

ПРЕДВАРЯЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ Н-РЕФЛЕКСА КАМБАЛОВИДНОЙ МЫШЦЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ДВИЖЕНИЯХ СТОПЫ КОНТРАЛАТЕРАЛЬНОЙ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ В ПОЛОЖЕНИИ СТОЯ

Поступила 15.05.13

В исследованиях на здоровых людях изучали изменения величины Н-рефлекса и интенсивности фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы в премоторный период произвольных движений контралатеральной нижней конечности. При положении испытуемых стоя с опорой на пятки обеих ног примерно за 60 мс до начала кондиционирующего тыльного сгибания стопы отмечались облегчение тестируемого Н-рефлекса и увеличение интенсивности ЭМГ. В случае же подошвенного сгибания стопы в аналогичных условиях наблюдались предваряющее торможение Н-рефлекса и уменьшение интенсивности фоновой ЭМГ. Характер этих изменений в целом соответствовал реципрокным отношениям между мышцами голени. Противоположные результаты были получены тогда, когда испытуемые пользовались дополнительной поддержкой рук. При этом они опирались лишь на тестируемую конечность, а кондиционирующая не была опорной. Подошвенное сгибание контралатеральной стопы вызывало в данных условиях предваряющее облегчение тестируемого Н-рефлекса. Таким образом, премоторная динамика Н-рефлекса и фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы при произвольных движениях контралатеральной нижней конечности зависит не только от вида движения. Она определяется также положением тела, наличием дополнительной поддержки и выполнением/ невыполнением нижними конечностями опорной функции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Н-рефлекс, произвольные движения, предваряющие постуральные перестройки, контралатеральное взаимодействие.

ВВЕДЕНИЕ

В премоторный период непосредственно перед началом различных произвольных движений возникают предваряющие постуральные перестройки. Они осуществляются благодаря действию нисходящих центральных моторных программ и способствуют оптимизации условий предстоящих движений. Предваряющие постуральные перестройки, связанные с движениями нижних конечностей, направлены главным образом на поддержание равновесия тела. Показано, что у человека, стоящего неподвижно и готовящегося совершить шаг, ещё в премоторный период происходят определённые изменения тонуса скелетной мускулатуры и смещение центра тяжести тела [1–4]. Сдвиги мышечного тонуса наблюдаются и у человека, совершающего движения ног, но остающегося на месте [5–7]. Ха-

рактер таких сдвигов зависит от исходного положения тестируемого субъекта на площади опоры и наличия дополнительной поддержки.

Регистрация Н-рефлекторных разрядов мышц конечностей позволяет исследовать передачу информации в цепях нейронов спинного мозга, регулирующих произвольные движения, а также влияние супраспинальных структур на сегментарные рефлекторные механизмы [8–10]. При различных движениях нижних конечностей во время премоторного периода наблюдаются изменения величины Н-рефлекса в экстензоре лодыжки – камбаловидной мышце. Они продемонстрированы в случае движений как ипсилатеральной [11–15], так и контралатеральной [16] конечностей. Показано, что предваряющие сдвиги величины Н-рефлекса камбаловидной мышцы при движениях в контралатеральном голеностопном суставе связаны с изменениями активности систем нейронов, осуществляющих пресинаптическое торможение [17]. Однако практически все указанные исследования были прове-

¹Запорожский государственный медицинский университет (Украина).
Эл. почта: elena_zenonovna@mail.ru (Е. З. Иванченко).

дены в условиях, когда нижние конечности испытуемых были расслаблены и не выполняли опорной функции. Между тем установлено, что в положении испытуемых стоя премооторные сдвиги величины Н-рефлекса существенно отличаются от наблюдаемых в положении лежа [18]. Целью настоящей работы было исследование физиологических механизмов данных феноменов и их связи с предваряющими постуральными перестройками.

МЕТОДИКА

Исследования были проведены на 23 испытуемых-добровольцах. Н-рефлекс камбаловидной мышцы вызывали с использованием стандартной методики – путем чрезкожной монополярной стимуляции афферентных волокон большеберцового нерва в области подколенной ямки толчками тока длительностью 1 мс. С помощью поверхностных электродов от камбаловидной мышцы отводили интегральный рефлекторный ЭМГ-разряд, который усиливали и регистрировали посредством двухканального цифрового электронного осциллографа Handiscope HS3 («Tie-Pie Engineering», Нидерланды). В других опытах исследовали фоновую тоническую ЭМГ-активность камбаловидной мышцы. Интенсивность такой ЭМГ характеризовали с использованием программы «Origin 8.6». После двухполупериодного выпрямления и низкочастотной фильтрации определяли площадь под интегральной кривой, огибающей осцилляции фоновой ЭМГ.

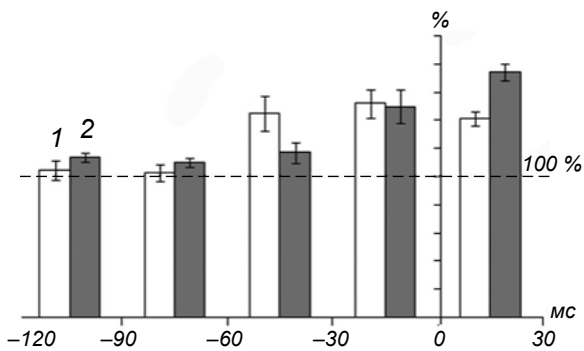
Изучали динамику величины Н-рефлекса и интенсивности фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы на протяжении премооторного периода при произвольных движениях контралатеральной нижней конечности. Испытуемые находились в положении стоя с опорой на пятки обеих ног либо на пятку одной ноги с дополнительной поддержкой рук. По световому сигналу (вспышке светодиода) они максимально быстро производили кондиционирующее движение (по типу простой сенсо-моторной реакции) с немедленным возвратом в исходное положение. Был исследован эффект движений двух видов – тыльного и подошвенного сгибания стопы; при этом положение пятки не изменялось. Показателем начала кондиционирующего движения контралатеральной конечности были первые осцилляции ЭМГ обеспечивающих его мышц: передней большеберцовой при тыльном сгибании и икроножной + камбаловидной – при подошвенном.

Тестируемый Н-рефлекс регистрировали через различные промежутки времени после светового сигнала с тем, чтобы рефлекторные ответы перекрывали весь латентный период двигательной реакции. Величины полученных Н-рефлексов нормировали относительно контроля. Фоновую ЭМГ камбаловидной мышцы регистрировали на всем протяжении латентного периода движения. Интенсивность такой активности сравнивали с интенсивностью ЭМГ до подачи светового сигнала. Определяли средние арифметические исследуемых величин и ошибки среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ

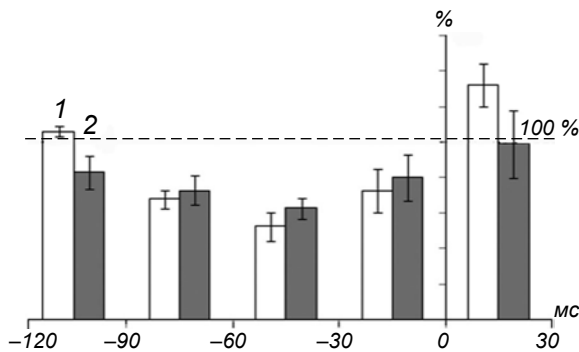
В первой серии исследовали временное течение изменений тестируемого Н-рефлекса камбаловидной мышцы на протяжении премооторного периода тыльного сгибания контралатеральной стопы. Испытуемые находились в положении стоя с опорой на пятки обеих ног без дополнительной поддержки. С целью определения динамики исследуемых показателей премооторный период был разделен на равные промежутки времени, предшествующие началу кондиционирующего движения. При интервале 120–90 мс до начала тыльного сгибания усредненная величина тестируемого Н-рефлекса составляла $105 \pm 7 \%$ контроля, 90–60 мс – $103 \pm 6 \%$, 60–30 мс – $145 \pm 12 \%$, 30 – 0 мс – $152 \pm 10 \%$ и на фоне начавшегося движения – $141 \pm 5 \%$. Таким образом, облегчение Н-рефлекса наступало в заключительной стадии премооторного периода. Оно было отмечено в среднем за 60 мс до начала кондиционирующего движения. Во второй серии опытов при аналогичном кондиционирующем движении на протяжении тех же временных интервалов премооторного периода была исследована интенсивность фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы. Её нормированные показатели были таковы: 120–90 мс – $114 \pm 3 \%$, 90–60 мс – $110 \pm 3 \%$, 60–30 мс – $117 \pm 7 \%$, 30–0 мс – $150 \pm 12 \%$, на фоне движения – $174 \pm 6 \%$. Результаты обеих серий опытов представлены на рис. 1.

В третьей и четвертой сериях опытов таким же образом были зарегистрированы изменения Н-рефлекса камбаловидной мышцы и её фоновой ЭМГ, предшествующие другому произвольному движению – подошвенному (плантарному) сгибанию контралатеральной стопы. Результаты опытов приведены на рис. 2. Как и в предыдущих сериях



Р и с. 1. Динамика величины Н-рефлекса камбаловидной мышцы и интенсивности ее фоновой ЭМГ в премоторный период произвольного тыльного сгибания контралатеральной стопы (положение стоя с опорой на обе конечности). По оси абсцисс – интервалы (мс) относительно начала ЭМГ-активности, соответствующей произвольному движению контралатеральной конечности; по оси ординат – усредненная нормированная величина Н-рефлекса камбаловидной мышцы (%) – 1 и усредненная нормированная интенсивность фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы (%) – 2.

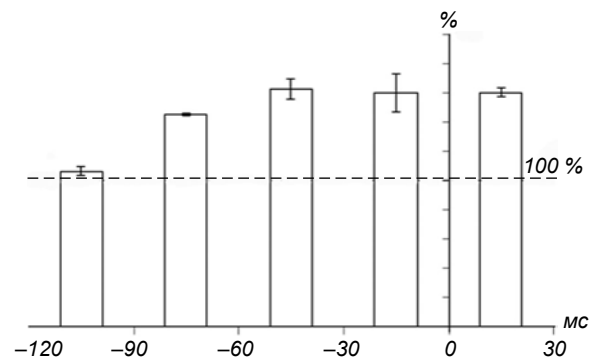
Р и с. 1. Динаміка величини Н-рефлексу камбалоподібного м'язу та інтенсивності його фонові ЕМГ у премоторний період довільного тильного згинання контралатеральної стопи (положення стоячи з опорю на обидві кінцівки).



Р и с. 2. Динамика величины Н-рефлекса камбаловидной мышцы и интенсивности ее фоновой ЭМГ в премоторный период произвольного подошвенного сгибания контралатеральной стопы (положение стоя с опорой на обе конечности). Обозначения те же, что и на рис. 1.

Р и с. 2. Динаміка величини Н-рефлексу камбалоподібного м'язу та інтенсивності його фонові ЕМГ у премоторний період довільного підшовного згинання контралатеральної стопи (положення стоячи з опорю на обидві кінцівки).

опытов, испытуемые находились в положении стоя с опорой на обе ноги. При совершении кондиционирующего движения пятка не отрывалась от опоры, а подушечки стопы опускались ниже её уровня. Полученные данные существенно отличались от результатов первой и второй серий опытов. За 120–90 мс до начала движения средняя нормированная величина Н-рефлекса была равна $105 \pm 3 \%$, 90–60 мс – $68 \pm 5 \%$, 60–30 мс – $53 \pm 8 \%$, 30–0 мс – $73 \pm 11.7 \%$,



Р и с. 3. Динамика величины Н-рефлекса камбаловидной мышцы при произвольном подошвенном сгибании контралатеральной конечности с поддержкой рук и опорой на тестируемую конечность.

По оси абсцисс – интервалы (мс) относительно начала ЭМГ-активности, соответствующей произвольному движению контралатеральной конечности; по оси ординат – усредненная нормированная величина Н-рефлекса камбаловидной мышцы (%).

Р и с. 3. Динаміка величини Н-рефлексу камбалоподібного м'язу при довільному підшовному згинанні контралатеральної кінцівки з підтримкою рук та опорю на тестовану кінцівку.

на фоне движения – $132 \pm 12 \%$. Таким образом, Н-рефлекс в течение премоторного периода оказался заторможенным. Возникновение явного торможения было отмечено за 90 мс до начала кондиционирующего движения, т. е. раньше, чем облегчение при тыльном сгибании. К концу премоторного периода глубина торможения несколько уменьшалась. Динамика интенсивности фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы в премоторный период также значительно отличалась от наблюдаемой в условиях тыльного сгибания контралатеральной стопы. При интервале 120–90 мс до начала движения интенсивность ЭМГ составляла в среднем $83 \pm 9 \%$, 90–60 мс – $73 \pm 8 \%$, 60–30 мс – $63 \pm 6 \%$, 30–0 мс – $80 \pm 13 \%$, на фоне движения – $99 \pm 19 \%$.

В пятой серии опытов исследовали эффект контралатерального подошвенного сгибания в условиях, когда испытуемый пользовался дополнительной поддержкой обеих рук и опирался лишь на тестируемую нижнюю конечность. Мышцы ноги, осуществляющей кондиционирующее подошвенное сгибание, были в исходном положении расслабленными. На рис. 3 представлены результаты опытов данной серии. Перед началом двигательной реакции амплитуда рефлекторных ответов камбаловидной мышцы увеличивалась. В интервале 120–90 мс до начала осцилляций ЭМГ величина Н-рефлекса составляла $106 \pm 3 \%$ контроля. В интервале 90–60 мс

амплитуда тестируемого рефлекса возрастала до $145 \pm 1 \%$, за 60–30 мс величина рефлекса составляла $162 \pm 7 \%$, а в промежутке времени, меньшем, чем 30 мс до начала движения, – до $160 \pm 12 \%$. Величина Н-рефлекса камбаловидной мышцы оставалась увеличенной и на фоне произвольного движения контралатеральной конечности – до $160 \pm 3 \%$ контроля.

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе настоящей работы сравнивали предваряющие изменения величины Н-рефлекторных разрядов камбаловидной мышцы и её фоновой ЭМГ при произвольных движениях контралатеральной нижней конечности. Результаты опытов показали, что в премоторный период в условиях вертикального положения испытуемых с опорой на пятки обеих ног оба эти показателя изменялись. Направленность их изменений была различной и определялась видом кондиционирующего движения. Если тыльное сгибание стопы вызывало предваряющее облегчение Н-рефлекса камбаловидной мышцы и увеличение интенсивности её фоновой ЭМГ, то при подошвенном сгибании (разгибании лодыжки) возникали изменения противоположного характера. Они выражались в торможении тестируемого Н-рефлекса и снижении интенсивности ЭМГ. Таким образом, в характере изменений нашли отражение реципрокные отношения между мышцами голени. Сокращение большеберцовых мышц, обеспечивающее тыльное сгибание стоп, не приводит к изменению положения тела стоящего человека относительно опоры. Плантарное же сгибание стоп за счет сокращения икроножных и камбаловидных мышц, выполняющих работу против силы гравитации, поднимает тело над опорой. Естественно, что последняя группа мышц, анатомически классифицируемая как плантарные флексоры стопы, является в данном аспекте физиологическими экстензорами.

При каждом из кондиционирующих движений премоторные сдвиги величины Н-рефлекса и фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы происходили в одном направлении. Временное течение изменений Н-рефлекса было сходным с соответствующими изменениями ЭМГ в условиях как предваряющего облегчения, так и торможения. Это обстоятельство позволяет предположить существование связи между ними. Как известно, интенсивность фоновой ЭМГ отражает уровень тонической активности мо-

тонейронов исследуемой мышцы. Поэтому можно полагать, что в данном случае премоторные изменения Н-рефлекса объясняются сдвигами возбудимости мотонейронов камбаловидной мышцы под действием центральных моторных команд. Этим указанные изменения отличаются от наблюдаемых при движениях контралатеральной стопы в условиях, когда конечности не осуществляли функции опоры [17]. Мы получили указания на то, что в последнем случае такие изменения обусловлены процессами, происходящими в пресинаптической части дуги Н-рефлекса.

Изменения Н-рефлекса и фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы при вертикальном положении с опорой на обе ноги можно рассматривать как одно из проявлений предваряющих постуральных перестроек. Об этом говорит их сравнение с результатами серии опытов, в которых испытуемые пользовались поддержкой рук и не опирались на ногу, выполняющую кондиционирующее движение. Как известно, дополнительная ручная поддержка приводит к значительному ослаблению предваряющих постуральных перестроек, в которых участвуют мышцы ног [19]. В указанной серии опытов подошвенное сгибание контралатеральной стопы вызывало предваряющее облегчение Н-рефлекса, аналогичное тому, которое наблюдалось при положении испытуемых лежа [18]. Таким образом, физиологическое значение и механизм премоторных изменений Н-рефлексов в случае движений контралатеральной конечности определяются не только видом данных движений, но и в значительной степени условиями, в которых они осуществляются.

При проведении исследований от всех участников было получено письменное информированное согласие.

О. З. Иванченко¹

ВИПЕРЕДЖУЮЧІ ЗМІНИ Н-РЕФЛЕКСУ КАМБАЛОПОДІБНОГО М'ЯЗА ЛЮДИНИ ПРИ РУХАХ СТОПИ КОНТРАЛАТЕРАЛЬНОЇ НИЖНЬОЇ КІНЦІВКИ В ПОЛОЖЕННІ СТОЯЧИ

¹Запорізький державний медичний університет (Україна).

Резюме

У дослідженнях на здорових людях вивчали зміни величини Н-рефлексу та інтенсивності фонові ЕМГ камбалоподіб-

ного м'яза в премоторний період довільних рухів контралатеральної нижньої кінцівки. При положенні випробуваних стоячи з опорою на п'ятки обох ніг приблизно за 60 мс до початку кондиціонуючого тильного згинання стопи відмічалися полегшення тестованого Н-рефлексу та збільшення інтенсивності ЕМГ. У разі ж підшовного згинання стопи в аналогічних умовах спостерігалися випереджуюче гальмування Н-рефлексу та зменшення інтенсивності фонові ЕМГ. Характер цих змін у цілому відповідав реципрокним відношенням між м'язами голілки. Протилежні результати були отримані тоді, коли випробувані користувалися додатковою підтримкою рук. При цьому вони спиралися лише на тестовану кінцівку, а кондиціонуюча не була опорною. Підшовне згинання контралатеральної стопи викликало в даних умовах випереджуюче полегшення тестованого Н-рефлексу. Таким чином, премоторна динаміка Н-рефлексу та фонові ЕМГ камбалоподібного м'яза при довільних рухах контралатеральної нижньої кінцівки залежить не тільки від виду руху. Вона визначається також положенням тіла, наявністю додаткової підтримки та виконанням нижніми кінцівками опорної функції.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. E. McIlroy and B. E. Maki, "Changes in early 'automatic' postural response associated with the prior-planning and execution of a compensatory step," *Brain Res.*, **631**, No. 2, 203-211 (1993).
2. T. Ito, T. Azuma, and N. Yamashita, "Anticipatory control in the initiation of a single step under biomechanical constraints in humans," *Neurosci. Lett.*, **352**, No. 3, 207-210 (2003).
3. L. Rocchi, M. Mancini, L. Chiari, et al., "Dependence of anticipatory postural adjustments for step initiation on task movement features: a study based on dynamometric and accelerometric data," in: *Annu. Int. Conf., Engin. Med. Biol. Soc. Proc. (IEEE) (Aug. 30 2006-Sept. 3 2006)*, New York (2006), pp.1489-1492.
4. E. Dalton, M. Bishop, M. D. Tillman, et al., "Simple change in initial standing position enhances the initiation of gait," *Med. Sci. Sports Exercise*, **43**, No. 12, 2352-2358 (2011).
5. P. Nouillot, M. C. Do, and S. Bouisset, "Are there anticipatory segmental adjustments associated with lower limb flexions when balance is poor in humans?" *Neurosci. Lett.*, **279**, No. 2, 77-80 (2000).
6. L. M. Hall, S. Brauer, and F. Horak, "Adaptive changes in anticipatory postural adjustments with novel and familiar postural supports," *J. Neurophysiol.*, **103**, No. 2, 968-976 (2010).
7. E. Yiou, T. Deroche, M. C. Do, and T. Woodman, "Influence of fear of falling on anticipatory postural control of medio-lateral stability during rapid leg flexion," *Eur. J. Appl. Physiol.*, **111**, No. 4, 611-620 (2011).
8. E. Pierrot-Deseilligny and D. Mazevet, "The monosynaptic reflex: a tool to investigate motor control in humans. Interest and limits," *Neurophysiol. Clin.*, **30**, No. 2, 67-80 (2000).
9. M. Knikou, "The H-reflex as a probe: Pathways and pitfalls," *J. Neurosci. Methods*, **171**, No. 1, 1-12 (2008).
10. Y. S. Chen and S. Zhou, "Soleus H-reflex and its relation to static postural control," *Gait Posture*, **33**, No. 2, 169-178 (2011).
11. Я. М. Коц, В. И. Жуков, "О супраспинальном управлении сегментарными центрами мышц-антагонистов у человека. 3. «Настройка» спинального аппарата реципрокного торможения в период организации произвольного движения", *Биофизика*, **16**, № 6, 1085-1091 (1971).
12. R. Riedo and D. G. Rugg, "Origin of the specific H reflex facilitation preceding a voluntary movement in man," *J. Physiol.*, **397**, 371-388 (1988).
13. C. Crone and J. Nielsen, "Spinal mechanisms in man contributing to reciprocal inhibition during voluntary dorsiflexion of the foot," *J. Physiol.*, **416**, 255-272 (1989).
14. T. Kasai and T. Komiyama, "Antagonist inhibition during rest and precontraction," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, **81**, No. 6, 427-432 (1991).
15. Б. Н. Сметанин, "Контралатеральные спинальные эффекты, сопровождающие произвольные движения в голеностопном суставе", *Физиол. журн. СССР им. И. М. Сеченова*, **60**, № 3, 334-340 (1974).
16. Е. З. Иванченко, Э. И. Сливко, "Механизм предвещающего облегчения Н-рефлексов мышц голени человека при произвольных движениях в голеностопном суставе", *Neurophysiology/Нейрофизиология*, **45**, № 4, 385-392 (2013).
17. Е. З. Иванченко, Э. И. Сливко, "Изменения Н-рефлекса камбаловидной мышцы, предшествующие произвольным движениям контралатеральной нижней конечности", *Neurophysiology/Нейрофизиология*, **43**, № 2, 146-152 (2011).
18. H. Slijper and M. Latash, "The effects of instability and additional hand support on anticipatory postural adjustments in leg, trunk, and arm muscles during standing," *Exp. Brain Res.*, **135**, No. 1, 81-93 (2000).