

СРАВНЕНИЕ РЕАКЦИИ Н-РЕФЛЕКСА M. SOLEUS ПРИ УТОМЛЕНИИ СИНЕРГИСТОВ И АНТАГОНИСТОВ

А.А. Мельников¹, meln1974@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5281-5306>

П.В. Глиэр¹, i89522552535@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4624-0494>

В.Л. Бойков², 2bl@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1058-8528>

Л.А. Белицкая¹, lubbel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2030-835X>

¹ Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», Москва, Россия

² Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, Ярославль, Россия

Аннотация. Цель: выявить эффект утомления синергистов и антагонистов m. soleus на показатели Н-рефлекса и, кроме того, выяснить особенности Н-ответа и М-ответа в зависимости от интенсивности стимуляции п. Tibialis. **Материалы и методы.** Показатели Н-рефлекса m. soleus в положении лежа у здоровых спортсменов (n = 25) регистрировали с помощью электронейромиографа (Нейрософт) до и в течение 14 минут восстановления после утомления (5 мин, 30 с нагрузка, 30 с отдых) мышц-синергистов (поднимания на носок стопы) и мышц-антагонистов (поднимание носка стопы) при двух силах стимуляции п. Tibialis: 80 % (n = 8) и 120 % от Hmax (n = 15). **Результаты.** Н-ответ m. soleus снижался в одинаковой мере при утомлении синергистов и антагонистов, но только при интенсивности стимуляции 80 %; изменений Н-ответа при стимуляции 120 % от Hmax не выявлено. Восстановление Н-ответа после 5-минутной максимальной нагрузки происходило к 3,5-й мин. Напротив, М-ответ m. soleus снижался только при утомлении синергистов и только при интенсивности стимуляции 120 %, но не изменялся при утомлении антагонистов. Восстановление М-ответа после 5-минутной максимальной нагрузки на синергисты m. soleus происходило только к 14-й мин отдыха. **Заключение.** Утомление как синергистов, так и антагонистов вызывает снижение Н-ответа в течение около 3,5 мин, указывая на снижение возбудимости α -мотонейронов и/или активацию пресинаптического торможения Ia-афферентов m. soleus. Для регистрации Н-ответа целесообразно использовать интенсивности менее чем Hmax, однако для оценки М-ответа следует применять интенсивность стимуляции более Hmax.

Ключевые слова: Н-рефлекс, Н-ответ, утомление, синергисты, камбаловидная мышца, спортсмены

Для цитирования: Сравнение реакции Н-рефлекса m. soleus при утомлении синергистов и антагонистов / А.А. Мельников, П.В. Глиэр, В.Л. Бойков, Л.А. Белицкая // Человек. Спорт. Медицина. 2024. Т. 24, № 2. С. 51–57. DOI: 10.14529/hsm240206

COMPARISON OF THE M. SOLEUS H-REFLEX DURING FATIGUE OF SYNERGIST AND ANTAGONIST MUSCLES

A.A. Melnikov¹, meln1974@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5281-5306>

P.V. Glier¹, i89522552535@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4624-0494>

V.L. Boikov², 2bl@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1058-8528>

L.A. Belitskaya¹, lubbel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2030-835X>

¹ Russian University of Sport GTSOLIFK, Moscow, Russia

² Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia

Abstract. Aim. The objective of this study was to investigate the impact of synergist and antagonist muscle fatigue on the H-reflex indicators of the soleus muscle, as well as to elucidate the characteristics of the H-response and M-response in response to varying intensities of tibial nerve stimulation. **Materials and methods.** The study utilized an electroneuromyograph (Neurosoft) to record the H-reflex indicators of the soleus muscle in a supine position in 25 healthy athletes. The recording was conducted before and during a 14-minute recovery period following a 5-minute fatigue protocol involving 30 seconds of exercise and 30 seconds of rest, targeting synergistic muscles (standing on tip toes) and antagonist muscles (toe raises) with two levels of tibial nerve stimulation: 80% of Nmax (n = 8) and 120% of Nmax (n = 15). **Results.** The findings revealed that the H-response of the soleus muscle experienced a consistent decrease in response to both synergist and antagonist muscle fatigue, but only at an intensity of 80% of Nmax. No changes in the H-response were observed with stimulation at 120% of Nmax. The recovery of the H-response post-maximum exercise was noted to occur within 3.5 minutes. Conversely, the M-response of the soleus muscle exhibited a decrease only in response to synergist muscle fatigue and at a stimulation intensity of 120% of Nmax, without changes observed in response to antagonist muscle fatigue. The recovery of the M-response post-maximum exercise on the soleus muscle synergists was only observed after 14 minutes of rest. **Conclusion.** Fatigue of both synergist and antagonist muscles leads to a temporary decrease in the H-response, indicative of reduced excitability of α -motor neurons and/or increased presynaptic inhibition of Ia-afferents to the soleus muscle. For the assessment of the H-response, it is advisable to use stimulation intensities below Hmax, whereas for evaluating the M-response, stimulation intensities exceeding Hmax are advised.

Keywords: H-reflex, H-response, fatigue, synergists, m. soleus, athletes

For citation: Melnikov A.A., Glier P.V., Boikov V.L., Belitskaya L.A. Comparison of the m. soleus H-reflex during fatigue of synergist and antagonist muscles. *Human. Sport. Medicine.* 2024;24(2):51–57. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm240206

Введение. Нейромышечное утомление оказывает существенное влияние на скоростно-силовые и координационные способности спортсменов [3]. Однако вклад утомления разных мышечных групп в нейрональные механизмы регуляции сокращения мышц остается полностью не выясненным. Информативным и доступным методом оценки возбудимости мотонейронов мышц, а также процессом торможения афферентных потоков по чувствительным Ia-афферентам к мотонейронам является методика оценки рефлекса Пауля Хоффмана или H-рефлекса икроножных мышц [2, 6]. Литературные данные показывают противоречивые результаты по изменению H-рефлекса во время физического утомления. В частности, отмечают как увеличение [7], так и

снижение амплитуды H-волны на фоне нарастающего физического утомления [4]. Таким образом, данное исследование нацелено на исследование особенностей H-рефлекса m. soleus в условиях утомления мышц-синергистов и мышц-антагонистов. Кроме того, в данной работе мы сравнили показатели H-рефлекса, полученные при разной интенсивности стимуляции для вызова H-рефлекса. Мы предположили, что адекватной стимуляцией для динамической оценки H-рефлекса в условиях утомления является субмаксимальная стимуляция, то есть меньше Hmax, в нашем случае – это интенсивность, равная 80 % от Hmax. Кроме того, мы полагаем, что амплитуда H-волны во время утомления будет снижаться при утомлении синергистов и антагонистов.

Организация и методы исследования.

В исследовании добровольно приняли участие студенты-спортсмены ($n = 23$, возраст: 19–24 года, спортивный стаж: 5–11 лет), не имеющие заболеваний нервно-мышечной системы. Все испытуемые давали информированное согласие, подготовленное в соответствии с положениями Хельсинкской декларации о биомедицинской этике и одобренное локальным этическим комитетом РУС «ГЦОЛИФК». В одной группе эффект физического утомления на Н-рефлекс *m. soleus* проводили при интенсивности стимуляции, равной 80 % от N_{max} (группа Стим80, $n = 8$), а во второй группе – при силе стимуляции 120 % от N_{max} (группа Стим120, $n = 15$).

После подготовки испытуемого определялась интенсивность стимуляции, вызывающей максимальную амплитуду Н-ответа *m. soleus* (N_{max}). Затем определяли амплитуды Н-ответа и М-ответа *m. soleus* при стимуляции 80 % (в группе Стим80) или 120 % (в группе Стим120) от интенсивности N_{max} в моменты времени до физической нагрузки и в течение 14 минут восстановления после нагрузки. Регистрация Н-рефлекса выполнена в следующие моменты восстановления: 30 с, 2 мин, 3 мин 30 с и далее с интервалом 1,5 мин, последнее измерение – на 14-й мин после нагрузки. Физическое утомление вызывалось последовательным выполнением двух интервальных физических нагрузок: 1) утомление подошвенных сгибателей стопы с помощью вставания на носок стопы левой ноги, 2) утомление тыльных сгибателей стопы с помощью поднимания носка левой стопы против субмаксимального сопротивления, прикладываемого исследователем. Обе нагрузки выполнялись в течение 5 мин по схеме: 30 сгибаний за 30 с с интервалом отдыха 30 с. Отдых между упражнениями составлял > 20 мин.

Анализ Н-рефлекса m. soleus. Н-рефлекс регистрировался в положении лежа с помощью электронейромиографа «Нейро-МВП-4» в программном обеспечении «Нейро-МВП.NET» (ООО «Нейрософт»). Биоадгезивные накожные электроды (22×34 мм «MedTab») использованы в качестве стимулирующих и регистрирующих электродов. Два регистрирующих электрода (2 см друг от друга) располагались на *m. soleus* в точке на расстоянии 3–4 см ниже границы брюшка латеральной головки *m. gastrocnemius*. Стимулирующий катод находился в точке *p. tibialis* в области в *fossa poplitea*, анод – на 3 см выше на бедре. Актив-

ная точка находилась предварительной стимуляцией, которая вызывала четкое подошвенное сгибание стопы. Индифферентный электрод крепился на исследуемой конечности в области голеностопа. Частота стимуляции при оценке N_{max} составляла 0,07 Гц.

Интенсивность стимуляции во время регистрации Н-рефлекса *m. soleus* до и после нагрузки составляла 80 и 120 % от силы N_{max} . Каждое измерение проводилось трижды с интервалом 13 с с последующим усреднением. Выбор двух уровней стимуляции связан с выяснением наиболее приемлемой стимуляции для изучения рефлекторной реакции рабочих мышц во время утомления. Низкие интенсивности стимуляции при накожной электромиографии не позволяют адекватно оценить М-волну, напротив, высокие уровни стимуляции не дают приемлемой оценки Н-волны вследствие прямого возбуждения α -мотонейронов и подавления Н-волны [2].

Степень субъективной физической нагрузки оценивалась по 10-балльной модифицированной шкале Борга, где «0» – покой, нет нагрузки, «10» – максимальная нагрузка [1].

Сравнения динамики показателей Н-рефлекса в период восстановления в разных группах выполнены с помощью двухфакторного анализа для повторных измерений (ANOVA). Повторные измерения оценивались по критерию Вилкоксона. Различия между группами до и во время восстановления определены с помощью критерия Манна – Уитни. Расчеты проведены в программе Statistica v12.0.

Результаты и их обсуждение. Амплитуда Н-ответа *m. soleus* при интенсивности стимуляции составила 80 и 120 % во время восстановления после нагрузки на подошвенные сгибатели. Интенсивность стимуляции, вызывающей максимальную амплитуду Н-волны, не различалась между группами Стим80 и Стим120: $15,3 \pm 6,8$ мА и $16,1 \pm 4,5$ мА ($p = 0,71$) в группах Стим80 и Стим120 соответственно. Различия не выявлены также в латентном периоде Н-ответа. Однако рассчитанный уровень стимуляции 80 % ($12,0 \pm 5,2$ мА) в группе Стим80 был существенно меньше ($p = 0,005$), чем в группе Стим120 ($19,3 \pm 5,4$ мА).

Величина Н-ответа при утомлении подошвенных сгибателей после вставания на носок не изменялась в группе Стим120 и снижалась в группе Стим80 (рис. 1) на 0,5-й и 2-й мин восстановления. При этом на 30 с восстановления амплитуда Н-ответа в группе Стим80 была ниже, чем в группе Стим120 ($p < 0,05$).

Латентный период Н-ответа не изменялся под влиянием утомления синергистов *m. soleus* ни в группе Стим80, ни в группе Стим120.

Амплитуда М-ответа *m. soleus* при интенсивности стимуляции 80 и 120 % во время восстановления после нагрузки на подошвенные сгибатели. Величины М-ответа в группе Стим120 всегда были выше, чем в группе Стим80 (рис. 2). В ответ на утомление, вызванное вставанием на носок, М-ответ снизился в группе Стим120 и оставался сниженным в течение 12,5 мин. Напротив, М-ответ не изменялся в группе Стим80. Существенных разли-

чий в динамике латентного периода М-ответа после нагрузок, а также в отдельные периоды наблюдения между группами не выявлено.

Таким образом, полученные результаты указывают, что стимуляция на уровне 80 % от H_{max} при регистрации Н-рефлекса оказалась информативной для выявления эффекта утомления в отношении Н-ответа, но не эффективна для оценки М-ответа. Напротив, интенсивность стимуляции на уровне 120 % от H_{max} была эффективной для обнаружения изменений М-ответа при утомлении мышц задней поверхности голени при проведении Н-рефлекса.

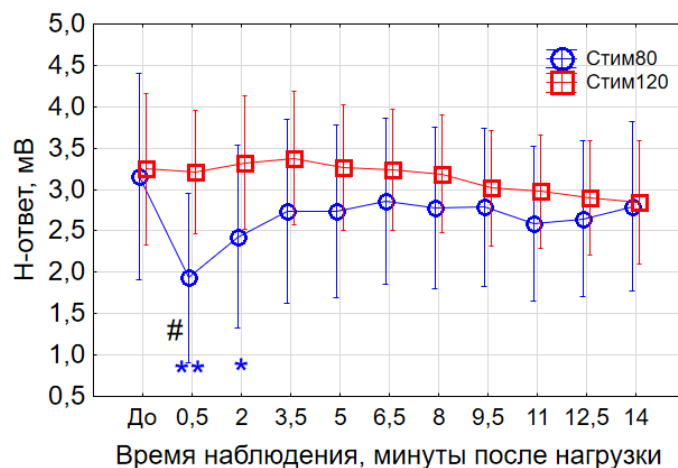


Рис. 1. Динамика Н-ответа до и в течение 14 мин восстановления после нагрузки на подошвенные сгибатели стопы (вставания на носок) ($M \pm 95\%$ Дов. Инт.). **, * – $p < 0,05$ по сравнению с уровнем До. # – $p < 0,05$ между группами Стим120 и Стим80

Fig. 1. Changes in the H-response before and during a 14-minute recovery period following standing on tip toes ($M \pm 95\%$ CI). **, * – $p < 0.05$ compared to the data obtained Before. # – $p < 0.05$ between the groups with Stimulation 120 and Stimulation 80

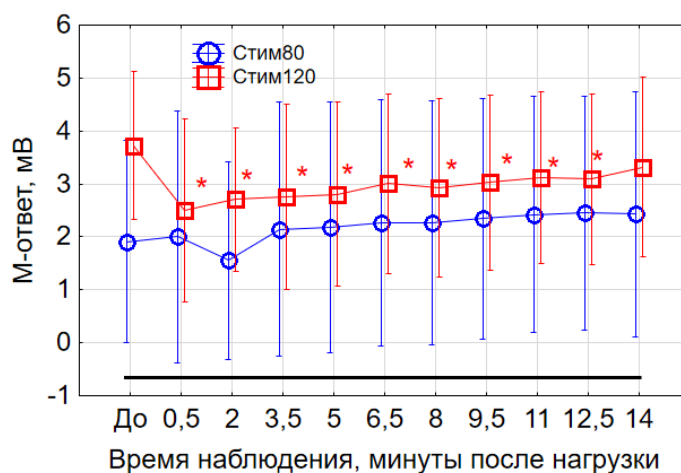


Рис. 2. Динамика М-ответа до и в течение 14 мин восстановления после нагрузки ($M \pm 95\%$ Дов. Инт.). * – $p < 0,05$ по сравнению с уровнем До. Нижняя линия – $p < 0,05$ между группами Стим120 и Стим80

Fig. 2. Changes in the M-response before and during a 14-minute recovery period following physical activity ($M \pm 95\%$ CI). * – $p < 0.05$ compared to the data obtained Before. Lower line – $p < 0.05$ between the groups with Stimulation 120 and Stimulation 80

Эффект утомления мышц задней (синергистов) и передней (антагонистов) поверхности голени на показатели Н-рефлекса *m. soleus*. Субъективные индексы нагрузки при вставании на носок стопы и при поднимании носка стопы при каждом подходе были одинаковы (рис. 3), что указывает на примерно схожую величину суммарной нагрузки и, вероятно, развивающееся утомление синергистов и антагонистов *m. soleus*. Кроме того, оценка субъективной нагрузки достигала в среднем около максимальных значений в обеих тестовых нагрузках на мышцы голени.

Динамика Н-ответа во время утомления, вызванное нагрузкой синергистов и антагонистов *m. soleus*. Оба вида нагрузок на синер-

гисты и антагонисты *m. soleus* вызывали снижение Н-ответа *m. soleus* (рис. 4). Хотя в динамике Н-ответа существенных различий не выявлено ($p > 0,60$), утомление мышц задней поверхности вызывало более длительное снижение Н-ответа в течение 2 мин после нагрузки. Существенных различий в динамике латентного периода Н-ответа при разных нагрузках не выявлено.

Динамика М-ответа во время утомления, вызванное нагрузкой синергистов и антагонистов *m. soleus*. В группе Стим80 (рис. 5а) не выявлено существенных изменений М-волны *m. soleus* после нагрузки на синергисты и антагонисты. Напротив, М-волна *m. soleus* существенно ($p < 0,01$) и длительно (с 30-й с по

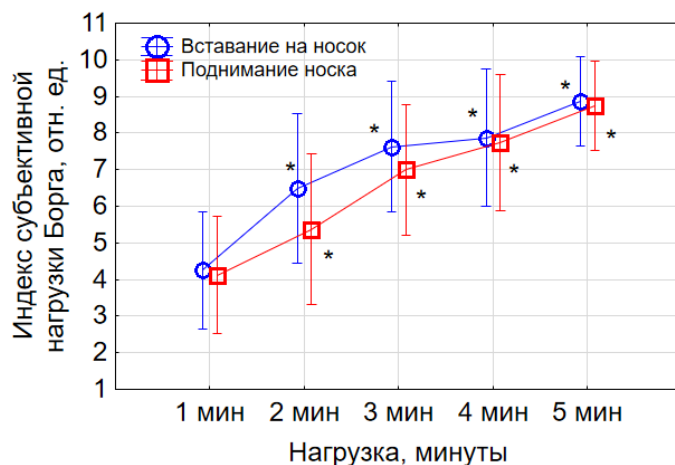


Рис. 3. Субъективный индекс физической нагрузки Борга в течение 5 мин вставания на носок левой ноги и 5 мин поднятия носка левой ноги (30 с нагрузка, 30 с отдых) ($M \pm 95\%$ Дов. Инт.). * – $p < 0,05$ по сравнению с 1-й мин
Fig. 3. The Borg's Rating of Perceived Exertion Scale during a 5-minute standing on tip toes and 5-minute toe raises, left leg (30 s exercise, 30 s rest) ($M \pm 95\%$ CI). * – $p < 0.05$ compared to minute 1

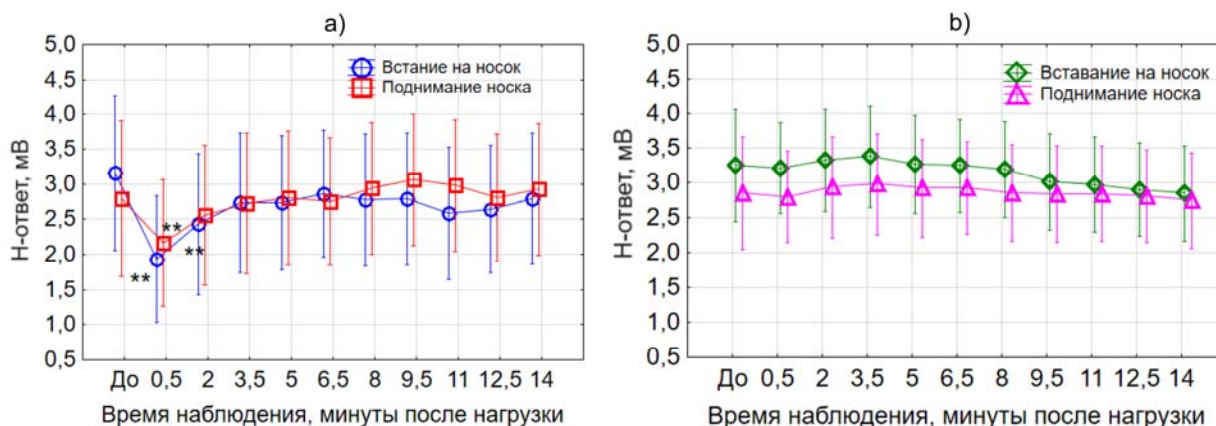


Рис. 4. Динамика Н-ответа во время утомления, вызванное нагрузкой синергистов и антагонистов *m. soleus* ($M \pm 95\%$ Дов. Инт.): а – оценка Н-ответа проведена при стимуляции 80 % от H_{max} ; б – оценка Н-ответа проведена при стимуляции 120 % от H_{max} . **, * – $p < 0,01, 0,05$ по сравнению с уровнем До нагрузки
Fig. 4. Changes in the H-response during fatigue induced by exercises involving synergist and antagonist *m. soleus* muscles ($M \pm 95\%$ CI): а – the H-response with stimulation at 80 % of H_{max} ; б – the H-response with stimulation at 120% of H_{max} . **, * – $p < 0.01, 0.05$ compared to the data obtained Before

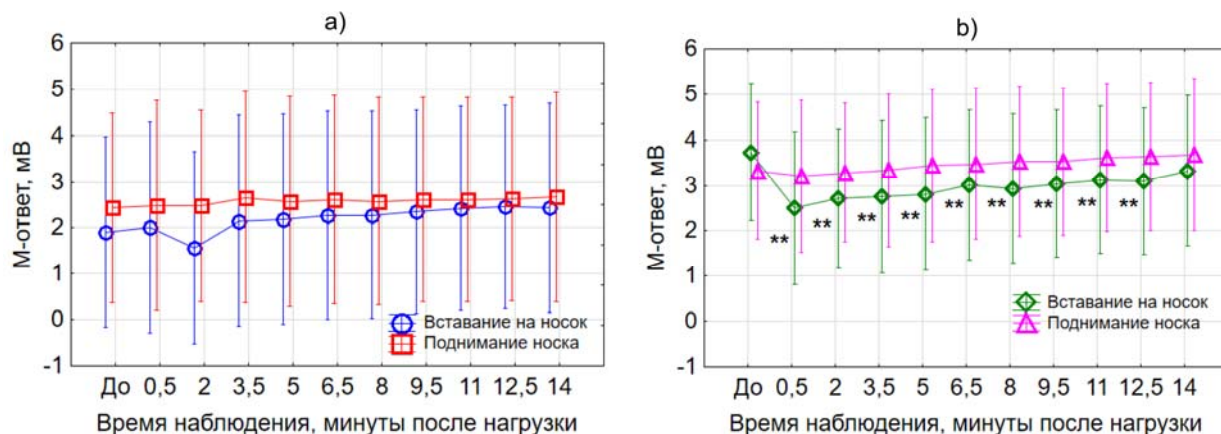


Рис. 5. Динамика М-ответа во время утомления, вызванное нагрузкой синергистов и антагонистов m. soleus ($M \pm 95\%$ Дов. Инт.): а – М-ответа зарегистрирован при стимуляции 80 % от Hmax, б – М-ответа зарегистрирован при стимуляции 120 % от Hmax. ** – $p < 0,01$ по сравнению с уровнем До нагрузки

Fig. 5. Changes in the M-response during fatigue induced by exercises involving synergist and antagonist m. soleus muscles ($M \pm 95\%$ CI): а – the M-response with stimulation at 80% of Hmax, б – the M-response with stimulation at 120% of Hmax. ** – $p < 0.01$ compared to the data obtained Before

12,5-ю мин) снижалась после вставания на носок при регистрации Н-рефлекса во время стимуляции 120 % (рис. 5б), но изменение М-волны при утомлении мышцы передней поверхности голени не выявлено. Существенных различий в латентном периоде М-ответа при утомлении мышц передней и задней поверхности голени не выявлено.

Таким образом, только нагрузка на мышцы задней поверхности голени вызывала снижение амплитуды М-ответа m. soleus, которое было зарегистрировано при высокой интенсивности стимуляции, равной 120 % от интенсивности Hmax. Напротив, эффект утомления на Н-ответ можно выявить только при невысокой интенсивности стимуляции, в нашем случае – это 80 % от Hmax. В целом наши данные согласуются с литературными данными о снижении рефлекторного Н-ответа m. soleus при ее утомлении после интенсивных физических нагрузок [4]. Предположительными механизмами снижения рефлекторной сократимости утомленной мышцы могут быть активация пресинаптического торможения, вызванное афферентами III, IV группы, чувствительных к метаболитам утомления [8] или центральным нисходящим торможением возбудимости α -мотонейронов m. soleus [5]. Биологический смысл снижения рефлекторной активности во время утомления состоит в предупреждении истощения или повреждения рабочих мышц. Другим важным результатом нашей работы является снижение Н-ответа также при утомлении антагонистов m. soleus, то есть мышц передней поверхности голени. Механизм дан-

ного явления не ясен, но можно предположить, что он обусловлен пресинаптическим торможением Ia-афферентов m. soleus сигналами от афферентов, исходящих от сухожильных рецепторов, мышечных веретен или метаболических рецепторов утомленных мышц передней поверхности голени. Для выяснения точных механизмов снижения Н-ответа при утомлении мышц-антагонистов необходимы дополнительные исследования.

Закключение. Основной целью работы было выявление эффекта утомления синергистов и антагонистов m. soleus на показатели Н-рефлекса и, кроме того, выяснение особенностей Н-ответа и М-ответа в зависимости от силы стимуляции n. Tibialis. Результаты позволяют заключить, что субъективно схожая степень утомления как синергистов после 5-минутного вставания на носок, так и антагонистов после 5-минутного поднимания носка стопы с сопротивлением, вызывают снижение амплитуды Н-ответа на период около 3,5 мин, указывая на снижение возбудимости α -мотонейронов и/или пресинаптическое торможение активирующего потока сенсорной информации через Ia-афферент m. soleus. Амплитуда М-ответа снижается только при утомлении синергистов на более длительный, чем падение Н-ответа, период, указывая на снижение сократимости m. soleus, но М-ответ m. soleus не изменяется при утомлении антагонистов. Для регистрации Н-ответа целесообразно использовать интенсивности менее чем Hmax, однако для оценки М-ответа следует применять высокие интенсивности более Hmax.

Список литературы / References

1. Borg G.A. Psychophysical Bases of Perceived Exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1982, vol. 14, pp. 377–381. DOI: 10.1249/00005768-198205000-00012
2. Burke D. Clinical Uses of H Reflexes of Upper and Lower Limb Muscles. *Clinical Neurophysiology Practice*, 2016, vol. 1, pp. 9–17. DOI: 10.1016/j.cnp.2016.02.003
3. Gandevia S.C. Spinal and Supraspinal Factors in Human Muscle Fatigue. *Physiology Rev.*, 2001, vol. 81, pp. 1725–1789. DOI: 10.1152/physrev.2001.81.4.1725
4. Gorodnichev R.M., Fomin R.N. Presynaptic Inhibition of Spinal α Motoneurons in Humans Adapted to Different Types of Motor Activity. *Human Physiology*, 2007, vol. 33, no. 2, pp. 215–220. DOI: 10.1134/S0362119707020120
5. Tanino Y., Daikuya S., Nishimori T. et al. H-reflex and Reciprocal Ia Inhibition After Fatiguing Isometric Voluntary Contraction in Soleus Muscle. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 2004, vol. 44, no. 8, pp. 473–476.
6. Löscher W.N., Cresswell A.G., Thorstensson A. Excitatory Drive to the Alpha-motoneuron Pool During a Fatiguing Submaximal Contraction in Man. *The Journal of Physiology*, 1996, vol. 491, pt. 1, pp. 271–280. DOI: 10.1113/jphysiol.1996.sp021214
7. Nordlund M.M., Thorstensson A., Cresswell A.G. Central and Peripheral Contributions to Fatigue in Relation to Level of Activation During Repeated Maximal Voluntary Isometric Plantar Flexions. *Journal of Applied Physiology (1985)*, 2004, vol. 96, no. 1, pp. 218–225. DOI: 10.1152/jappphysiol.00650.2003
8. Siegler J.C., Marshall P. The Effect of Metabolic Alkalosis on Central and Peripheral Mechanisms Associated with Exercise-induced Muscle Fatigue in Humans. *Experimental Physiology*, 2015, vol. 100, no. 5, pp. 519–530. DOI: 10.1113/EP085054

Информация об авторах

Мельников Андрей Александрович, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой физиологии, Российский университет спорта, Москва, Россия.

Глиэр Полина Викторовна, магистрант кафедры физиологии, Российский университет спорта, Москва, Россия.

Бойков Василий Леонидович, кандидат биологических наук, ст. преподаватель кафедры физического воспитания, Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, Ярославль, Россия.

Белицкая Любовь Александровна, старший преподаватель кафедры физиологии, Российский университет спорта, Москва, Россия.

Information about the authors

Andrey A. Melnikov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Physiology, Russian University of Sport, Moscow, Russia.

Polina V. Glier, Master's student, Department of Physiology, Russian University of Sport, Moscow, Russia.

Vasily L. Boikov, Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of Physical Education, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia.

Lyubov A. Belitskaya, Senior Lecturer, Department of Physiology, Russian University of Sport, Moscow, Russia.

Вклад авторов:

Мельников А.А. – научное руководство; концепция исследования; участие в организации исследований; конечный вариант текста и итоговые выводы.

Глиэр П.В., Бойков В.Л., Белицкая Л.А. – организация и исполнение исследований, статистическая обработка данных, подготовка исходного текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Melnikov A.A. – scientific supervision; research concept; research organization; final version of the text and final conclusions.

Glier P.V., Boikov V.L., Belitskaya L.A. – organization and execution of research, statistical data processing, preparation of the draft text of the article.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19.10.2023

The article was submitted 19.10.2023