

УДК 612.741:611.728.4

Роль опорной функции нижних конечностей в премоторных изменениях Н-рефлекса камбаловидной мышцы

Е.З. Иванченко

Запорожский государственный медицинский университет, Запорожье, Украина

В исследованиях на здоровых людях изучали эффекты произвольного разгибания голеностопного сустава контралатеральной конечности, которое выполнялось в отсутствие или при наличии ее опорной функции, на Н-рефлекс камбаловидной мышцы. Изменения величины моносинаптических ответов возникали за 90 мс до начала произвольного движения и наблюдались в течение всего его премоторного периода. В отсутствие опорной функции контралатеральной конечности (положение лежа и стоя без опоры на стопу) происходило облегчение Н-рефлекса камбаловидной мышцы, которое не сопровождалось изменениями ее фоновой электромиограммы (ЭМГ), что свидетельствовало о пресинаптической локализации премоторных изменений состояния спинальных рефлекторных дуг, то есть их афферентной части. При выполнении конечностями опорной функции (положение стоя с опорой на обе ноги) Н-рефлекс и фоновая ЭМГ исследуемой мышцы в премоторном периоде разгибания контралатерального голеностопного сустава тормозились, что указывало на снижение рефлекторной возбудимости мотонейронного пула, имеющее постсинаптическую природу. Обсуждается ведущая роль опорной функции в формировании центральной нервной системой моторных команд, предвещающих произвольные движения нижних конечностей.

Ключевые слова: моносинаптический рефлекс; предвещающие перестройки; произвольные движения

The role of the supporting lower limb function in the premotor changes in the H-reflex of *m. soleus*

E.Z. Ivanchenko

Zaporozhye State Medical University, Zaporozhye, Ukraine

In studies on healthy humans we examined changes in the H reflex amplitude and the intensity of background EMG of the soleus muscle within the premotor period of voluntary extension of the contralateral ankle joint. The tested persons were in the lying prone position with relaxed legs, or in the standing position with support on both feet or only on one foot with additional hand support. The soleus H reflex was induced using the standard technique by transcutaneous stimulation (1 ms long current pulses) of the tibial nerve afferents in the region of the popliteal dimple. Using superficial electrodes, we recorded the integral EMG reflex discharge from the *m. soleus*, amplified, and visualized it using a two-channel digital oscillograph, Handiscope HS3 (TiePieEngineering, Netherlands). In other tests, we also recorded tonic background EMG activity from the soleus muscle. After fullwave rectification and low-frequency filtration we estimated the area under the integral curve enveloping oscillations of the above mentioned EMG. In the lying position the extension of contralateral ankle joint evoked anticipatory facilitation of the testing soleus H-reflex. It manifested in 90–60 ms and reached the maximum 30 ms before the conditioning movement. Considerable changes of the soleus background EMG-activity did not occur during the premotor period. Consequently, it is supposed that the mechanism leading to the H-reflex facilitation is the decrease of presynaptic inhibition at 1a. In the standing position with support on both feet contralateral ankle joint extension caused anticipatory inhibition of the soleus H-reflex and simultaneous suppression of background EMG 90–60 ms before the conditioning movement. These results indicate the anticipatory changes of muscle tone and suggest participation of postsynaptic mechanism in the inhibition of the testing H-reflex. When the moving contralateral extremity had no support, the contralateral ankle joint extension did not cause anticipatory inhibition but facilitation of the soleus H-reflex. Its time course was similar to that observed in the lying position. The considerable changes of the soleus background EMG-activity did not arise. The results of the experiments indicate that the nature of premotor changes in the spinal neuron circuits, associated with the lower limb muscles, depends not

only on the type of upcoming voluntary movement. Being caused by the contralateral limb movements, they depend greatly on the fulfillment or nonfulfillment of the support function by the lower limbs.

Keywords: monosynaptic reflex; anticipatory adjustments; voluntary motion

Введение

Каждый произвольный двигательный акт сопряжен со сложными предваряющими функциональными изменениями в спинальных рефлекторных цепях. Такие изменения возникают непосредственно перед его началом под действием моторных команд, исходящих из головного мозга. Их роль заключается в оптимизации условий предстоящего произвольного движения. Изменения спинальных рефлекторных цепей проявляются, в частности, в предваряющих постуральных перестройках, которые выражаются в адаптивных изменениях тонуса мускулатуры и способствуют сохранению позы тела и равновесия (Horak, 2006; Bouisset, 2008; Latash, 2010; Saradjian, 2015). Описаны также предваряющие изменения потоков афферентных импульсов, которые влияют непосредственно на формирование центральных моторных команд (Rugot et al., 2010; Mouchnino et al., 2012).

Одним из основных методов исследования спинальных рефлекторных механизмов человека является Н-рефлексометрия (Pierrot-Deseilligny and Mazevet, 2000; Zehr, 2002; Misiaszek, 2003; Knikou, 2008). Н-рефлекс представляет собой рефлекторную реакцию мышцы на электрическое раздражение ее низкого порога афферентов, имеющих моносинаптическую связь с иннервирующими ее мотонейронами. Величина Н-рефлекса камбаловидной мышцы претерпевает определенные изменения в премоторном периоде произвольных движений ипсилатеральной (Kots, 1969; Schieppati et al., 1986; Riedo and Ruegg, 1988; Geertsen et al., 2010) и контралатеральной (Smetanin, 1974; Eichenberger and Ruegg, 1984) нижних конечностей. Характер сдвигов величины моносинаптических рефлексов на протяжении этого периода определяется видом предстоящего произвольного движения. Изучение предваряющих изменений Н-рефлексов и их происхождения способствует пониманию механизмов формирования произвольных движений человека.

Цель данной статьи – выяснить, какую роль имеет выполнение нижними конечностями их опорной функции в изменениях Н-рефлекса камбаловидной мышцы, предваряющих произвольные движения голеностопного сустава.

Материал и методы исследований

Исследования проведены на 27 добровольцах, которые дали информированное согласие на участие в опытах. Н-рефлекс камбаловидной мышцы вызывали путем чрескожной монополярной стимуляции афферентных волокон большеберцового нерва в области подколенной ямки электрическими импульсами длительностью 1 мс. Моносинаптический ответ исследуемой мышцы отводили с помощью поверхностных электродов, усиливали и регистрировали посредством двухканального цифрового электронного осциллографа Handiscop HS3.

Для исследования локализации изменений Н-рефлекса камбаловидной мышцы регистрировали ее фоновую ЭМГ, которую отводили поверхностными электродами и

после усиления также регистрировали посредством электронного осциллографа. Определение показателей интенсивности ЭМГ производили с помощью программы Origin 8.6. После двухполупериодного выпрямления и низкочастотной фильтрации определяли площадь подинтегральной кривой, огибающей осцилляции ЭМГ.

Изучали динамику величины Н-рефлекса и интенсивности фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы на протяжении премоторного периода разгибания контралатеральной нижней конечности в голеностопном суставе (кондиционирующее движение). Во время исследований испытуемые находились в одном из трех положений: лежа на кушетке на животе с расслабленными нижними конечностями и свободно свисающими стопами, стоя с опорой на обе ноги или стоя с опорой на одну из них, используя дополнительную поддержку с помощью рук. По световому сигналу (вспышке светодиода) испытуемые производили по типу простой сенсомоторной реакции с максимальной скоростью кондиционирующее движение с немедленным возвратом стопы в исходное положение. Показателем начала указанного движения были первые осцилляции фазной ЭМГ камбаловидной мышцы контралатеральной конечности.

Тестируемый Н-рефлекс регистрировали через различные промежутки времени после светового сигнала с тем, чтобы получить рефлекторные ответы в течение всего латентного (премоторного) периода кондиционирующей двигательной реакции. С целью определения динамики величины Н-рефлекса указанный период был разделен на равные промежутки времени, предшествующие началу движения: 90–120, 60–90, 30–60 и 0–30 мс. Амплитуды всех полученных Н-рефлексов нормировали относительно контроля (в %). Фоновую ЭМГ камбаловидной мышцы регистрировали на всем протяжении латентного периода движения. Показатели ее интенсивности в различные премоторные интервалы сравнивали с интенсивностью ЭМГ этой же мышцы до подачи светового сигнала.

Определяли средние арифметические нормированной амплитуды Н-рефлексов и интенсивности фоновой ЭМГ и стандартные ошибки исследуемых показателей. Достоверность различий с контролем оценивали, используя непараметрический критерий Вилкоксона.

Результаты и их обсуждение

В первой и второй сериях опытов исследовали динамику изменений амплитуды тестируемого Н-рефлекса камбаловидной мышцы и интенсивности ее фоновой ЭМГ на протяжении премоторного периода разгибания контралатерального голеностопного сустава при положении испытуемых лежа на животе со свободно свисающими стопами (рис. 1). Приблизительно за 90 мс до начала кондиционирующего движения наступало увеличение амплитуды тестируемого Н-рефлекса. В интервале 90–120 мс премоторного периода усредненная величина моносинаптических ответов камбаловидной

мышцы составила $110 \pm 3\%$ от контроля, за 60–90 мс до начала движения – $114 \pm 8\%$, за 30–60 мс – $130 \pm 7\%$, за 0–30 мс – $143 \pm 9\%$, на фоне движения – $160 \pm 8\%$.

Нормированные показатели интенсивности фоновой ЭМГ тестируемой мышцы были таковы: в интервале за 90–120 мс до начала движения – $93 \pm 3\%$, за 60–90 мс – $90 \pm 3\%$, за 30–60 мс – $87 \pm 3\%$, за 0–30 мс – $89 \pm 4\%$, на фоне движения – $94 \pm 8\%$. Таким образом, величина Н-рефлекса камбаловидной мышцы существенно возрастала на протяжении премоторного периода произвольного разгибания контралатерального голеностопного сустава при

наличии тенденции к снижению фоновой ЭМГ-активности тестируемой мышцы.

В третьей и четвертой сериях опытов таким же образом регистрировали изменения Н-рефлекса камбаловидной мышцы и ее фоновую ЭМГ, предшествующие разгибанию контралатерального голеностопного сустава, но при этом испытуемые находились в положении стоя с опорой на обе ноги. При совершении кондиционирующего движения пятка не отрывалась от опоры, а стопа опускалась ниже ее уровня. Полученные данные существенно отличались от результатов первой и второй серий опытов (рис. 2).

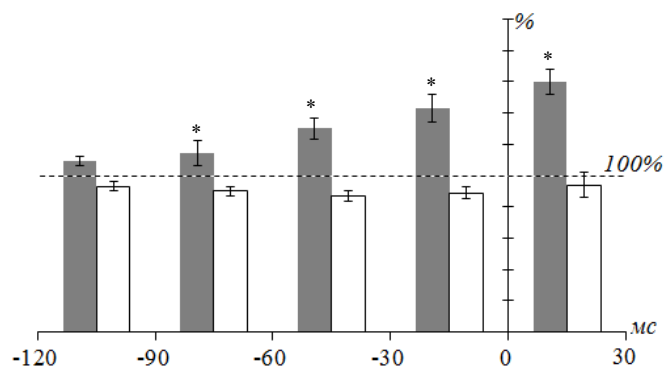


Рис. 1. Динамика величины Н-рефлекса ($n = 12$) и фоновой ЭМГ ($n = 5$) камбаловидной мышцы в премоторный период произвольного разгибания в контралатеральном голеностопном суставе (лежа с расслабленными конечностями): по оси абсцисс – интервалы времени (мс) до начала произвольного движения контралатеральной конечности; по оси ординат: темные столбики – усредненная нормированная величина Н-рефлекса камбаловидной мышцы (%), светлые столбики – усредненная нормированная интенсивность фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы (%); звездочками обозначены достоверные изменения

За 90–120 мс до начала движения средняя нормированная величина Н-рефлекса камбаловидной мышцы составила $106 \pm 3\%$, за 60–90 мс – $68 \pm 5\%$, за 30–60 мс – $53 \pm 8\%$, за 0–30 мс – $73 \pm 12\%$, на фоне движения – $132 \pm 12\%$. Таким образом, тестируемый Н-рефлекс оказался в премоторный период заторможенным. Возникновение торможения отмечено за 90 мс до начала кондиционирующего движения. К концу его премоторного периода глубина торможения уменьшилась.

Динамика интенсивности фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы в премоторном периоде разгибания контралатерального голеностопного сустава была следующей: в интервале за 90–120 мс до начала движения интенсивность ЭМГ составила в среднем $93 \pm 3\%$, за 60–90 мс – $73 \pm 8\%$, за 30–60 мс – $63 \pm 6\%$, за 0–30 мс – $80 \pm 13\%$, на фоне движения – $97 \pm 6\%$. Таким образом, изменения величины Н-рефлекса, предвещающие кондиционирующую двигательную реакцию, были однонаправленными с модулирующей фоновой ЭМГ исследуемой мышцы.

В пятой и шестой сериях опытов исследовали эффект разгибания контралатерального голеностопного сустава на величину Н-рефлекса камбаловидной мышцы и ее фоновую ЭМГ в условиях, когда испытуемые пользовались дополнительной поддержкой с помощью обеих рук и опирались лишь на тестируемую нижнюю конечность. Мышцы ноги, осуществляющей кондиционирующее движение, в исходном положении были расслабленными. Перед началом двигательной реакции наблюдалось увеличение амплитуды Н-рефлексов камбаловидной мышцы (рис. 3). В интервале за 90–120 мс до начала движения величина Н-рефлекса составила $104 \pm$

3% от контроля, за 60–90 мс – $131 \pm 6\%$, за 30–60 мс – $153 \pm 7\%$, а в промежутке времени, меньшем, чем 30 мс до начала движения – $159 \pm 7\%$.

Нормированные показатели интенсивности фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы в шестой серии опытов изменялись мало. Они были такими в интервалах премоторного периода кондиционирующего движения: за 90–120 мс до его начала – $98 \pm 5\%$, за 60–90 мс – $102 \pm 4\%$, за 30–60 мс – $102 \pm 4\%$, за 0–30 мс – $99 \pm 4\%$, на фоне движения – $99 \pm 3\%$.

Динамика тестируемого Н-рефлекса в премоторном периоде произвольного разгибания контралатерального голеностопного сустава в значительной степени зависела от положения тела испытуемых. Одно и то же кондиционирующее движение вызывало в положении лежа предваряющее облегчение, а в положении стоя с опорой на обе ноги – торможение Н-рефлекса камбаловидной мышцы. Эти различия нельзя объяснить влияниями от рецепторов вестибулярного аппарата, поскольку сдвиги величины моносинаптического рефлекторного ответа при вертикальном положении в отсутствие опорной функции конечности, осуществляющей произвольное движение, были такими же, как и в положении лежа. Это указывает на то, что динамика Н-рефлекса в премоторном периоде разгибания контралатерального голеностопного сустава обусловлена наличием либо отсутствием опорной функции конечности. Можно полагать, что состояние спинальных рефлекторных дуг зависит от афферентных сигналов, поступающих в центральную нервную систему от рецепторов мышц голени (Refshauge and Fitzpatrick, 1995; Gobble and Coxon, 2011) и кож-

ных рецепторов стопы (Kavaonoudias and Roll, 1998). Очевидно, такие сигналы влияли на функциональное состояние супраспинальных структур, формирующих моторные команды в период, непосредственно предшествующий произвольным движениям конечности.

С помощью регистрации фоновой ЭМГ-активности камбаловидной мышцы в премоторном периоде разгибания голеностопного сустава контралатеральной конечности удалось выявить определенные отличия и в физиологических механизмах изменений исследуемых Н-рефлексов. Отсутствие модуляции интенсивности

ЭМГ в отсутствие опорной функции конечностей свидетельствовало о том, что облегчение моносинаптических ответов в данном случае имело пресинаптическую локализацию и, очевидно, касалось афферентной части соответствующих рефлекторных дуг. Оно могло быть связано с ослаблением пресинаптического 1а торможения. Функциональная роль этого явления могла заключаться в облегчении поступления афферентной информации в центральную нервную систему в условиях ее относительного дефицита в отсутствие опорной функции нижних конечностей.

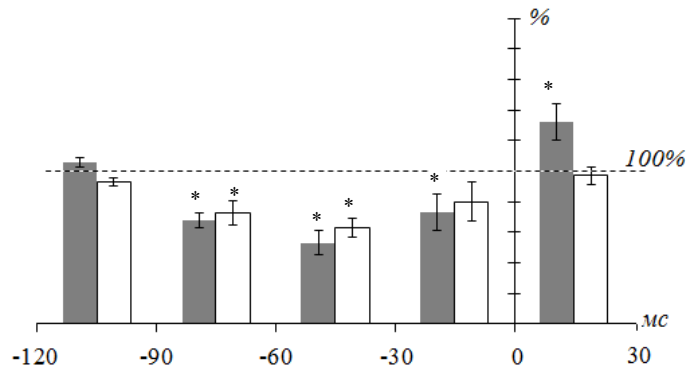


Рис. 2. Динамика величины Н-рефлекса (n = 5) и фоновой ЭМГ (n = 5) камбаловидной мышцы в премоторном периоде произвольного разгибания в контралатеральном голеностопном суставе (стоя с опорой на обе конечности): обозначения см. рис. 1

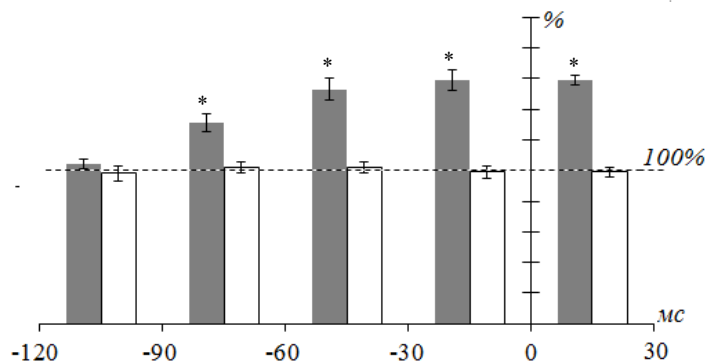


Рис. 3. Динамика величины Н-рефлекса (n = 5) и фоновой ЭМГ (n = 5) камбаловидной мышцы в премоторный период произвольного разгибания в контралатеральном голеностопном суставе (с поддержкой при помощи рук и опорой на тестируемую конечность): обозначения см. рис. 1

Напротив, однонаправленные изменения амплитуды Н-рефлексов и интенсивности фоновой ЭМГ камбаловидной мышцы при осуществлении разгибания контралатерального голеностопного сустава, которое испытуемые выполняли с опорой на обе ноги, свидетельствовали о снижении возбудимости мотонейронного пула, то есть о постсинаптической локализации модуляции состояния спинальных рефлекторных дуг. В данном случае реализовывались координационные взаимодействия между мышцами обеих конечностей, играющие важную роль в осуществлении шагового цикла.

Выводы

Результаты исследований показали, что произвольное разгибание контралатеральной нижней конечности в голеностопном суставе вызывает предваряющие изменения

Н-рефлекса камбаловидной мышцы, которые возникают за 60–90 мс до начала движения, а их характер зависит от того, находится ли нижние конечности в расслабленном состоянии или выполняют опорную функцию.

В отсутствие опорной функции контралатеральной конечности (положение лежа и стоя без опоры) разгибание ее голеностопного сустава вызывает облегчение Н-рефлекса камбаловидной мышцы, которое не сопровождается изменениями ее фоновой ЭМГ.

При выполнении контралатеральной конечностью опорной функции разгибание ее голеностопного сустава приводит к торможению Н-рефлекса камбаловидной мышцы и ее фоновой ЭМГ-активности.

Изменения Н-рефлексов камбаловидной мышцы в премоторном периоде разгибания контралатерального голеностопного сустава при опоре на конечность, осуществляющую произвольное движение, и в отсутствие опоры локализованы соответственно в постсинаптической и

пресинаптической части спинальных рефлекторных дуг и могут иметь различное функциональное значение.

Библиографические ссылки

- Bouisset, S., Do, M.C., 2008. Posture, dynamic stability, and voluntary movement. *Neurophysiol. Clin.* 38(6), 345–362.
- Eichenberger, A., Rüegg, D.G., 1984. Relation between the specific H reflex facilitation preceding a voluntary movement and movement parameters in man. *J. Physiol.* 347, 545–559.
- Geertsen, S.S., Zuur, A.T., Nielsen, J.B., 2010. Voluntary activation of ankle muscles is accompanied by subcortical facilitation of their antagonists. *J. Physiol.* 588, 2391–2402.
- Goble, D.J., Coxon, J.P., Van Impe, A., Geurts, M., Doumas, M., Wenderoth, N., Swinnen, S.P., 2011. Brain activity during ankle proprioceptive stimulation predicts balance performance in young and older adults. *J. Neurosci.* 31, 16344–16352.
- Horak, F.B., 2010. Postural orientation and equilibrium: What do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age Ageing.* 35(2), 7–11.
- Kavounoudias, A., Roll, R., Roll, J.P., 1998. The plantar sole is a 'dynamometric map' for human balance control. *Neuroreport* 9(14), 3247–3252.
- Knikou, M., 2008. The H-reflex as a probe: Pathways and pit falls. *J. Neurosci. Methods* 171(1), 1–12.
- Kots, Y.M., Zhukov, V.I., 1971. On the supraspinal control of antagonistic muscles by segmental centers in humans. 3. Adjustment of spinal apparatus of reciprocal inhibition within the period of formation of voluntary movements. *Biofizika* 16(6), 1085–1091.
- Latash, M.L., 2010. Motor synergies and the equilibrium-point hypothesis. *Motor Control.* 14(3), 294–322.
- Misiaszek, J.E., 2003. The H-reflex as a tool in neurophysiology: Its limitation and uses in understanding nervous system function. *Muscle Nerve* 28(2), 144–160.
- Mouchnino, L., Robert, G., Ruget, H., Blouin, J., Simoneau, M., 2012. Online control of anticipated postural adjustments in step initiation: Evidence from behavioral and computational approaches. *Gait Posture* 35(4), 616–620.
- Pierrot-Deseilligny, E., Mazevet, D., 2000. The monosynaptic reflex: A tool to investigate motor control in humans. Interest and limits. *Neurophysiol. Clin.* 30(2), 67–80.
- Refshauge, K.M., Fitzpatrick, R.C., 1995. Perception of movement at the human ankle: Effects of leg position. *J. Physiol.* 488, 243–248.
- Riedo, R., Rüegg, D.G., 1988. Origin of the specific H reflex facilitation preceding a voluntary movement in man. *J. Physiol.* 397, 371–388.
- Ruget, H., Blouin, J., Teasdale, N., Mouchnino, L., 2008. Can prepared anticipatory postural adjustments be updated by proprioception? *Neurosci.* 155(3), 640–648.
- Saradjian, A.H., 2015. Sensory modulation of movement, posture and locomotion. *Neurophysiol. Clin.* 45(4–5), 255–267.
- Smetanin, B.N., 1974. Contralateral spinal effects accompanying voluntary movements in the ankle joint. *Sechenov Fiziol. Zh. SSSR.* 3, 334–340.
- Zehr, P.E., 2002. Considerations for use of the Hoffmann reflex in exercise studies. *Eur. J. Appl. Physiol.* 86(6), 455–468.

Надійшла до редколегії 11.03.2016