

УДК: 612.816.1

ОСОБЕННОСТИ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕГОВОГО ШАГА ПРИ ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА

Е.А. Михайлова, М.Г. Барканов

ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта», Великие Луки, Россия
 Для связи с авторами: E-mail: Together-mm@yandex.ru

Аннотация

Целью работы являлось изучение особенностей кинематических и электромиографических параметров циклических движений, выполняемых на фоне непрерывной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ).

Материалы и методы. У 13 здоровых испытуемых мужского пола во время 10-секундного проталкивания ленты пассивной беговой дорожки при ЧЭССМ, а также 10-секундного проталкивания дорожки без электрической стимуляции регистрировались кинематические параметры маховых действий ногой и электрическая активность скелетных мышц.

Результаты. Выявлено, что дистанция перемещения антропометрических точек при выполнении маховых действий ногой в беговом цикле не изменяется, а скорость перемещения увеличивается. Электрическая активность мышц, участвующих в сгибании бедра, при беге со стимуляцией выше, а активность мышц голени ниже, чем при беге без электрического воздействия.

Заключение. ЧЭССМ может использоваться как дополнительный метод повышения функциональных возможностей спортсменов.

Ключевые слова: циклические движения, маховые действия, электрическая стимуляция, спинной мозг.

PECULIARITIES OF BIOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF RUNNING STRIDE WITHIN APPLICATION OF TRANSCUTANEOUS ELECTRICAL STIMULATION OF THE SPINAL CORD

E.A. Mikhaylova, M.G. Barkanov

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

Abstract

The purpose of the research was to study the features of kinematic and electromyographic characteristics of cyclic movements performed on the background of continuous transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord (TESSC).

Materials and methods. The subjects ran at maximum speed for 10 sec on the treadmill in a passive mode with TESSC and for another 10 sec without electrical stimulation. During the exercises we registered the kinematic characteristics of swing-up leg movements and electrical activity of the skeletal muscles.

Results. It was revealed that the distance of anthropometric points' relocation while performing the swing-up leg movements in a running cycle does not change, and the speed of relocation increases. The electric activity of muscles participating in hip flexion is higher while running with stimulation, and the activity of shin muscles is lower than when running is performed without electrical impact.

Conclusion. TESSC can be used as an additional method for increasing functional capacities of athletes.

Keywords: cyclic movements, swing-up movements, electrical stimulation, spinal cord.

ВВЕДЕНИЕ

В основе эффективности соревновательной деятельности бегунов на короткие дистанции лежат сложные взаимодействия функциональных возможностей и особенностей двигательных координаций, проявляющихся в локомоциях с максимальной скоростью. Управление параметрами двигательных дей-

ствий и регуляция величины развиваемых усилий осуществляются за счет координированной деятельности центральной нервной системы и мышечного аппарата спортсмена. В связи с этим актуальным остается вопрос целенаправленного изменения функциональных возможностей моторной системы спортсменов. Ряд нейрофизиологических

исследований посвящен изучению механизмов активации локомоторного генератора шагательных движений (ГША) посредством чрескожной электрической стимуляции спинного мозга [1,2]. Электрическая стимуляция различных отделов нервной системы применяется для оценки пластичности структур моторной системы человека [3]. Стимуляционные методы используются также для повышения функциональных способностей скелетных мышц, но при этом электрические воздействия предъявляются на фоне смоделированного двигательного задания [4], пассивных движений [5] либо в состоянии относительного покоя [6]. Целью нашего исследования являлось выявление особенностей кинематических и электромиографических параметров циклического двигательного действия, выполняемого на фоне непрерывной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на базе Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры Великолукской государственной академии физической культуры и спорта. В исследовании приняли участие 13 мужчин (студенты академии) в возрасте от 20 до 23 лет. Испытуемые выполняли бег с максимальной скоростью на пассивном тредбане (HP CosmosSaturn, Германия), т.е. держась за поручни проталкивали ленту дорожки усилиями ног. Каждый испытуемый выполнял проталкивание в течение 10 с без стимуляции и проталкивание в течение 10 с, во время которого наносилась непрерывная электрическая стимуляция спинного мозга. Между попытками был интервал отдыха, достаточный для полного восстановления. Для стимуляции использовался двухканальный стимулятор КУАОН (ГУАП, СПб). Стимулирующие электроды располагались на коже между остистыми отростками на уровне T11-T12 и T12-L1 позвонков. Сила электрического стимула подбиралась индивидуально для каждого обследуемого и не вызывала болевых

ощущений, частота следования импульсов составляла 30 Гц.

Во время бега регистрировались кинематические и электромиографические (ЭМГ) параметры маховых действий левой ногой. Для регистрации кинематических характеристик движений ноги использовали видеосистему Qualisys (Швеция). Светоотражающие маркеры прикрепляли к антропометрическим точкам тела, совпадающим с осями движения в плечевом, тазобедренном, коленном и голеностопном суставах. Биоэлектрическая активность мышц регистрировалась биполярными поверхностными электродами с помощью 16-канального электромиографа ME-6000 (Финляндия). Отведение осуществлялось с мышц *tensor fasciae latae*, *gluteus maximus*, *rectus femoris*, *biceps femoris*, *gastrocnemius*, *tibialis anterior*. Статистическую обработку данных осуществляли с помощью специализированной программы Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В среднем за 10 с испытуемые выполняли 18 беговых циклов. Для анализа динамики показателей двигательное задание было разделено на 4 части: первая часть – 1-3-й беговые циклы, вторая – 4-8-й циклы, третья – 9-13-й циклы и четвертая – 14-18-й циклы. Результаты параметров движения показали, что в процессе выполнения бега как без стимуляции спинного мозга, так и при ее воздействии прослеживалась тенденция к увеличению времени маховых действий левой ногой. Но время выполнения маха при стимуляционном воздействии было меньше во всех беговых циклах (рисунок 1).

В первые три беговых цикла с ЧЭССМ маховые действия выполнялись на 2,1% быстрее, чем без стимуляции ($p > 0.05$). С 4-го по 8-й беговой цикл разница времени выполнения маха в двух условиях бега сохранялась на уровне 2,4% ($p < 0.05$). Различия временных показателей выполнения маха в 9-13-м и 14-18-м циклах бега при стимуляции и без нее несколько увеличились и составляли 3,9% и 4,0% соответственно ($p < 0.05$) (рисунок 1).

В естественных условиях сокращение времени бегового цикла или его отдельных фаз

возможно вследствие уменьшения длины перемещения сегментов тела или увеличения скорости перемещения. Анализ длины шага осуществлялся по дистанции, пройденной верхнеберцовой антропометрической точкой во время выполнения маховых действий под влиянием электрической стимуляции и без нее по сагиттальной и вертикальной осям. Полученные результаты позволяют утверждать, что ЧЭССМ не оказывает какого-либо значительного влияния на пройденную дистанцию звеньев тела. Так, в 1-3-м циклах бега без стимуляции дистанция, пройденная верхнеберцовой антропометрической точкой по сагиттальной оси, равнялась $0,53 \pm 0,013$ м, при стимуляции – $0,54 \pm 0,001$ м, в заключительной части бега (14-18-й циклы) дистанция в двух условиях бега была одинаковой – 0,58 м. Дистанция, пройденная этой же антропометрической точкой по вертикальной оси во время маховых действий с 4-го по 18-й цикл, была одинаковой как при стимуляции, так и без нее и составляла 0,34 м. Таким образом, сокращение времени фазы маха не связано с уменьшением дистанции, пройденной звеньями тела. Следовательно, можно предположить, что движения ногой выполнялись с большей скоростью.

На фоне ЧЭССМ скорость движения верхнеберцовой антропометрической точки по са-

гиттальной оси во время махового действия была больше, чем без электрического воздействия, на протяжении всего двигательного задания. В первых трех частях бега (1-13-й циклы) разница скорости перемещения антропометрической точки при выполнении маховых действий на фоне стимуляции и без нее составляла от 7,0% до 9,7% ($p < 0,05$), в заключительной части бега (14-18-й циклы) достигла 13,5% ($p < 0,05$). Более значительная разница скорости перемещения антропометрической точки при ЧЭССМ и без стимуляции наблюдалась в движении по вертикальной оси (рисунок 2). ЧЭССМ позволяла поддерживать более высокую скорость маховых действий на протяжении всей дистанции. Различия средних групповых показателей в двух условиях бега в 1-13-м циклах сохранялись практически одинаковыми и составляли в первой части 38,8%, во второй – 38,1%, в третьей – 37,8% ($p < 0,05$). В заключительной части бега (14-18-й циклы) на фоне утомления разница увеличилась до 42,7% ($p < 0,05$). Таким образом, вертикальная составляющая скорости маховых действий позволяла испытуемым выполнять движение быстрее на всем протяжении бегового задания. Вклад маховой ноги в опорную реакцию в период опоры составляет около 50%, поэтому повышение эффективности маховых действий

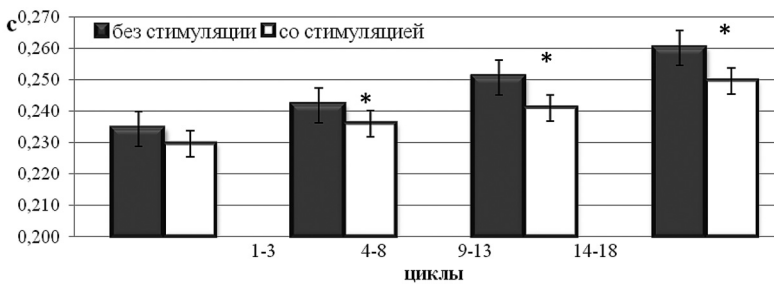


Рисунок 1 – Время выполнения маховых действий в разных циклах бега, с
примечание: * – достоверность различий относительно бега без ЧЭССМ при уровне значимости $p < 0,05$

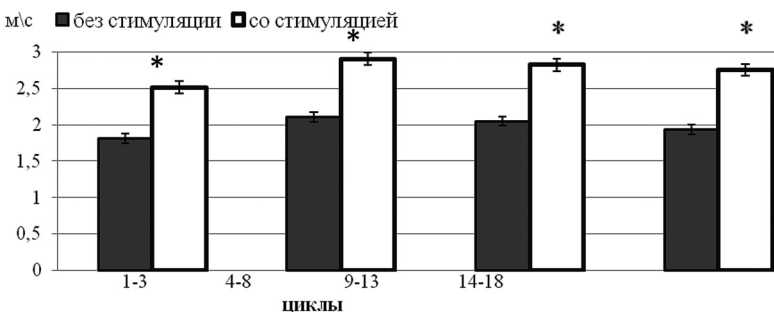


Рисунок 2 – Скорость перемещения верхнеберцовой антропометрической точки по вертикальной оси в разных беговых циклах, м/с
примечание: * – достоверность различий относительно бега без ЧЭССМ при уровне значимости $p < 0,05$

способствует увеличению дистанционной скорости бегунов [7]. Важным обстоятельством полученных результатов является увеличение скорости маховых действий ногой во время применения ЧЭССМ при сохранении внешней структуры двигательного действия.

Источником движущих сил в беге служит работа скелетных мышц. В проведенных исследованиях использование непрерывной электрической стимуляции спинного мозга на фоне выполнения произвольных локомоторных движений сопровождалось увеличением активности скелетных мышц, производящих движение в тазобедренном суставе. В фазе маха в наибольшей степени повышалась электрическая активность мышцы, напрягающей широкую фасцию бедра (*m. tensor fasciae latae*), которая участвует в сгибании бедра. Количественная оценка параметров ЭМГ-активности является косвенной характеристикой величины нисходящего нервного драйва к мышцам. Увеличение амплитуды ЭМГ основных работающих мышц при выполнении беговых движений может быть обусловлено повышением нейрональной активности мотонейронного пула этих мышц под влиянием ЧЭССМ, в результате чего рекрутируется большее количество двигательных единиц.

На примере циклической локомоторной деятельности млекопитающих доказано, что межнейронные взаимодействия вносят весомый вклад в поддержание ритмической активности и осуществление перехода от одной фазы цикла к другой происходит за счет механизма торможения антагонистических интернейронов [8]. Так как бег является циклическим движением со строгой непрерывной последовательностью разных фаз, то можно предположить, что нейронные взаимодействия при реализации этого двигательного задания приводят к дополнительному возбуждению разных групп нейронов в определенную фазу цикла. При рассмотрении средних значений амплитуды биоэлектрических потенциалов *m. tensor fasciae latae* выявлено увели-

чение ЭМГ-активности при ЧЭССМ на 32,9% ($p < 0.05$). При концентрическом сокращении *m. tensor fasciae latae* участвует в сгибании бедра, её повышенная активность в фазе маха при беге со стимуляцией способствует увеличению скорости перемещения бедра из крайнего заднего положения вперед-вверх. При этом стоит отметить, что биоэлектрическая активность мышц голени во время маха была ниже при беге со стимуляцией. Показатели амплитуды биоэлектрических потенциалов *m. tibialis anterior* были снижены на 8,0%, а *m. gastrocnemius* – на 10,0%.

В нейрофизиологических исследованиях показано, что ритмическая активность в нисходящих путях формируется главным образом на основании сигналов о работе спинального локомоторного генератора. На основе информации о его активности осуществляются адекватные супраспинальные влияния на деятельность спинальных механизмов. Сигналы о работе локомоторного генератора дают информацию о фазе локомоторного цикла [8]. Таким образом, можно предполагать, что при использовании ЧЭССМ на фоне произвольных движений формируются сложные нейронные взаимодействия, обусловленные как супраспинальными влияниями, так и дополнительной активацией ГШД, позволяющие эффективнее использовать межмышечные координации в реализации двигательного задания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга позволяет использовать резервные возможности нейрональных цепей спинного мозга при выполнении циклических движений с максимальной скоростью. Во время бега с непрерывной электрической стимуляцией спинного мозга координационная структура двигательных действий не нарушается, что дает основание использовать данный метод как дополнительное средство повышения функциональных возможностей бегунов на короткие дистанции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. Пухов, А. М. Пластичность моторной системы чело-

- века под воздействием локальной физической нагрузки / А. М. Пухов [и др.] // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2017. – №1. – С. 114-122.
4. Федоров, С. А. Влияние длительной электрической стимуляции спинного мозга на силовые возможности скелетных мышц / С. А. Федоров, Р. М. Городничев, А. А. Челноков // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2017. – № 1. – С. 123-130.
 5. Якупов, Р. Н. Изменение силовых показателей мышц нижних конечностей при чрескожной электрической стимуляции спинного мозга / Р. Н. Якупов [и др.] // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2015. – № 4. – С. 100-104.
 6. Рощина, Л. В. Применение чрескожной электрической стимуляции спинного мозга для повышения силовых возможностей скелетных мышц голени / Л. В. Рощина, А. А. Челноков // Междисциплинарность науки как фактор инновационного развития : материалы Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 4-9.
 7. Попов, Г. И. Биомеханика двигательной деятельности : учеб. для студ. учреждений высш. проф. образования / Г. И. Попов, А. В. Самсонова. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 320 с.
 8. Аршавский, Ю. И. Центральные генераторы: механизмы работы и их роль в управлении автоматизированными движениями / Ю. И. Аршавский, Т. Г. Делягина, Г. Н. Орловский // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2015. – № 2. – С. 156-187.

LIST OF REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Pukhov, A. M. Human motor system plasticity under local physical stress / A. M. Pukhov [et al.] // *Ulyanovsk Medico-Biological Journal*. – 2017. – № 1. – P. 114-122.
4. Fedorov, S. A. Impact of prolonged spinal cord electrical stimulation on skeletal muscle strength / S. A. Fedorov, R. M. Gorodnichev, A. A. Chelnokov // *Ulyanovsk Medico-Biological Journal*. – 2017. – № 1. – P. 123-130.
5. Yakupov, R. N. The change in strength of the muscles of the lower limbs during transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord / R. N. Yakupov [et al.] // *Ulyanovsk Medico-Biological Journal*. – 2015. – № 4. – P. 100-104.
6. Roshchina, L. V. Application of transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord for improvement of the power capabilities of shin muscles / L. V. Roshchina, A. A. Chelnokov // *Interdisciplinary science as a factor of innovative development : proceedings of International conference on science and practice*, 2017. – P. 4-9.
7. Попов, Г. И. Биомеханика двигательной деятельности : учеб. для студ. учреждений высш. проф. образования / Г. И. Попов, А. В. Самсонова. – 2nd ed., stereot. – М. : "Academy" Publishing center, 2013. – 320 p.
8. Arshavsky, Y. I. Central generators: mechanisms of activity and their role in the control of automatized movements / Y. I. Arshavsky, T. G. Deliagina, G. N. Orlovsky // *I. P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*. – 2015. – № 2. – P. 156-187.