ISSN 1814-6023 (Print)
ISSN 2524-2350 (Online)
УДК 612.8.02
https://doi.org/10.29235/1814-6023-2026-23-1-68-76

Поступила в редакцию 15.04.2025
Received 15.04.2025

**А. А. Челноков, М. Г. Барканов**

*Великолукская государственная академия физической культуры и спорта, Великие Луки, Российская Федерация*

# ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ СПИНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ БИЛАТЕРАЛЬНЫХ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ У СПОРТСМЕНОВ-ЛЕГКОАТЛЕТОВ

**Аннотация.** Цель исследования – оценить рефлекторную возбудимость моторных ответов билатеральных нижних конечностей у легкоатлетов при одиночном воздействии чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) в области копчикового сплетения на уровне $Co_1$-$Co_2$ и постактивационный эффект кратковременной неинвазивной ритмической электрической стимуляции (рЭС) копчикового сплетения на функциональное состояние спинальных центров билатеральных мышц-антагонистов бедра и голени.

У 30 спортсменов в возрасте 18–27 лет, специализирующихся в беге на короткие дистанции, оценивались амплитуды вызванных моторных ответов (ВМО) мышц бедра (RF – *musculus rectus femoris*, BF – *m. biceps femoris*) и голени (TA – *m. tibialis anterior*, GM – *m. gastrocnemius medialis*) при максимальной одиночной силе стимула (90 мА) по средней линии копчикового сплетения $Co_1$-$Co_2$ и влияние 10- и 60-секундной рЭС на возбудимость мотонейронов (МН) мышц нижних конечностей, вызываемую одиночной силой стимула на уровне $T_{11}$-$T_{12}$ позвонков.

Однократная стимуляция копчикового сплетения вызывает большую рефлекторную возбудимость мотонейронных пулов экстензоров (GM) голени билатеральных конечностей. Рефлекторная возбудимость МН, вызываемая стимуляцией в области копчикового сплетения, выражена больше в спинальных центрах флексора (BF) бедра и экстензора (GM) голени левой конечности, чем в симметричных мышцах правой конечности. рЭС копчикового сплетения приводит к разнонаправленным изменениям в возбудимости МН мышц бедра и голени билатеральных конечностей: у одних спортсменов возбудимость повышалась, у других – снижалась. Постактивационный эффект рЭС копчикового сплетения, независимо от продолжительности ее воздействия, оказывает преимущественно в среднем по группе спортсменов облегчающие влияния на мотонейронные пулы спинальных центров мышц-антагонистов билатеральных конечностей.

Методики регистрации ВМО билатеральных нижних конечностей в ответ на умеренную одиночную чрескожную электрическую стимуляцию копчикового сплетения в области $Co_1$-$Co_2$ и рЭС копчикового сплетения могут быть использованы в клинической и спортивной медицине в качестве одного из методов интраоперационного нейрофизиологического мониторинга у пациентов.

**Ключевые слова:** чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ), ритмическая электрическая стимуляция (рЭС), вызванные моторные ответы (ВМО), облегчение, торможение, мотонейроны (МН), мышцы, копчиковое сплетение

**Для цитирования:** Челноков, А. А. Функциональное состояние спинальных центров билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов / А. А. Челноков, М. Г. Барканов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя медыцынскіх навук. – 2026. – Т. 23, № 1. – С. 68–76. https://doi.org/10.29235/1814-6023-2026-23-1-68-76

**Andrey A. Chelnokov, Maxim G. Barkanov**

*Velikiye Luki State Academy of Physical Culture and Sports, Velikiye Luki, Russian Federation*

# FUNCTIONAL STATE OF THE SPINAL CENTERS OF THE BILATERAL LOWER LIMBS IN ATHLETES

**Abstract.** The aim of the study was to estimate the reflex excitability of motor responses of the bilateral lower limbs in athletes under single exposure to transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord (tSCES) in the coccygeal plexus at the $Co_1$-$Co_2$ level and the post-activation effect of short-term noninvasive rhythmic electrical stimulation (rES) of the coccygeal plexus on the functional state of the spinal centers of the bilateral antagonist muscles of the thigh and tibial leg.

In 30 athletes aged 18-27 years, specializing in short-distance running, the amplitude of the MERs of the muscles of the thigh (RF – *musculus rectus femoris*, BF – *m. biceps femoris*) and tibial (TA – *m. tibialis anterior*, GM – *m. gastrocnemius medialis*) leg was evaluated at a maximum single stimulus force (90 mA) along the midline of the coccygeal plexus $Co_1$-$Co_2$ and the effect of 10- and 60-second rES on the excitability of MNs of the muscles of the lower limbs caused by a single stimulus force at the level of the $T_{11}$-$T_{12}$ vertebrae.

© Челноков А. А., Барканов М. Г., 2026

A single electrical stimulation of the coccygeal plexus causes a greater reflex excitability of the motor neuronal pools of the extensor of the tibia of the bilateral extremities. The reflex excitability of MNs caused by stimulation in the coccygeal plexus is more pronounced in the spinal flexor centers of the thigh and tibial extensor of the left limb than in the symmetrical muscles of the right limb. rES of the coccygeal plexus leads to multidirectional changes in the excitability of MNs of the muscles of the thigh and tibial leg of the bilateral lower limbs: in some athletes, the excitability increased, in others it decreased. The post-activation effect rES of the coccygeal plexus, regardless of its duration of effect, has mainly, on average, a group of athletes, facilitating effect on the motor neuronal pools of the spinal centers of the antagonist muscles of the bilateral lower limbs.

The methods of registering the MERs of the bilateral lower extremities in response to moderate single percutaneous electrical stimulation of the coccygeal plexus in the area of $Co_1$-$Co_2$ and rES coccygeal plexus can be used in clinical and sports medicine, and as one of the methods of intraoperative neurophysiological monitoring in patients.

**Keywords:** transcutaneous electrical stimulation spinal cord (tSCES), rhythmic electrical stimulation (rES), motor evoked responses (MERs), facilitation, inhibition, motor neurons (MNs), muscles, coccygeal plexus

**For citation:** Chelnokov A. A., Barkanov M. G. Functional state of the spinal centers of the bilateral lower limbs in athletes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya medytsynskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Medical series*, 2026, vol. 23, no. 1, pp. 68–76 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1814-6023-2026-23-1-68-76

**Введение.** Неинвазивный метод воздействия на нейрональные структуры спинного мозга с помощью чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) был предложен сравнительно недавно. В 2007 г. K. Minassian [1] и G. Courtine с соавт. [2] была описана методика вызова одновременных моторных моносинаптических ответов билатеральных нижних конечностей при накожной электрической стимуляции на нижнегрудном и поясничном уровнях позвоночника. В литературе встречается разная терминология изучаемых ответов: заднекорешковые мышечные рефлексы, мультисегментарные моносинаптические рефлексы, вызванные корешковые потенциалы, вызванные транспинальные потенциалы и вызванные моторные ответы (ВМО) [3]. Доказано, что эти коротколатентные рефлекторные ответы имеют моносинаптическую природу и идентичны Н-рефлексу мышц верхних и нижних конечностей [3].

В настоящее время неинвазивная ЧЭССМ является эффективным методом изучения спинальных механизмов регуляции локомоторных и постуральных функций у здоровых людей и пациентов с поражениями центральной нервной системы. ЧЭССМ нашла свое практическое применение и является одним из информативных методов интраоперационного нейрофизиологического мониторинга при оценке возбудимости мотонейронов (МН), целостности двигательных корешков и периферических нервов нижних конечностей у пациентов [3, 4], а также в двигательной нейрореабилитации [5]. Установлена эффективность регуляции локомоторной активности в горизонтальной вывеске (шагание в воздухе) у лиц с полным моторным параличом (AIS B) при двухуровневой неинвазивной стимуляции на уровне $T_{11}$-$T_{12}$ совместно со стимуляцией над копчиковым сплетением ($Co_1$) [6]. Проведенные ранее исследования [7] показали, что разработанная нами методика трехуровневой мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга на уровне грудных $T_{11}$-$T_{12}$ и поясничных $L_1$-$L_2$ позвонков и копчикового сплетения в области $Co_1$-$Co_2$ в течение 10 с повышает биоэлектрическую работу мышц и кинематические параметры контралатеральной конечности в различные фазы бегового шага у легкоатлетов. Однако до настоящего времени не изучались возможности вызова моторных ответов у человека с помощью ЧЭССМ в области копчикового сплетения на уровне $Co_1$-$Co_2$.

Цель работы – изучить особенности рефлекторной возбудимости моторных ответов билатеральных нижних конечностей у легкоатлетов при одиночном воздействии ЧЭССМ в области копчикового сплетения на уровне $Co_1$-$Co_2$ и постактивационного эффекта кратковременной неинвазивной ритмической электрической стимуляции (рЭС) копчикового сплетения на функциональное состояние спинальных центров билатеральных мышц-антагонистов бедра и голени.

**Материалы и методы исследования.** Исследование проводилось на базе НИИ проблем спорта и оздоровительной физической культуры Великолукской государственной академии физической культуры и спорта. В исследовании принимали участие 30 спортсменов мужского пола, специализирующихся в беге на короткие дистанции, которые подписали информированное согласие на участие в экспериментах. Протокол исследования был одобрен комиссией академии по вопросам этики (протокол № 4 от 2 ноября 2022 г.).

В первой части исследования у 9 спортсменов (20,75 ± 0,64 лет, КМС, I и II разряды) оценивалась амплитуда ВМО бедра и голени при максимальной одиночной силе стимула (90 мА) по средней линии копчикового сплетения $Co_1$-$Co_2$. Для сравнения ВМО билатеральных конечностей в зависимости от активации спинального участка была проведена вторая серия экспериментов на 12 спортсменах (20,75 ± 0,76 лет, КМС, I и II разряды), у которых оценивалась амплитуда ВМО бедра и голени при максимальной одиночной силе стимула (90 мА) по средней линии в области грудных $T_{11}$-$T_{12}$ позвонков. В третьей серии экспериментов у 9 спортсменов (21,44 ± 1,01 лет, КМС, I и II разряды) оценивалось влияние 10- и 60-секундной рЭС в области копчикового сплетения на возбудимость спинальных центров мышц нижних конечностей, вызываемую одиночной силой стимула (90 мА) на уровне $T_{11}$-$T_{12}$ позвонков.

Для оценки возбудимости α-МН мышц нижних конечностей и постактивационного эффекта рЭС копчикового сплетения применяли регистрацию ВМО [1, 2]. У испытуемых в положении лежа на кушетке лицом вниз осуществляли записи амплитуд ВМО с помощью электронейромиографа «Нейро-МВП-8». Твердый, посеребренный активный накожный стимулирующий электрод площадью 25 мм$^2$ располагали по средней линии позвоночника в области копчикового сплетения на уровне $Co_1$-$Co_2$ (рис. 1, *a*) и между остистыми отростками позвонков $T_{11}$-$T_{12}$ позвоночника (рис. 1, *b*). Индифферентные накожные электроды из токопроводящей резины размером 5 × 9 см накладывали на гребнях подвздошных костей. Стимулирующий импульс имел прямоугольную форму, длительность – 1 мс. Интенсивность одиночного стимула составляла от 0 до 100 мА с шагом +5 мА. У каждого испытуемого регистрировалась кривая зависимости амплитуды ВМО билатеральных нижних конечностей от силы однократного электрического стимула, наносимого в зонах $Co_1$-$Co_2$ (рис. 1, *c*) и $T_{11}$-$T_{12}$ (рис. 1, *d*). У всех испытуемых проводили 3–5 стимуляций с интервалом 15 с при каждой интенсивности одиночного стимула.

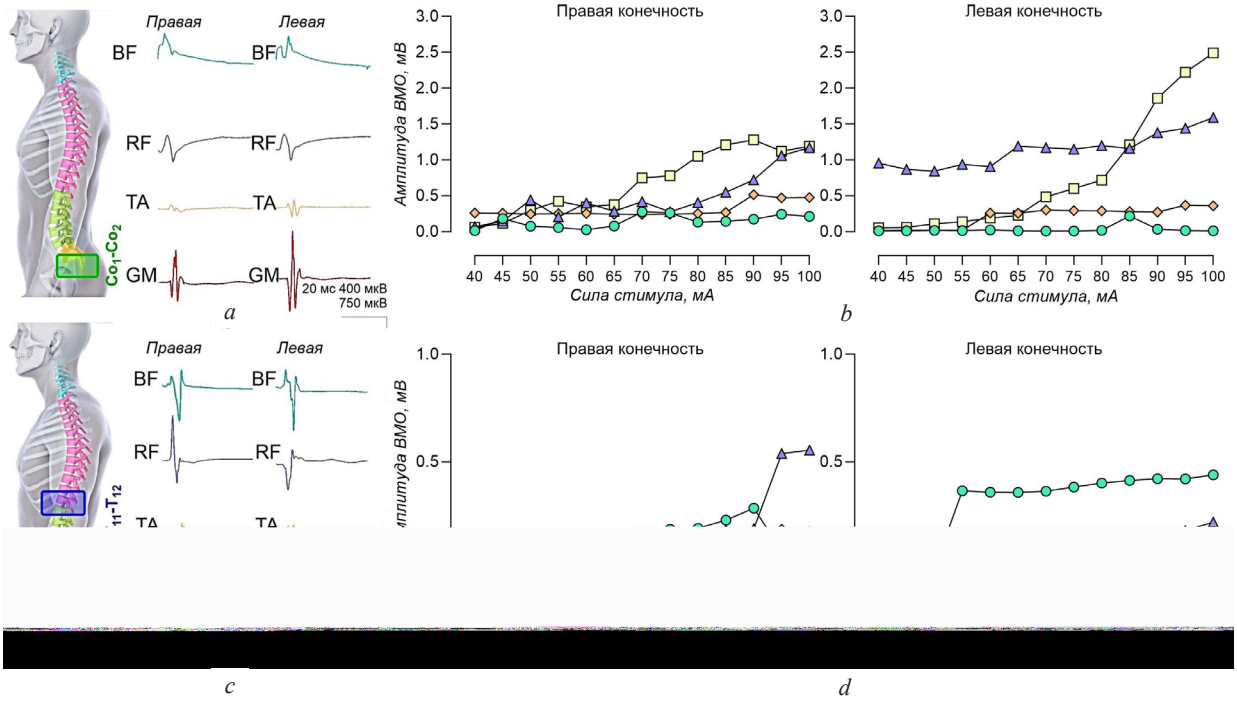


Рис. 1. Записи мышечных ответов нижних конечностей, вызываемых при стимуляции в области копчикового сплетения $Co_1$-$Co_2$ (*a*) и грудных $T_{11}$-$T_{12}$ позвонков (*b*) в положении лежа у легкоатлетов, и индивидуальные кривые зависимости амплитуды моторных ответов мышц нижних конечностей от силы одиночных стимулов, наносившихся в области копчикового сплетения (*c*) и грудных позвонков (*d*)

Fig. 1. Recordings of the muscle responses of the lower limbs caused by stimulation in the coccygeal plexus area of $Co_1$-$Co_2$ (*a*) and thoracic $T_{11}$-$T_{12}$ vertebrae (*b*) in the prone position in athletes and individual curves of dependence of the amplitude of motor responses of the muscles of the lower limbs on the strength of single stimuli applied in the area of the coccygeal plexus (*c*) and thoracic vertebrae (*d*)

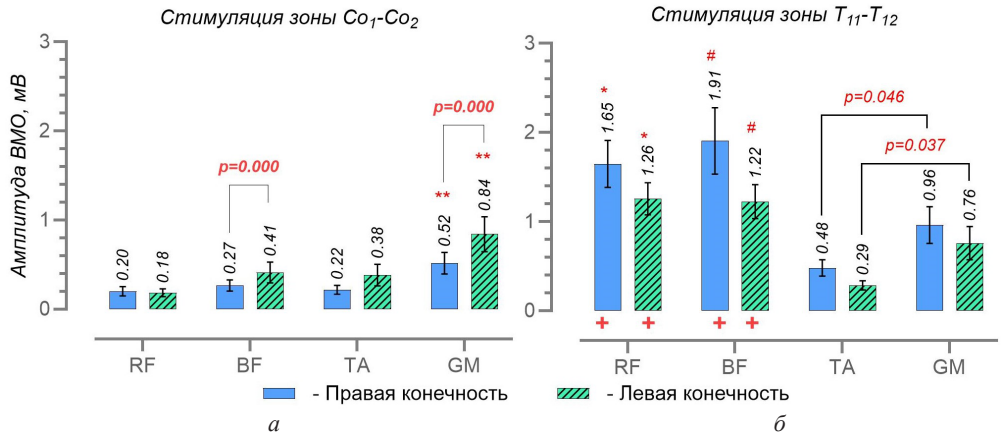


Рис. 3. Средние значения амплитуды ВМО нижних конечностей у легкоатлетов при стимуляции копчикового сплетения $Co_1$-$Co_2$ (*a*) и грудных $T_{11}$-$T_{12}$ позвонков (*b*), мВ (*p* – достоверные отличия при уровне значимости *p* = 0,05; * – достоверные отличия в амплитуде ВМО RF по отношению к TA и GM; # – достоверные отличия в амплитуде ВМО BF по отношению к TA и GM; ** – достоверные отличия в амплитуде ВМО GM по отношению к TA, BF и RF (критерий Вилкоксона); + – достоверные различия в амплитудах ВМО при стимуляции зоны $T_{11}$-$T_{12}$ по отношению к стимуляции зоны $Co_1$-$Co_2$ (критерий Краскела – Уоллиса))

Fig. 3. Mean values of the amplitude of the MERs of the limbs in athletes during stimulation in the coccygeal plexus of $Co_1$-$Co_2$ (*a*) and thoracic $T_{11}$-$T_{12}$ vertebrae (*b*), mV (*p* – significant differences at the significance level of *p* = 0.05; * – significant differences in the amplitude of the WMO RF relative to TA and GM; # – significant differences in the amplitude of the MERs BF relative to TA and GM; ** – significant differences in the amplitude of the MERs GM relative to TA, BF and RF (Wilcoxon test); + – significant differences in the amplitudes of MERs during stimulation of the $T_{11}$-$T_{12}$ l zone in relation to stimulation of at the $Co_1$-$Co_2$ (Kruskal – Wallis test)

*p* = 0,000**) (рис. 3, *a*). Амплитуды ВМО GM и BF левой конечности достоверно значимо преобладали на 0,34 мВ (*p* = 0,000) и 0,14 мВ (*p* = 0,000) соответственно по сравнению с правой конечностью. Не выявлено достоверно значимых различий в амплитудах мышечных ответов RF и TA левой и правой конечностей (*p* = 0,781; *p* = 0,249).

Выраженные моторные ответы обеих конечностей, вызываемые стимуляцией зоны $T_{11}$-$T_{12}$, характерны для мышц бедра RF (правая – 1,65 мВ [0,10; 3,99], *p* = 0,000*; левая – 1,26 мВ [0,42; 3,57], *p* = 0,000*) и BF (правая – 1,91 мВ [0,16; 6,08], *p* = 0,000#; левая – 1,22 мВ [0,01; 2,89], *p* = 0,000#) по сравнению с TA (правая – 0,48 мВ [0,08; 1,37]; левая – 0,29 мВ [0,02; 0,77]) и GM (правая – 0,96 мВ [0,02; 6,08]; левая – 0,76 мВ [0,05; 2,71]) (рис. 3, *b*). Достоверно значимых различий в амплитуде ВМО мышц бедра левой и правой конечностей не выявлено (*p* = 0,116–1,000). Однако мышечные ответы GM правой и левой конечностей были больше на 0,48 мВ (*p* = 0,046) и 0,47 мВ (*p* = 0,037) по сравнению с TA.

При стимуляции зоны $T_{11}$-$T_{12}$ абсолютные величины амплитуд ВМО проксимальных мышц обеих конечностей больше, чем при стимуляции копчикового сплетения (рис. 3, *a*, *b*). В данном случае амплитуды мышечных ответов RF и BF правой конечности, вызванных стимуляцией зоны $T_{11}$-$T_{12}$, больше на 1,45 мВ (*p* = 0,000) и 1,64 мВ (*p* = 0,002) соответственно, левой конечности – на 1,08 мВ (*p* = 0,000) и 0,81 мВ (*p* = 0,002).

Изменение рефлекторной возбудимости моторных центров билатеральных нижних конечностей у легкоатлетов в ответ на 10-секундную рЭС носили индивидуальный характер: у одних спортсменов постактивационный эффект проявлялся облегчением амплитуды ВМО, а у других – торможением. У большинства спортсменов (4–8 человек из 9) амплитуда ВМО бедра и голени повышалась, однако уменьшение амплитуды ответов зарегистрировано у 1–5 человек из 9. Усреднение данных (рис. 4, *a*) показало, что постактивационный эффект 10-секундной рЭС сопровождался облегчением спинальных α-МН билатеральных конечностей. Облегчение амплитуд ВМО BF, TA, GM левой конечности было больше одноименных мышц правой конечности на 29,11; 6,44 и 5,52 % соответственно, а облегчение ВМО RF правой конечности – больше на 6,93 % одноименной мышцы левой конечности. При попарном сравнении выявлено только достоверно

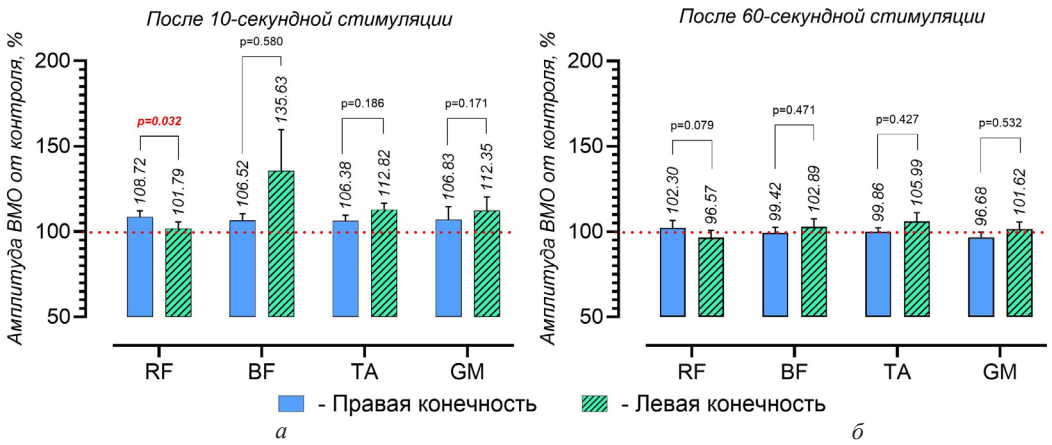


Рис. 4. Средние значения облегчения и торможения амплитуд ВМО нижних конечностей у легкоатлетов после прекращения 10- (*a*) и 60-секундной (*b*) рЭС копчикового сплетения, % ($n$ = 9) ($p$ – достоверные отличия при уровне значимости $p$ = 0,05 (критерий Вилкоксона))

Fig. 4. Mean values of facilitation and inhibition of the amplitudes of the MERs of the limbs in athletes after cessation 10- (*a*) and 60-second (*b*) rES in the coccygeal plexus, % ($n$ = 9) ($p$ – significant differences with at the significance level of $p$ = 0.05 (Wilcoxon test))

значимое превалирование облегчения ВМО правой RF в сравнении с левой одноименной мышцей ($p$ = 0,032).

В постактивационный период 60-секундной рЭС у большинства легкоатлетов (3–8 человек из 9) регистрировалось повышение амплитуд ВМО, а у остальных (3–6 человек из 9) – снижение. При попарном сравнении усредненных амплитуд ВМО бедра и голени правой и левой конечностей не выявлено достоверно значимых различий в облегчении и торможении ($p$ = 0,079–0,532) после 60-секундной рЭС (рис. 4, *b*). Множественное сравнение постактивационных эффектов рЭС на амплитуды ВМО (в %) билатеральных нижних конечностей у легкоатлетов показало однонаправленные изменения в рефлекторной возбудимости спинальных α-МН бедра и голени билатеральных конечностей вне зависимости от продолжительности воздействия рЭС ($p$ = 0,098–0,634 Kruskal-Wallis test).

В результате собственных исследований на основании изучения особенностей ВМО билатеральных нижних конечностей было установлено, что у легкоатлетов при накожной электростимуляции зон $T_{11}$-$T_{12}$ и $Co_1$-$Co_2$ в положении лежа на кушетке лицом вниз имели место отличительные особенности в возбудимости α-МН бедра и голени билатеральных конечностей. Рефлекторные моторные ответы у легкоатлетов различались в зависимости от зоны стимуляции спинного мозга, направления расположения мышц (проксимально или дистально) и стороны (правая или левая) конечности, с которой мышечные ответы были вызваны одиночным стимулом. Анализ и систематизация накопившихся данных показали, что в настоящее время накопилось многочисленное количество исследований в области изучения ВМО билатеральных конечностей, вызываемых стимуляцией зон шейных, грудных, поясничных и крестцовых сегментов спинного мозга у здоровых людей [1, 2, 8], при стимуляции зон шейного, пояснично-крестцового утолщений у спортсменов разной квалификации [8], при стимуляции зоны $T_{11}$-$T_{12}$ у легкоатлетов [9]. Следовательно, полученные нами результаты о различии в моторных ответах билатеральных конечностей, вызываемых стимуляцией зоны $T_{11}$-$T_{12}$, дополняют их более точными данными о рефлекторной возбудимости спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей у спортсменов, специализирующихся в беге на короткие дистанции.

Совершенно новые данные ВМО билатеральных конечностей получены нами при однократной стимуляции зоны копчикового сплетения. Впервые установлено, что при максимальной одиночной силе стимула на уровне $Co_1$-$Co_2$ амплитуда ВМО мышц голени (GM) билатеральных конечностей больше в сравнении с проксимальными мышцами (RF, BF) и дистальными флексорами (TA) обеих конечностей, при этом наибольшая рефлекторная возбудимость α-МН выраже-

на в спинальных центрах флексора бедра (BF) и экстензора голени (GM) левой конечности, чем в одноименных мышцах контралатеральной конечности.

Одним из результатов нашей работы является тот факт, что при стимуляции спинного мозга на уровне $T_{11}$-$T_{12}$ выявлена большая рефлекторная активность проксимальных мышц билатеральных конечностей в сравнении с дистальными мышцами, а при стимуляции зоны в области копчикового сплетения – дистальных мышц-экстензоров голени (GM) симметричных конечностей. Мы полагаем, что такие различия могут быть связаны с разным расстоянием анатомического расположения мотонейронных пулов мышц бедра и голени в сегментах спинного мозга (RF – сегменты $L_3$-$L_5$, BF – $L_5$-$S_2$, TA – $L_4$-$S_1$, GM – $S_1$-$S_2$) [10] и зонами активации спинального участка ($T_{11}$-$T_{12}$ и $Co_1$-$Co_2$), при которых потенциалы действия будут распространяться по проприоспинальным путям в ростральном или каудальном направлениях к двигательным ядрам флексоров и экстензоров бедра и голени, вызывая наибольшие рефлекторные ответы мышц от близлежащих стимуляционных зон спинного мозга.

В литературе накопилось большое количество работ о постактивационом влиянии ЧЭССМ на функциональное состояние моторной системы у человека [11–14]. В то же время мы не располагаем данными о том, как проявляют себя спинальные нейрональные структуры мышц бедра и голени билатеральных конечностей на воздействие рЭС копчикового сплетения. Наши исследования показали, что кратковременная рЭС копчикового сплетения приводит к изменению амплитуды моторных ответов, вызываемых однократной электрической стимуляцией на уровне $T_{11}$-$T_{12}$ позвонков. Такая динамика амплитуды ВМО отражала опосредованный постактивационный эффект стимуляции копчикового сплетения на возбудимость мотонейронных пулов. Воздействие 10- и 60-секундной рЭС копчикового сплетения у легкоатлетов приводило к разнонаправленным изменениям в возбудимости спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей: у одних спортсменов возбудимость повышалась, у других – снижалась. В целом постактивационный эффект рЭС копчикового сплетения у спортсменов, вне зависимости от продолжительности воздействия, проявлялся преимущественно облегчающими влияниями на α-МН спинальных центров мышц бедра и голени билатеральных конечностей.

При рассмотрении возможных физиологических механизмов, лежащих в основе облегчения/торможения спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей, можно предположить, что причиной этому, вероятно, может быть изменение свойств синапсов, локализующихся в нейрональных сетях, обеспечивающих генерирование ВМО. Литературные данные последних лет [15] указывают, что рЭС на спинальные структуры приводит к разнообразным функциональным изменениям в синапсах, которые могут зависеть от зоны спинального участка размещения электродов при ЧЭССМ, интенсивности стимуляции, частоты и продолжительности. Многократная активация синапсов повышает потенциал покоя пресинаптической мембраны и таким образом способствует генерации потенциала действия в мышечном волокне, увеличению его амплитуды. Значительный по амплитуде потенциал действия обеспечивает выброс большого количества медиаторов в синаптическую щель. Помимо этого, при рЭС возрастает запас медиатора, готового к выделению. Следовательно, можно полагать, что синаптические изменения, обусловленные ритмическим электрическим воздействием, по-видимому, могут создавать более благоприятные условия для генерации потенциала действия в мышечных волокнах [7]. Что касается других возможных физиологических процессов, определяющих облегчение/торможение мотонейронных пулов при рЭС копчикового сплетения, то вероятной причиной этому может быть активация спинальных интернейрональных тормозных сетей. На такую возможность указывают результаты исследования о влиянии ЧЭССМ на функциональную активность спинального торможения в системе мышц-антагонистов и синергистов голени у человека, которые показали, что в течение 20-минутной рЭС на уровне $T_{11}$-$T_{12}$ позвонков выраженность реципрокного, нереципрокного, возвратного торможения снижалась, инвертируясь на их облегчение, а выраженность пресинаптического торможения, по сравнению с другими видами, была больше и не отличалась на всем протяжении электрического воздействия на спинной мозг [11, 13]. Таким образом, для понимания нейрофизиологических механизмов рЭС копчикового сплетения в перспективе дальнейших исследований необходимо более детально изучить ее

влияние на активность спинальных тормозных механизмов в системе мышц-антагонистов и агонистов у здоровых и лиц с двигательными расстройствами. В недавних исследованиях, проведенных K. Minassian с коллегами [16], также приводятся убедительные данные о том, что последействие 30-минутной ЧЭССМ временно восстанавливает пре- и постсинаптические тормозные сети спинного мозга мышц-антагонистов бедра и голени у пациентов со спастичностью.

**Заключение.** Методики регистрации ВМО нижних конечностей в ответ на умеренную одиночную электрическую стимуляцию копчикового сплетения в области $Co_1$-$Co_2$ и рЭС копчикового сплетения могут быть использованы в клинической и спортивной медицине, в фундаментальных исследованиях при изучении супраспинальных и сегментарных механизмов нейромодуляции тормозных интернейрональных сетей в обеспечении моторного контроля, а также в качестве одного из методов интраоперационного нейрофизиологического мониторинга у пациентов.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Список использованных источников


1. Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord / K. Minassian, I. Persy, F. Rattay [et al.] // Muscle and Nerve. – 2007. – Vol. 35, N 3. – P. 327–336. https://doi.org/10.1002/mus.20700

2. Modulation of multisegmental monosynaptic responses in a variety of leg muscles during walking and running in humans / G. Courtine, S. J. Harkema, C. J. Dy [et al.] // The Journal of Physiology. – 2007. – Vol. 582, N 3. – P. 1125–1139. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.128447

3. Minassian, K. The posterior root-muscle reflex / K. Minassian, B. Freundl, U. S. Hofstoetter // Neurophysiology in Neurosurgery: A Modern Approach / eds.: V. Deletis, J. L. Shils, F. Sala, K. Seidel. – 2nd ed. – London, 2020. – P. 239–253. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815000-9.00018-6

4. Advancing Intraoperative Neurophysiological Monitoring with Human Reflexes / J. Choi, A. Díaz-Baamonde, M. L. Á. Sánchez Roldán [et al.] // Journal of Clinical Neurology. – 2024. – Vol. 20, N 2. – P. 119–130. https://doi.org/10.3988/jcn.2023.0416

5. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation and Motor Rehabilitation in Spinal Cord Injury: A Systematic Review / A. M. García, D. Serrano-Muñoz, J. Taylor [et al.] // Neurorehabilitation and Neural Repair. – 2020. – Vol. 34, N 1. – P. 3–12. https://doi.org/10.1177/1545968319893298

6. Noninvasive Reactivation of Motor Descending Control after Paralysis / Y. P. Gerasimenko, D. C. Lu, M. Modaber [et al.] // Journal of Neurotrauma. – 2015. – Vol. 32, N 24. – P. 1968–1980. https://doi.org/10.1089/neu.2015.4008

7. Барканов, М. Г. Особенности вызванных мышечных ответов и кинематических параметров скоростных локомоторных движений при чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга / М. Г. Барканов, Р. М. Городничев // Физиология человека. – 2022. – Т. 48, № 5. – С. 49–59.

8. Ланская, О. В. Физиологические механизмы функциональной пластичности спинальных систем двигательного контроля при занятиях спортом / О. В. Ланская, Е. Ю. Андриянова. – Великие Луки: Великолук. гос. акад. физ. культуры и спорта, 2013. – 231 с.

9. Моносинаптическое тестирование локомоторных мышц как дополнительный метод мониторирования нейромышечного статуса спортсменов / Е. А. Михайлова, А. А. Челноков, А. В. Лапченков, Ю. А. Поварещенкова // Лечебная физкультура и спортивная медицина. – 2010. № 10 (82). – С. 25–30.

10. Spinal maps of motoneuron activity during human locomotion: neuromechanical considerations / P. Avaltroni, G. Cappellini, F. Sylos-Labini [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2024. – Vol. 15. – Art. e1389436. https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1389436

11. Эффект чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на функциональную активность спинального торможения в системе мышц-синергистов голени у человека / А. А. Челноков, Л. В. Рощина, Д. А. Гладченко [и др.] // Физиология человека. – 2022. – Т. 48, № 2. – С. 14–27.

12. P208. The effects of transcutaneous spinal cord stimulation on spinal reciprocal inhibition in healthy persons / T. Yamaguchi, T. Fujiwara, T. Takahara [et al.] // Clinical Neurophysiology. – 2017. – Vol. 128, N 3. – P. e115–e116. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.10.326

13. Effect Of Transcutaneous Electrical Spinal Cord Stimulation On The Functional Activity Of Reciprocal And Presynaptic Inhibition In Healthy Subjects / D. A. Gladchenko, L. V. Roshchina, S. M. Bogdanov, A. A. Chelnokov // Russian Open Medical Journal. – 2022. – Vol. 11, N 3. – Art. e0302. https://doi.org/10.15275/rusomj.2022.0302

14. The effects of transcutaneous spinal cord stimulation delivered with and without high-frequency modulation on spinal and corticospinal excitability / S. Massey, D. Konig, P. Upadhyay [et al.] // Artificial Organs. – 2024. – Vol. 48, N 3. – P. 297–308. https://doi.org/10.1111/aor.14660

15. Optimizing Transcutaneous Spinal Stimulation: Excitability of Evoked Spinal Reflexes is Dependent on Electrode Montage / K. L. Thatcher, K. E. Nielsen, E. B. Sandler [et al.] // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. – 2025. – Vol. 22, N 1. – Art. 2. https://doi.org/10.1186/s12984-024-01524-5

16. Transcutaneous spinal cord stimulation neuromodulates pre- and postsynaptic inhibition in the control of spinal spasticity / K. Minassian, B. Freundl, P. Lackner, U. S. Hofstoetter // Cell Reports Medicine. – 2024. – Vol. 5, N 11. – Art. e101805. https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2024.101805

## References

1. 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 and Nerve*, 2007, vol. 35, no. 3, pp. 327–336. https://doi.org/10.1002/mus.20700

2. Courtine G., Harkema S. J., Dy C. J., Gerasimenko Y. P., Dyhre-Poulsen P. Modulation of multisegmental monosynaptic responses in a variety of leg muscles during walking and running in humans. *The Journal of Physiology*, 2007, vol. 582, no. 3, pp. 1125–1139. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.128447

3. Minassian K., Freundl B., Hofstoetter U. S. The posterior root-muscle reflex. *Neurophysiology in Neurosurgery*: *A Modern Approach. 2nd ed*. London, 2020, pp. 239–253. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815000-9.00018-6

4. Choi J., Díaz-Baamonde A., Sánchez Roldán M. L. Á., Pescador A. M., Kim J.-S., Téllez M. J., Park K. S, Deletis V. Advancing Intraoperative Neurophysiological Monitoring with Human Reflexes. *Journal of Clinical Neurology*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 119–130. https://doi.org/10.3988/jcn.2023.0416

5. García A. M., Serrano-Muñoz D., Taylor J., Avendaño-Coy J., Gómez-Soriano J. Transcutaneous Spinal Cord Stimulation and Motor Rehabilitation in Spinal Cord Injury: A Systematic Review. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, vol. 34, no. 1, pp. 3–12. https://doi.org/10.1177/1545968319893298

6. 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. Noninvasive Reactivation of Motor Descending Control after Paralysis. *Journal of Neurotrauma*, 2015, vol. 32, no. 24, pp. 1968–1980. https://doi.org/10.1089/neu.2015.4008

7. Barkanov M. G., Gorodnichev R. M. Peculiarities of Induced Muscle Responses and Kinematic Parameters of High-Speed Locomotor Movements under Percutaneous Electrical Stimulation of Different Spinal Cord Areas. *Human Physiology*, 2022, vol. 48, no. 5, pp. 526–534. https://doi.org/10.1134/S036211972204003X

8. Lanskaya O. V., Andriyanova E. Yu. *Physiological mechanisms of functional plasticity of spinal motor control systems during sports*. Velikiye Luki, Velikiye Luki State Academy of Physical Culture and Sports, 2013. 231 p. (in Russian).

9. Mikhailova E. A., Chelnokov A. A., Lapchenkov A. V., Povareshchenkova Yu. A. Monosynaptic testing of lokomotor muscles as an additional method to monitor neuromuscular status of athletes. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina* [Exercise therapy and Sports Medicine], 2010, vol. 10, no. 82, pp. 25–30 (in Russian).

10. Avaltroni P., Cappellini G., Sylos-Labini F., Ivanenko Y., Lacquaniti F. Spinal maps of motoneuron activity during human locomotion: neuromechanical considerations. *Frontiers in Physiology*, 2024, vol. 15, art. e1389436. https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1389436

11. Chelnokov A. A., Roshchina L. V., Gladchenko D. A., Pivovarova E. A., Piskunov I. V., Gorodnichev R. M. The Effect of Transcutaneous Electrical Spinal Cord Stimulation on the Functional Activity of Spinal Inhibition in the System of Synergistic Muscles of the Lower Leg in Humans. *Human Physiology*, 2022, vol. 48, no. 2, pp. 121–133. https://doi.org/10.1134/S0362119722020037

12. Yamaguchi T., Fujiwara T., Takahara T., Takahashi Y., Mizuno K., Ushiba J., Masakado Y., Liu M. P208. The effects of transcutaneous spinal cord stimulation on spinal reciprocal inhibition in healthy persons. *Clinical Neurophysiology*, 2017, vol. 128, no. 3, pp. e115–e116. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.10.326

13. Gladchenko D. A., Roshchina L. V., Bogdanov S. M., Chelnokov A. A. Effect of transcutaneous electrical spinal cord stimulation on the functional activity of reciprocal and presynaptic inhibition in healthy subjects. *Russian Open Medical Journal*, 2022, vol. 11, no. 3, art. e0302. https://doi.org/10.15275/rusomj.2022.0302

14. Massey S., Konig D., Upadhyay P., Evcil Z. B., Melin R., Fatima M., Hannah R., Duffell L. The effects of transcutaneous spinal cord stimulation delivered with and without high-frequency modulation on spinal and corticospinal excitability. *Artificial Organs*, 2024, vol. 48, no. 3, pp. 297–308. https://doi.org/10.1111/aor.14660

15. Thatcher K. L., Nielsen K. E., Sandler E. B., Daliet O. J., Iddings J. A., Field-Fote E. C. Optimizing Transcutaneous Spinal Stimulation: Excitability of Evoked Spinal Reflexes is Dependent on Electrode Montage. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2025, vol. 22, no. 1, art. 2. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4719031/v1

16. Minassian K., Freundl B., Lackner P., Hofstoetter U. S. Transcutaneous spinal cord stimulation neuromodulates pre- and postsynaptic inhibition in the control of spinal spasticity. *Cell Reports Medicine*, 2024, vol. 5, no. 11, art. 101805. https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2024.101805

## Информация об авторах

*Челноков Андрей Алексеевич* – д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой. Великолукская государственная академия физической культуры и спорта (пл. Юбилейная, 4, 182100, г. Великие Луки, Российская Федерация). E-mail: and-chelnokov@yandex.ru. https://orcid.org/0000-0003-0502-5752

*Максим Геннадьевич Барканов* – преподаватель кафедры. Великолукская государственная академия физической культуры и спорта (пл. Юбилейная, 4, 182100, г. Великие Луки, Российская Федерация). E-mail: barckanov.max@yandex.ru. https://orcid.org/0000-0003-2006-0863

## Information about the authors

*Andrey A. Chelnokov* – D. Sc. (Biol.), Professor, Head of the Department. Velikiye Luki State Academy of Physical Culture and Sports (4, Yubileynaya Square, 182100, Velikiye Luki, Russian Federation). E-mail: and-chelnokov@yandex.ru. https://orcid.org/0000-0003-0502-5752

*Maxim G. Barkanov* – Lecturer of the Department. Velikiye Luki State Academy of Physical Culture and Sports (4, Yubileynaya Square, 182100, Velikiye Luki, Russian Federation). E-mail: barckanov.max@yandex.ru. https://orcid.org/0000-0003-2006-0863