykh tsepey na fone dolgovremennoy adaptatsii k sportivnoy deyatel'nosti [Functional plasticity of spinal circuits in long-term sports activity adaptation]. *Fiziologiya cheloveka.* 2014; 40 (3): 73–85 (in Russian).
11. Lanskaya O.V., Andriyanova E.Yu., Lanskaya E.V. Plastichnost' sheynykh i poyasnichno-kresttsovykh spinal'nykh neyronal'nykh setey dvigatel'nogo kontrolya pri zanyatiyakh sportom [Plasticity of cervical and lumbosacral spinal neuronal networks of motor control during physical activity]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*. 2015; 6: 14–16 (in Russian).
12. Mikhaylova E.A., Kozlov V.A., Ershov V.Yu., Gorodnichev R.M. Povyshenie effektivnosti makhovykh dvizheniy pri bege posredstvom chreskozhnoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga [Enhancement of swing movement efficacy while runing via transcutaneous electrical stimulation of spinal cord]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*. 2015; 6: 29–31 (in Russian).
13. Rossini P.M., Burke D., Chen R., Cohen L.G., Daskalakis Z., Di Iorio R., Di Lazzaro V., Ferreri F., Fitzgerald P.B., George M.S., Hallett M., Lefaucheur J.P., Langguth B., Matsumoto H., Miniussi C., Nitsche M.A., Pascual-Leone A., Paulus W., Rossi S., Rothwell J.C., Siebner H.R., Ugawa Y., Walsh V., Ziemann U. Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an I.F.C.N. Committee. *Clin. Neurophysiol*. 2015; 126 (6): 1071–1107.