УДК 612.83

# ЭФФЕКТ ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА НА ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ АКТИВНОСТЬ СПИНАЛЬНОГО ТОРМОЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ МЫШЦ-СИНЕРГИСТОВ ГОЛЕНИ У ЧЕЛОВЕКА

© 2022 г. А. А. Челноков<sup>1,</sup> \*, Л. В. Рощина<sup>1</sup>, Д. А. Гладченко<sup>1</sup>, Е. А. Пивоварова<sup>1</sup>, И. В. Пискунов<sup>1</sup>, Р. М. Городничев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Великолукская государственная академия физической культуры и спорта, Великие Луки, Россия \*E-mail: and-chelnokov@yandex.ru Поступила в редакцию 28.12.2020 г. После доработки 25.01.2021 г. Принята к публикации 30.04.2021 г.

Изучалось влияние 20-минутной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) на выраженность нереципрокного и возвратного торможения спинальных α-мотонейронов у человека в состоянии покоя и слабого по величине мышечного усилия. Установлено, что на протяжении всего времени воздействия ЧЭССМ в состоянии покоя нереципрокное и возвратное торможение  $\alpha$ -мотонейронов мышцы-синергиста (*m. soleus*) ослабевало, инвертируясь на нереципрокное и возвратное облегчение. Нереципрокное облегчение α-мотонейронов мышцы-синергиста сохранялось в течение всего времени последействия, а возвратное облегчение инвертировалось на возвратное торможение, которое усиливалось вплоть до 20 мин после окончания стимуляции. Удержание слабого по величине мышечного усилия во время стимуляции спинного мозга сопровождалось усилением нереципрокного и возвратного торможения α-мотонейронов мышцы-синергиста. Такой постактивационный эффект сохранялся до 20 мин после электрической стимуляции спинного мозга. Активность возвратного торможения была выражена в большей степени во время стимуляции спинного мозга при выполнении слабого по величине произвольного усилия, а постактивационный эффект проявлялся сходными изменениями в выраженности возвратного и нереципрокного торможения: их усилении в течение 10 мин и ослаблении на 20 минуте после окончания стимуляции до фоновых значений. Обсуждаются предполагаемые рефлекторные механизмы нисходящих супраспинальных и восходящих периферических влияний на функциональную активность нерецирокного и возвратного торможения в системе мышц-синергистов голени у человека на основе эффектов ЧЭССМ.

*Ключевые слова:* чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ), нереципрокное торможение, возвратное торможение, пресинаптическое торможение, афференты, мышцы, мотонейроны.

DOI: 10.31857/S0131164622020035

Тормозные системы спинного мозга играют существенную роль в обеспечении двигательной активности человека [1, 2]. Основными тормозными взаимодействиями в системе мышц-антагонистов являются пресинаптическое и реципрокное торможение. Тормозные взаимодействия мышц-синергистов спинального уровня известны как "нереципрокное торможение" или "Ib торможение", которое реализуется по афферентам Ib от рецепторных сухожильных органов Гольджи на тормозные Ib интернейроны к  $\alpha$ -мотонейронам собственной мышцы и/или мышцысинергиста. Функциональная роль нереципрокного торможения — своевременно предохранять скелетную мышцу от чрезмерного ее напряжения и осуществлять координацию в активности разных мышечных групп [1–5].

Другим тормозным механизмом на спинальном уровне в системе мышц-синергистов является возвратное постсинаптическое торможение, которое регулирует через клетки Реншоу активность нерецирокного торможения [1]. Возвратное торможение выполняет роль отрицательной обратной связи, тем самым лимитирует частоту разрядов  $\alpha$ -мотонейронов и ограничивает развитие чрезмерного мышечного усилия [2, 6–9].

В последнее десятилетие опубликовано большое число экспериментальных исследований по применению неинвазивной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) [10-13]. ЧЭССМ основана на накожной электрической активации спинальных нейрональных цепей с помощью электродов, приложенных на сегменты нижних грудных и/или поясничнокрестцовых позвонков. Ее инновационной особенностью является применение безболезненных режимов стимуляционного воздействия [10, 11]. При низкой интенсивности стимуляции спинного мозга активируются низкопороговые афферентные волокна, в определенной степени вовлекаются в процесс и двигательные аксоны. Повышение интенсивности стимуляции вовлекает большее число двигательных аксонов, что приводит к снижению латентности вызванного моторного ответа и окклюзирующему эффекту афферентных путей [10, 11]. Эти данные согласуются с предыдущими результатами, полученными в экспериментах с применением чрескожной [14] и эпидуральной [15, 16] стимуляции спинного мозга.

Показаны постактивационные эффекты 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга на проявление пресинаптического и реципрокного тормозного взаимодействия в системе мышц-антагонистов у здоровых испытуемых [17]. Установлены неизвестные ранее закономерности о влиянии 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга на повышение силовых способностей мышц [13] и модуляции нереципрокного торможения спинальных α-мотонейронов, обеспечивающего оптимальное функционирование поддержания напряженности скелетных мышц [18]. В то же время в имеющейся литературе отсутствуют сведения о влиянии ЧЭССМ на функциональную активность тормозных механизмов в системе мышц-синергистов человека.

Цель исследования заключалась в изучении влияния 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга на проявление нереципрокного и возвратного торможения спинальных α-мотонейронов у человека и возможных физиологических механизмов этих проявлений.

## МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 18 здоровых мужчин в возрасте от 27 до 35 лет. ЧЭССМ (стимулятор "Нейро-МВП-8", ООО "Нейрософт", Россия) осуществляли с помощью активного электрода диаметром 2.5 см на уровне грудных позвонков  $T_{11}-T_{12}$  в положении лежа на спине в течение 20 мин [10, 11, 19]. Индифферентные электроды прямоугольной формы 5 × 10.2 см<sup>2</sup> располагали билатерально над гребнями подвздошных костей. Интенсивность стимула на протяжении первых 10 мин находилась в пределах 30 мА, а в дальнейшем достигала 40 мА. Длительность однократного стимула составляла 0.5 мс, частота следования стимулов – 10 Гц [13].

Методика регистрации нереципрокного и возвратного торможения гомонимных α-мотонейронов спинного мозга. Каждому испытуемому наносились кондиционирующие (n. common peroneal) и тестирующие стимулы (n. tibialis) с межстимульным интервалом 6 и 20 мс (рис. 1). Коротколатентный кондиционирующий стимул за 6 мс до тестирующего раздражения активирует афференты Ib, тем самым подавляя тестирующий *H*-ответ *m. soleus* и вызывая на спинальном уровне функциональные изменения в активности нереципрокного торможения [20, 21]. Длиннолатентный кондиционирующий стимул за 20 мс до тестирующего раздражения активирует клетки Реншоу через отходящие моторные коллатерали аксонов α-мотонейронов m. gastrocnemius medialis и m. soleus, что, в свою очередь, снижает возбудимость α-мотонейронов соответствующих мышц [5, 22]. Контрольный *Н*-рефлекс использовали для определения выраженности нереципрокного и возвратного торможения, которую вычисляли по формуле: Амплитуда тестирующего *H*-ответа/Амплитуда контрольного *H*-ответа × 100. Выраженность нереципрокного и возвратного торможения оценивали по наибольшей величине подавления тестирующего *Н*-рефлекса в %. Сила контрольного и тестирующего стимулов на n. tibialis составляла 15% от интенсивности, вызывающей максимальную амплитуду *H*-ответа *m. soleus*, а кондиционирующего раздражения на п. соттоп peroneal - 95% от величины стимула, вызывающей максимальную амплитуду *M*-ответа *m. gas*trocnemius medialis. На мини-электромиографе с программным обеспечением Муо (АНО ИМР "Возращение", Россия) регистрировали амплитуды *Н*-рефлексов и *М*-ответов, осуществляли кондиционирующую стимуляцию афферентов Ib, эфферентных волокон и тестирующее раздражение афферентов Ia, проводили запись ЭМГ-активности мышц-синергистов (m. soleus, m. gastrocnemius medialis) поверхностными накожными электродами диаметром 9 мм: активный электрод фиксировали в проекции двигательной точки мышцы, референтный смещали на расстояние 2 см к сухожилию [2].

Методика регистрации произвольного мышечного сокращения. Во время выполнения слабого по величине мышечного усилия (5% от максимального произвольного сокращения (МПС)) испытуемые удобно лежали на спине, правая стопа жестко фиксировалась с помощью регулируемых ремней на платформе динамометра ("*Biodex Multi-Joint System Pro-3*", США, 2006). В начале каждого эксперимента испытуемые выполняли





МПС мышц голени (изометрический тип сокращения). После предлагали выполнить статическое усилие в 5% от МПС и удерживать его в течение 20 мин. Слабое по величине мышечное сокращение отслеживал испытуемый визуально на мониторе компьютера. Выбор слабого по величине МПС связан с тем, чтобы испытуемые могли удержать данное мышечное напряжение в течение 20-минутной ЧЭССМ.

Экспериментальные условия. Записи амплитуд тестирующих *H*-ответов *m. soleus* (нереципрокного и возвратного торможения) проводили: 1) в состоянии покоя до воздействия длительной ЧЭССМ, на 5, 10, 20 минутах стимуляции и на 5, 10, 20 минутах электрического последействия; 2) при удержании слабого по величине изометрического сокращения (5% от МПС) до длительной ЧЭССМ, во время ее воздействия, на 5, 10, 20 мин при удержании 5% от МПС, и после стимуляции, на 5, 10, 20 минутах без удержания 5% от МПС. Запись контрольных *H*-рефлексов *m. soleus* осуществляли в состоянии относительного мышечного покоя.

Статистический анализ данных проводили в программе *Statistica v.12.5 Build 192.7 (StatSoft*, США). Статистически значимые различия исследуемых параметров выявляли с применением параметрических (однофакторный дисперсионный анализ с *post-hoc* анализом *Newman-Keuls*) и непараметрических методов (дисперсионный анализ *Kruskal-Wallis Anova*). Нормальность распределения выборок определяли с помощью *Shapiro-Wilk's W test*. Критическое значение уровня статистической значимости при проверке нулевых гипотез принимали равным 5% (p = 0.05).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффект ЧЭССМ на выраженность нерецирокного торможения Осмотонейронов мыши-синергистов голени в состоянии относительного мышечного покоя. У испытуемых 20-минутная ЧЭССМ в покое облегчает тестирующий *H*-ответ *m. soleus*, снижая выраженность нереципрокного торможения по отношению к состоянию до стимуляции спинного мозга (табл. 1). Это проявлялось в повышении амплитуды тестирующего *H*-ответа *m. soleus* с 5 по 20 мин воздействия электрической стимуляции (p = 0.000; Kruscal-Wallis Anova) по отношению к фоновым значениям. На протяжении 20-минутного стимуляционного воздействия на спинной мозг выраженность нереципрокного облегчения оставалось постоянной. Непараметрический дисперсионный анализ не выявил значимых различий в амплитудах тестирующих *H*-ответов *т. soleus* между интервалами времени воздействия ЧЭССМ (p = 1.000; Kruscal-Wallis Anova). Эффект облегчения тестирующих *H*-ответов *m. soleus* наблюдался вплоть до 20 минуты после прекращения ЧЭЭСМ по отношению к фону (p = 0.000; Kruscal-Wallis Anova).

Эффект ЧЭССМ на выраженность нерецирокного торможения А-мотонейронов мыши-синергистов голени при удержании слабого по величине мышечного усилия. При удержания произвольного усилия в 5% от индивидуального максимума без ЧЭССМ происходило незначительное ослабление нереципрокного торможения (p = 0.056; Newman-Keuls) по сравнению с состоянием покоя (фон) (табл. 2). Под воздействием ЧЭССМ в сочетании с произвольным удержанием в 5% от МПС нереципрокное торможение усилилось на 5 (p = 0.022; Newman-Keuls), 10 (p = 0.021; Newman-Keuls) и 20 (p = 0.015; Newman-Keuls) минутах. Во время стимуляции спинного мозга на 5, 10 и 20 минутах в сочетании с произвольным напряжением скелетных мышц выраженность нереципрокного торможения была постоянной (р = = 1.000; Newman-Keuls). Усиление нереципрокного торможения наблюдалось на 5 (p = 0.011; Newman-Keuls) и 10 (p = 0.017: Newman-Keuls) минутах после окончания стимуляционного воздействия на спинной мозг, а к 20 минуте отмечалось его постепенное ослабление, которое достигало фоновых значений (до стимуляции спинного мозга (фон): p = 0.955; до стимуляции спинного мозга + + 5% от МПС: p = 0.121, Newman-Keuls).

Эффект ЧЭССМ на выраженность возвратного торможения  $\alpha$ -мотонейронов мышц-синергистов голени в состоянии относительного мышечного покоя. ЧЭССМ наиболее существенно оказывала влияние на амплитуду тестирующего *H*-ответа *m. soleus*: в данном случае возвратное торможение  $\alpha$ -мотонейронов инвертировалось на его облегчение по отношению к фону (табл. 3; p = 0.000; Newman-Keuls). Методом параметрического дисперсионного анализа выявлено достоверно значимое усиление возвратного облегчения  $\alpha$ -мотонейронов *m. soleus* на 5 минуте стимуляции спинного мозга по сравнению с 10 (p = 0.038; Newman-Keuls) и 20 минутами (p = 0.002; Newman-Keuls). 20-минутная стимуляция спинного мозга оказывала возвратный тормозной эффект на спинальном уровне после ее воздействия (табл. 3). Усиление возвратного торможения протекало вплоть до 20 минуты последействия ЧЭССМ (p = 0.010; Newman-Keuls).

Эффект ЧЭССМ на выраженность возвратного торможения О-мотонейронов мыши-синергистов голени при удержании слабого по величине мышечного усилия. Выполнение произвольного мышечного усилия в 5% от индивидуального максимума в условиях отсутствия ЧЭЭСМ незначительно ослабляло возвратное торможение (p = 0.597; Newman-Keuls) по сравнению с состоянием покоя (фон) (табл. 4). Под влиянием электрического воздействия на спинной мозг в сочетании с произвольным мышечным напряжением в 5% от МПС возвратное торможение значительно усиливалось на 5 (p = 0.000; Newman-Keuls), 10 (p == 0.000; Newman-Keuls) и 20 (p = 0.000; Newman-Keuls) минутах. Достоверно значимое усиление возвратного торможения выявлено на 5 минуте стимуляционного воздействия по сравнению с 20 минутой (p = 0.000; Newman-Keuls). После окончания стимуляционного воздействия на спинной мозг усиление тормозного эффекта отмечалось на 5 (p = 0.011; Newman-Keuls) минуте с последующим ослаблением к 20 (p = 0.017; Newman-Keuls) минуте до фоновых значений (до стимуляции спинного мозга (фон): p = 0.528; до стимуляции спинного мозга + 5% от МПС: p = 0.836, Newman-Keuls).

Сравнительный анализ эффекта ЧЭССМ на проявление нереципрокного и возвратного торможения Ос-мотонейронов мыши-синергистов голени в состоянии относительного мышечного покоя. Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что до стимуляции спинного мозга выраженность нереципрокного и возвратного торможения α-мотонейронов *m. soleus* была постоянной (p = 0.784; Newman-Keuls). Электростимуляция спинного мозга на 20 минуте воздействия вызывала более выраженное нереципрокное облегчение по сравнению с возвратным облегчением (p = 0.012; Newman-Keuls). После окончания электрической стимуляции спинного мозга возвратное облегчение инвертировалось на возвратное торможение с 5 по 20 мин последействия, а нереципрокное облегчение было постоянным, как и при воздействии электрической стимуляции на спинной мозг. Ha 20 мин (p = 0.011; Newman-Keuls) последей-

	До стим спинного м	уляции 103га (фон)			$T_2$ , n	٨B		
F			во время стим:	уляции спинно	го мозга (мин)	после стимул	яции спинного	мозга (мин)
ПОКАЗАТЕЛИ	<i>К</i> , мВ	$T_1$ , MB	S	10	20	5	10	20
	$2.30 \pm 0.07$	$1.66 \pm 0.03$	$3.53 \pm 0.10$	$3.70 \pm 0.06$	$3.89 \pm 0.11$	$5.84 \pm 0.22$	$3.55 \pm 0.19$	$3.19 \pm 0.12$
Тестирующий <i>H</i> -рефлекс от контрольного, %	72.01 :	± 2.65	$155.46 \pm 6.06$	$162.51 \pm 5.87$	171.28 ± 8.25	$161.11 \pm 10.60$	156.18 ± 9.31	$139.61 \pm 4.83$
Р 5 мин СМ × фон				p=0.	000			
Р <sub>10 мин</sub> СМ × фон				p=0.	000			
$P_{20{ m MMH}{ m CM}}  imes$ фон				p=0.	000			
Р5 мин после СМ × фон				p=0.	000			
<b>Р</b> 10 мин после СМ × фон				p=0.	000			
${P_{20}}_{ m MNH}$ после СМ × фон				p=0.	000			
Примечание: $K - контрольны  H-рефлекс в условиях кондициP_{20 \text{ мин } CM \times 6009 - лостовернос  P_{20 \text{ мин } CM \times 6009 - 70 \text{ стовернос } C  рефлекса на 5, 10, 20 минутах п  p \in 0.05.$	⊥ й <i>H</i> -рефлекс, <i>T</i> <sub>1</sub> энирующей стимул ть отличий в ампли М × фон• Р10 мин пос юсле стимуляции с	— тестирующий ящии в время и туде тестирующе ле СМ × фон, Р20 м линного мозга п	H-рефлекс в усл тосле стимуляции го $H$ -рефлекса от и после СМ $\times$ фон <sup></sup> о сравнению с фон	овиях кондицис спинного мозта; контрольного ре - достоверность о ном, %; жирным	нирующей стим СМ – стимуляци сфлекса на 5, 10, 2 отличий в амплич шрифтом выделе	уляции в состоя я спинного мозга 0 минутах стимул гуде тестирующе ны достоверные 1	нни покоя, $T_2$ : $P_5$ мин СМ $\times \phi_{OH}$ тяции спинного сго $H$ -рефлекса ( различия при ур	<ul> <li>тестирующий</li> <li>Р<sub>10</sub> мин СМ × фон- мозга по сравне- от контрольного</li> </ul>

18

# ЧЕЛНОКОВ и др.

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА том 48 Nº 2

2022

	До стим спинного м	туляции 103га (фон)			$T_2$	, мВ			
F			до стимуляции	во в <u>ј</u> спинного ме	ремя стимуля рага + 5% от №	ции ИПС (мин)	по	сле стимуляц нного мозга (л	ии (ни)
HORASALEJIN	<i>К</i> , мВ	<i>Т</i> <sub>1</sub> , мВ	CIMHHOTO MO3FA + 3% OT MITC	5	10	20	5	10	20
	$2.01 \pm 0.23$	$1.50 \pm 0.20$	$1.81 \pm 0.20$	$1.15 \pm 0.11$	$1.18 \pm 0.12$	$1.19 \pm 0.11$	$0.92 \pm 0.12$	$0.94 \pm 0.09$	$1.42 \pm 0.14$
Тестирующий <i>Н</i> -рефлекс от контрольного, %	73.47	± 2.25	<b>93.17 ± 7.06</b>	60.35 ± 5.65	61.40 ± 5.49	$62.01 \pm 3.97$	<b>47.18</b> ± <b>4.23</b>	$48.82 \pm 3.28$	72.91 ± 4.52
Р <sub>5%</sub> от МПС × фон				, d	= 0.056				
Р <sub>5 мин</sub> СМ × 5% от МПС				- d	= 0.022				
Р <sub>10 мин</sub> СМ × 5% от МПС				. d	= 0.021				
Р <sub>20 мин</sub> СМ × 5% от МПС				, d	= 0.015				
Р5 мин после СМ × фон				- d	= 0.011				
${f P}_{10}$ мин после СМ × фон				- d	= 0.017				
${ m P}_{20}$ мин после СМ × фон				∶d	= 0.955				
Примечание: T <sub>2</sub> – тест сокращения в 5% от N верность отличий в ам нутах стимулящии спи	ирующий <i>H</i> -г ППС и после с плитуде тесть нного мозга п	оефлекс в усл утимуляции с прующего <i>H</i> -г о сравнению	овиях кондиционирующей ( пинного мозга в покое; Р <sub>5%</sub> зефлекса от контрольного ре с фоном. %: Резессо ре	стимуляции до от МПС × фон, Р; Эфлекса на фон. Р.	и во время сти 5 мин СМ × 5% от е выполнения	муляции спинн МПС, Р <sub>10 мин</sub> С 5% от МПС до	ного мозга при М × 5% от МПС, <sup>I</sup> стимуляции сп	выполнении и: 20 мин СМ × 5% ( инного мозга и	зометрического ът МПС – досто- на 5, 10, 20 ми- е тестирующено

# ЭФФЕКТ ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

19

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА том 48

Nº 2

2022

	До стил спинно	муляции го (фон)			<i>T</i> <sub>2</sub> , <i>M</i>	В		
Показатели	d, 7	E Av	B0 I CIIM	зремя стимуля нного мозга (м	ции цин	пс	осле стимуляци ННОГО МОЗГА (м	ии (ни)
	A, MD	, <sup>1</sup> ,	5	10	20	5	10	20
	$1.97 \pm 0.11$	$1.32 \pm 0.09$	$2.27 \pm 0.16$	$2.14 \pm 0.13$	$2.04 \pm 0.13$	$1.96 \pm 0.11$	$1.84 \pm 0.12$	$1.46 \pm 0.11$
Тестирующий <i>H</i> -рефлекс от контрольного, %	66.88	± 1.60	114.74 ± 2.92	$108.41 \pm 1.57$	$103.23 \pm 0.84$	99.75 ± 1.21	93.11 ± 1.29	74.11 ± 3.03
$P_5$ мин СМ $ imes$ фон				p = 0.0	08			
<b>Р</b> 10 мин СМ × фон				p = 0.0	00			
Р <sub>20 мин</sub> СМ × фон				p = 0.0	00			
Р5 мин после СМ × фон				p = 0.0	00			
<b>Р</b> 10 мин после СМ × фон				p = 0.0	00			
$\mathbf{P}_{20}$ мин после СМ × фон				p = 0.0	10			

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА

том 48

Nº 2

2022

20

# ЧЕЛНОКОВ и др.

Таблица 4. Эффект 2 на показатели ампли	20-минутной туды <i>Н</i> -рефл	электрическо екса <i>т. soleus</i>	й стимуляции пояс в условиях длиннол	сничного утол 1атентной кон	щения спинн диционируюі	ого мозга и из цей стимуляци	ометрическог и <i>п. соттоп р</i> е	о сокращения Proneal ( $M \pm SI$	B 5% or MIIC $(n = 6)$
	До стимуляц мозга	ии спинного (фон)				$T_2$ , MB			
Показатели	K MR	T, MB	до стимуляции спинного мозга +	во время стил + 5	муляции спин % от МПС (м	ного мозга + ин)	после стимул	яции спинного	) мозга (мин)
			+ 5% or MIIC	5	10	20	5	10	20
	$2.05 \pm 0.13$	$1.35 \pm 0.11$	$1.44 \pm 0.07$	$0.53\pm0.05$	$0.58 \pm 0.06$	$0.79 \pm 0.04$	$0.63 \pm 0.06$	$0.85 \pm 0.06$	$1.42 \pm 0.16$
Тестирующий <i>Н</i> -рефлекс от контрольного, %	65.68 :	± 2.53	$70.82 \pm 4.13$	$26.04 \pm 2.55$	$28.41 \pm 3.12$	$38.80 \pm 2.08$	$31.11 \pm 2.99$	$41.58 \pm 2.91$	<b>69.04</b> ± 7.31
$ m P_{5\%}$ or MIIC × $\phi_{0H}$					p = 0.597				
$P_5$ мин СМ $ imes$ 5% от МПС					p = 0.000				
$P_{10 \text{ MMH}}$ CM $ imes$ 5% or MIIC					p = 0.000				
$P_{20}$ mmh CM $ imes$ 5% ot MIIC					p = 0.000				
$\mathbf{P}_5$ мин после СМ × фон					p = 0.000				
Р 10 мин после СМ × фон					p = 0.000				
$P_{20$ мин после СМ $ imes$ фон					p = 0.528				

# Примечание: обозначения см. табл. 1 и 2.

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА том 48

№ 2 2022

ЭФФЕКТ ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

21



**Рис. 2.** Амплитуда тестирующего *H*-рефлекса *m. soleus* от контрольного рефлекса до, во время и после чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) в состоянии покоя, %. *A* – до ЧЭССМ; *Б* – во время ЧЭССМ; *B* – после ЧЭССМ.

ствия электрической стимуляции спинного мозга отмечалась наибольшая выраженность возвратного торможения (рис. 2).

Сравнительный анализ эффекта ЧЭССМ на проявление нереципрокного и возвратного торможения А-мотонейронов мышц-синергистов голени при удержании слабого по величине мышечного усилия. Сравнительный анализ показателей амплитуд тестирующих Н-рефлексов показал, что эффект 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга проявлялся в усилении тормозных процессов мышц-синергистов голени на фоне удержания слабого мышечного усилия в 5% от МПС (рис. 3). Из рис. 3 видно, что во время стимуляции спинного мозга на 5 (p = 0.013; Newman-Keuls) и 10 (p = 0.012; Newman-Keuls) минутах наблюдалась наибольшая выраженность возвратного торможения относительно нереципрокного торможения. Последействие ЧЭССМ на 5 и 10 мин усиливало возвратное и нереципрокное торможение, а к 20 мин ослабляло их активность до фоновых значений.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследования влияния электрической стимуляции спинного мозга на функциональную активность спинального торможения в системе мышц-синергистов голени у человека показали, что в течение 20-минутной стимуляции спинного мозга в состоянии относительного мышечного покоя нереципрокное и возвратное торможение α-мотонейронов мышцы-синергиста снижается (нереципрокное и возвратное облегчение) (табл. 1, 3). Нереципрокное облегчение α-мотонейронов мышцы-синергиста сохранялось до 20 мин после электрической стимуляции спинного мозга, а возвратное облегчение инвертировалось на возвратное торможение, которое усиливалось вплоть до 20 мин последействия. Т. Yamaguchi et al. [17], изучая эффекты ЧЭССМ на проявление пресинаптического и реципрокного тормозного взаимодействия в системе мышц-антагонистов у здоровых испытуемых, установили, что после 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга реципрокное торможение усиливается в течение 15 мин последействия, а пресинаптическое торможение не отличается от исходного уровня на протяжении



**Рис. 3.** Амплитуда тестирующего *H*-рефлекса *m. soleus* от контрольного рефлекса до чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) в покое (фон) и при удержании 5% от МПС, во время ЧЭССМ в сочетании с удержанием 5% от МПС и после ее воздействия в покое, %.

А – до ЧЭССМ; Б – во время ЧЭССМ в сочетании с удержанием 5% от МПС; В – после ЧЭССМ.

30 мин последействия. Авторы предполагают, что длительный эффект неинвазивного электрического воздействия на спинной мозг индуцирует кратковременные пластические изменения в тормозных *Ia* интернейронах системы реципрокного торможения [17].

Авторы-разработчики неинвазивного способа ЧЭССМ высказывают предположение, что при воздействии электрической стимуляции на спинной мозг последовательно вовлекаются афференты группы Ia и Ib, афференты группы II, возбуждающие и тормозные спинальные интернейроны, реализующие поли- и олигосинаптические рефлексы, а также пирамидный, ретикулоспинальный и симпатический тракты [10, 11]. Опираясь на высказывания этих авторов, можно предположить, что при воздействии 20-минутной ЧЭССМ (1) в покое последовательно вовлекаются восходящие периферические влияния от Ia (2), (3), Ib (4) афферентов на α-мотонейроны и эфферентные коллатерали аксонов α-мотонейронов (5), а также возбуждающие супраспинальные входы (кортико- (6), вестибуло- (7), ретикулоспинальные (8)) на соответствующие мотонейроны, что приводит к усилению нереципрокных и возвратных облегчающих влияний на моторные ядра мышц-синергистов голени (*m. soleus* и *m. gastrocnemius*) (рис. 4).

Результаты собственных исследований показали, что в условиях удержания усилия, составляющего 5% от МПС, нереципрокное и возвратное торможение α-мотонейронов m. soleus до воздействия электрической стимуляции на спинной мозг было слабее, чем в состоянии относительного мышечного покоя (табл. 2, 4, рис. 3). Сходные результаты, описывающие ослабление нереципрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов *m. soleus* при выполнении умеренного по величине статического усилия, представлены в работах E. Pierrot-Deseilligny et al. [23] и А.А. Челнокова и др. [24, 25]. При выполнении умеренного по величине статического усилия наиболее выражено пресинаптическое торможение, которое активно регулирует избыточный афферентный приток к α-мотонейронам мышц-агонистов и антагонистов голени, растормаживая нереципрокные и реципрокные тормозные влияния на них, обеспечивая нормальную двигательную активность человека [24].



1 - 49CCM; 2, 3, 4, 5 - восходящие периферические влияния от Ia и Ib афферентов, и эфферентные коллатерали ак $сонов <math>\alpha$ -мотонейронов; 6, 7, 8 – нисходящие супраспинальные влияния от кортико-, вестибуло- и ретикулоспинального трактов; 9 – нереципрокное (Ib) торможение; 10 – возвратное торможение через клетку Реншоу; 11 – пресинаптическое торможение Ia афферентов; 12 – 5% от МПС (максимальное произвольное сокращение); КСТ – кортикоспинальный тракт; ВСТ – вестибулоспинальный тракт; РСТ – ретикулоспинальный тракт; НТ – нереципрокное торможение  $\alpha$ -мотонейронов; ВТ – возвратное торможение  $\alpha$ -мотонейронов; ПТ – пресинаптическое торможение Ia афферентов.

Собственные результаты исследований указывают на то, что на фоне 20-минутной ЧЭССМ и выполнения слабого по величине мышечного усилия более выражено возвратное торможение α-мотонейронов *m. soleus* по сравнению с нереципрокным, которое сохранялось в течение 10 мин воздействия стимуляции на спинной мозг (рис. 3). Постактивационный эффект 20-минутной ЧЭССМ заключался в усилении функциональной активности нереципрокного и возвратного торможения на 5 и 10 минутах, а к 20 мин — в ослаблении их проявления до фоновых значений. Различий в выраженности данных тормозных процессов в системе мышц-синергистов не наблюдалось (рис. 3).

Из имеющихся в настоящее время данных известно, что кортикоспинальные волокна поли- и олигосинаптически конвергируют на тормозные Ia и Ib интернейроны, клетки Реншоу спинного мозга, координирующие афферентные входы к двигательным центрам гомонимных и гетеронимных α-мотонейронов через тормозные спинальные системы (пресинаптическое, реципрокное, нереципрокное и возвратное торможение) [2, 5, 26, 27]. Нисходящие латеральные и вентральные кортикоспинальные пути являются глутаматергическими, которые моно- и полисинаптически возбуждают α-мотонейроны и полисинаптически – ү-мотонейроны [28, 29]. Однако латеральные вестибулоспинальные пути оказывают полисинаптические облегчающие влияния на α-мотонейроны мышц экстензоров и тормозные – на α-мотонейроны мышц флексоров нижних и верхних конечностей. Вместе с тем латеральные ретикулоспинальные пути полисинаптически ингибируют α-мотонейроны мышц экстензоров и облегчают мотонейроны мышц флексоров [30]. Имеется мнение, что руброспинальный тракт оказывает возбуждающие влияния на двигательные центры скелетных мышц [31].

Схема, представленная на рис. 4, предполагает, что 20-минутная ЧЭССМ (1) в сочетании со слабым по величине статическим усилием (12) и ее постактивационный эффект дополнительно активируют возбуждающие кортикоспинальные пути (6) и периферические влияния *Ib* афферентов от рецепторов Гольджи (4) и эфферентных

коллатералей аксонов α-мотонейронов (5), усиливая функциональную активность тормозных интернейронов Ib нереципрокного торможения (9) и клеток Реншоу возвратного торможения (10). Проявление нереципрокного торможения α-мотонейронов мышц-синергистов голени регулируется механизмами возвратного торможения через клетку Реншоу (10) и пресинаптического торможения, опосредованного Іа афферентами на соответствующие интернейроны (11) [2, 24, 25, 32] (рис. 4). Более вероятно, что на фоне 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга (1) в сочетании со слабым по величине мышечным усилием (12) и после ее воздействия нисходящие вестибуло- (7) и ретикулоспинальные (8) пути оказывают возбуждающие влияния на двигательные центры мышц-синергистов, обеспечивая скоординированную работу всех спинальных тормозных систем. Это предположение согласуется с работой по изучению особенностей проявления пресинаптического торможения гомонимных Ia афферентов и реципрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов *m. soleus* в покое при активации ретикуло- и вестибулоспинальных путей в ответ на транскраниальную магнитную стимуляцию мозжечка [33].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные восполняют пробел в научных знаниях о механизмах функционирования спинальных тормозных систем мышц-синергистов голени под влиянием чрескожной электростимуляции спинного мозга. ЧЭССМ модулирует нереципрокное и возвратное торможение спинальных α-мотонейронов в состоянии относительного мышечного покоя и при удержании слабого по величине мышечного напряжения. Воздействие электрической стимуляции на спинной мозг в состоянии покоя приводит к ослаблению функциональной активности тормозных спинальных нейронных структур мышц-синергистов, а при удержании слабого по величине мышечного напряжения, наоборот, к их усилению, причем наиболее выраженным является возвратное торможение. Фундаментальные данные, полученные в результате такого рода исследования, могут найти практическое применение в коррек-

**Рис. 4.** Полагаемая модель тормозной интернейрональной цепи мышц-синергистов голени, опосредуемой восходящими и нисходящими влияниями на спинальные мотонейроны во время и после воздействия 20-минутной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) в сочетании со слабым по величине мышечным напряжением.

ции сегментарных нарушений у лиц с нейромоторными заболеваниями и травмами.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены комиссией по вопросам этики Великолукской государственной академии физической культуры и спорта (Великие Луки).

**Информированное согласие.** Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

*Конфликт интересов.* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Бикмуллина Р.Х., Розенталь А.Н., Плещинский И.Н. Тормозные системы спинного мозга в контроле взаимодействий функционально сопряженных мышц // Физиология человека. 2007. Т. 33. № 1. С. 119.

*Bikmullina R.Kh., Rozental' A.N., Pleshchinskii I.N.* Inhibitory systems of the spinal cord in the control of interactions of functionally coupled muscles // Human Physiology. 2007. V. 33. № 1. P. 105.

- 2. *Челноков А.А., Городничев Р.М.* Закономерности формирования спинального торможения у человека. М.: ИНФРА-М, 2020. 192 с.
- Hunt C.C., Kuffler S.W. Stretch receptor discharges during muscle contraction // J. Physiol. 1951. V. 113. P. 298.
- Haase J., Cleveland S., Ross H.G. Problems of postsynaptic autogenous and recurrent inhibition in the mammalian spinal cord // Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol. 1975. V. 73. P. 74.
- 5. *Pierrot-Deseilligny E., Burke D.* The Circuitry of the human spinal cord: spinal and corticospinal mechanisms of movement. United States: Cambridge University Press, 2012. 606 p.
- Windhorst U. Muscle proprioceptive feedback and spinal networks // Brain Res. Bull. 2007. V. 73. № 4–6. P. 155.
- Кудина Л.П., Пиотркевич М. Анализ возвратного торможения, иннервирующих быстрые мышцы у человека // Нейроинформатика. 2006. Часть 1. С. 137.
- Obeidat A.Z. New Insights into the Spinal Recurrent Inhibitory Pathway Normally and after Motoneuron Regeneration. Doctor of Philosophy Dissertation. Jordan: Wright State University, 2013. 192 p.
- Barrué-Belou S., Marque P., Duclay J. Supraspinal Control of Recurrent Inhibition during Anisometric Contractions // Med. Sci. Sports Exerc. 2019. V. 51. № 11. P. 2357.

- 10. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Machueva E. et al. Novel and direct access to the human locomotor spinal circuitry // J. Neuroscience. 2010. V. 30. № 10. P. 3700.
- Городничев Р.М., Пивоварова Е.А., Пухов А.М. и др. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека // Физиология человека. 2012. Т. 38. № 2. С. 46. Gorodnichev R.M., Pivovarova E.A., Puhov A. et al. Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: a noninvasive tool for the activation of stepping pattern generators in humans // Human Physiology. 2012. V. 38. № 2. P. 158.
- Яфарова Г.Г., Милицкова А.Д., Шульман А.А. и др. Влияние транскраниальной магнитной стимуляции на ответы мышц голени, вызванные чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга // Практическая медицина. 2017. № 8(109) С. 201.
- 13. Рощина Л.В., Челноков А.А. Эффект чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на функциональное состояние моторной системы человека // Теория и практика физической культуры. 2020. № 4(982). С. 30.
- Minassian K., Persy I., Rattay F. et al. Posterior rootmuscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord // Muscle Nerve. 2007. V. 35. № 3. P. 327.
- 15. *Dimitrijevic M., Gerasimenko Yu., Pinter M.* Evidence for a spinal central pattern generator in humans // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1998. V. 860. P. 360.
- 16. *Harkema S., Gerasimenko Y., Hodes J. et al.* Epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord enables voluntary movement, standing, and assisted stepping in a paraplegic human // Lancet. 2011. V. 377. № 9781. P. 1938.
- 17. Yamaguchi T., Fujiwara T., Takahara T. et al. The effects of transcutaneous spinal cord stimulation on spinal reciprocal inhibition in healthy persons // Clin. Neurophysiol. 2017. V. 128. № 3. P. 115.
- 18. Рощина Л.В., Гладченко Д.А., Пивоварова Е.А., Челноков А.А. Эффект длительной электрической стимуляции спинного мозга на проявления нереципрокного торможения α-мотонейронов скелетных мышц человека // Вестник РУДН. Серия: Медицина. 2019. Т. 23. № 4. С. 390. Roshchina L.V., Gladchenko D.A., Pivovarova E.A.,

*Chelnokov A.A.* Effect of Long-Term Electrical Spinal Cord Stimulation on Expression of Non-Reciprocal Inhibition α-Motoneurons of Human Skeletal Muscles // RUDN Journal of Medicine. 2019. T. 23. № 4. P. 390.

- Gerasimenko Yu., Kozlovskaya I., Edgerton V.R. Sensorimotor regulation of movements: novel strategies for the recovery of mobility // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 1. С. 106. Gerasimenko Yu., Kozlovskaya I., Edgerton V.R. Sensorimotor regulation of movements: novel strategies for the recovery of mobility // Human Physiology. 2016. V. 42. № 1. P. 90.
- Pierrot-Deseilligny E., Katz R., Morin C. Evidence for IB inhibition in human subjects // Brain Res. 1979. V. 166. № 1. P. 176.
- 21. Челноков А.А., Городничев Р.М. Возрастные особенности формирования спинального торможения

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА том 48 № 2 2022

скелетных мышц у лиц мужского пола // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 6. С. 86.

Chelnokov A.A., Gorodnichev R.M. Age-related features in the formation of spinal inhibition of skeletal muscles in males // Human Physiology. 2015. V. 41.  $\mathbb{N}_{2}$  6. P. 644.

- Rossi A., Zalaffi A., Decchi B. Heteronymous recurrent inhibition from gastrocnemius muscle to soleus motoneurones in humans // Neurosci. Lett. 1994. V. 169. № 1–2. P. 141.
- Pierrot-Deseilligny E., Morin C., Bergego C., Tankov N. Pattern of group I fibre projections from ankle flexor and extensor muscle in man // Exp. Brain Res. 1981. V. 42. № 3–4. P. 337.
- 24. Челноков А.А., Бучацкая И.Н. Функциональные особенности спинального торможения человека при произвольной двигательной активности // Теория и практика физической культуры. 2015. № 6. С. 11. *Chelnokov A.A., Buchatskaya I.N.* [Functional features]

spinal inhibition during voluntary motor activity] // Teor. Prakt. Fiz. Kul't. 2015. № 6. P. 11.

25. Челноков А.А., Гладченко Д.А., Федоров С.А., Городничев Р.М. Возрастные особенности спинального торможения скелетных мышц у лиц мужского пола в регуляции произвольных движений // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 1. С. 35.

*Chelnokov A.A., Gladchenko D.A., Fedorov S.A., Gorodnichev R.M.* Age-related parameters of spinal inhibition of skeletal muscles in regulation of voluntary movements in men // Human Physiology. 2017. V. 43. № 1. P. 38.

- 26. *Knikou M*. The H-reflex as a probe: Pathways and pitfalls // J. Neurosci. Methods. 2008. V. 171. № 1. P. 1.
- 27. *Kubota S., Uehara K., Morishita T. et al.* Inter-individual variation in reciprocal Ia inhibition is dependent on the descending volleys delivered from corticospinal neurons to Ia interneurons // J. Electromyogr. Kinesiol. 2014. V. 24. № 1. P. 46.
- Rhoades R.A., Bell D.R. Medical Physiology: Principles for Clinical Medicine. 4th editions, Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2012. 851 p.
- 29. *Королев А.А.* Функциональная анатомия нисходящих двигательных систем в норме и при формировании спастического пареза // Фундаментальные исследования. 2013. № 3. С. 92.
- Chez C. The control of movement/Posture. Voluntary movement // Principles of Neural Science. 1999. P. 553.
- Fujito Y., Aoki M. Monosynaptic rubrospinal projections to distal forelimb motoneurons in the cat // Exp. Brain Res. 1995. V. 105. № 2. P. 181.
- Rossi A., Decchi B. Changes in Ib heteronymous inhibition to soleus motoneurons during cutaneous and muscle nociceptive stimulation in humans // Brain Res. 1997. V. 774. P. 55.
- Matsugi A., Mori N., Uehara S. et al. Effect of cerebellar transcranial magnetic stimulation on soleus Ia presynaptic and reciprocal inhibition // Neuroreport. 2015. V. 26. № 3. P. 139.

# Effect of Transcutaneous Electrical Stimulation of the Spinal Cord on the Functional Activity of Spinal Inhibition in the System of Lower Leg Synergist Muscles in Humans

A. A. Chelnokov<sup>a, \*</sup>, L. V. Roshchina<sup>a</sup>, D. A. Gladchenko<sup>a</sup>, E. A. Pivovarova<sup>a</sup>, I. V. Piskunov<sup>a</sup>, R. M. Gorodnichev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Velikie Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikie Luki, Russia

\*E-mail: and-chelnokov@yandex.ru

The effect of twenty-minute transcutaneous electrical spinal cord stimulation (tESCS) on the severity of nonreciprocal and recurrent inhibition of spinal  $\alpha$ -motorneurons in a person at rest and weak in terms of muscle effort was studied. It was found that during the entire time of exposure to tESCS at rest, the non-reciprocal and recurrent inhibition of the  $\alpha$ -motorneurons of the synergist muscle (m. soleus) weakened, inverting to non-reciprocal and recurrent facilitation. Non-reciprocal facilitation of  $\alpha$ -motorneurons of the synergist muscle was maintained throughout the entire aftereffect, and recurrent facilitation was inverted to recurrent inhibition, which increased up to 20 min after the end of stimulation. The retention of a weak muscle effort during spinal cord stimulation was accompanied by an increase in non-reciprocal and recurrent inhibition of  $\alpha$ -motor neurons of the synergist muscle. This post-activation effect lasted up to twenty minutes after electrical stimulation of the spinal cord. The activity of recurrent inhibition was expressed to a greater extent during spinal cord stimulation when performing a weak voluntary effort, and the post-activation effect was manifested by similar changes in the severity of recurrent and non-recurrent inhibition: their strengthening within 10 min and weakening at 20 minutes after the end of stimulation to background values. The reflex mechanisms of descending supraspinal and ascending peripheral influences on the functional activity of nonreciprocal and recurrent inhibition in the system of lower leg synergistic muscles in humans the effects of tE-SCS are discussed.

*Keywords:* transcutaneous electrical spinal cord stimulation (tESCS), non-reciprocal inhibition, recurrent inhibition, presynaptic inhibition, afferents, muscles, motorneurons.