

УДК 612.83:615.82

МОНОСИНАПТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКОМОТОРНЫХ МЫШЦ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИРОВАНИЯ НЕЙРОМЫШЕЧНОГО СТАТУСА СПОРТСМЕНОВ

Е.А. Михайлова, А.А. Челноков, А.В. Лапченков, Ю.А. Поварещенкова

Великолукская академия физической культуры и спорта

Проанализированы параметры заднекорешковых двигательных ответов, вызванных при одномоментной электрической стимуляции на уровне T₁₁ – T₁₂ спинного мозга, зарегистрированные в течение годового цикла подготовки бегунов-спринтеров. Обнаружена взаимосвязь между специфичностью нагрузок в годовом цикле подготовки, параметрами рефлекторной возбудимости основных рабочих мышц атлетов и их спортивным результатом. Колебания достигнутого уровня функционального состояния нервно-мышечного аппарата отражаются в модуляции электронейромиографических параметров.

Ключевые слова: нервно-мышечный аппарат, рефлекторная возбудимость альфа-мотонейроны скелетных мышц, бегуны-спринтеры, электронейромиографическое тестирование.

Введение. Взаимодействие нервного и моторных звеньев рефлекторной дуги двигательных рефлексов определяет в конечном итоге успешность выполнения моторного задания с одной стороны, а с другой – рассогласованность их деятельности или изменения в трофике и функциональном состоянии нейронов и мышечных волокон могут свидетельствовать о развитии нарушений и патологий. Следовательно, оценка текущего функционального состояния нервно-мышечного аппарата рабочих мышц спортсменов является актуальным вопросом в рамках эффективного управления тренировочным процессом.

Традиционно функциональное состояние нейромоторного аппарата определяют по уровню рефлекторной возбудимости альфа-мотонейронов скелетных мышц [3; 4]. Многие специалисты указывают, что параметры Н-рефлекса имеет смысл использовать в качестве интегративного теста, отражающего функциональное состояние спинальных структур [1; 3]. Н-рефлекс в норме у взрослых определяется в мышцах голени при стимуляции *musculus tibialis* в подколенной ямке. В нашем исследовании возникла необходимость использования метода, обеспечивающего изучение моносинаптических рефлексов во множестве мышц одновременно. Техника регистрации моносинаптических ответов, предложенная G. Courtine и соавторами [8] отвечала основной задаче нашего исследования: мониторинг нейромоторного статуса легкоатлетов-бегунов в подготовительный и соревновательный периоды для контроля

функционального состояния локомоторных мышц.

Материал и методика. Для оценки нервно-мышечного статуса спортсменов использовали стимуляционную электронейромиографию. Регистрировали заднекорешковые двигательные ответы билатеральных мышц, эквивалентные моносинаптическому Н-рефлексу [8 – 10]. Определяли рефлекторную возбудимость альфа-мотонейронов *musculus rectus femoris*, *m. gastrocnemius caput mediale*, *m. tibialis anterior*, *m. soleus*. Выбор данных мышц и расположение электродов при тестировании обусловлен наибольшей их нагруженностью при реализации беговых движений, межмышечными взаимодействиями и характером композиционных соотношений двигательных единиц.

Биполярные электроды с межэлектродным расстоянием 2 см устанавливали на брюшках симметричных мышц нижних конечностей. Со стороны позвоночника позиционировали катод между позвонками на уровне T₁₁ и T₁₂, два анода располагали билатерально по передней поверхности подвздошных гребней. Отведение и вызов биопотенциалов скелетных мышц осуществляли с 8-ми каналов при одномоментной стимуляции с помощью комплекса «Мини-Электромиограф», предусматривающего обработку полученных данных по программе «Муо» АНО «Возвращение», Санкт-Петербург. Регистрировали пороги для каждой из исследуемых мышц, максимальную амплитуду и латентность заднекорешкового моносинаптического двигательного ответа.

В исследовании приняли участие бегуны-легкоатлеты, специализирующиеся в беге на короткие дистанции (n=8) в возрасте 19 – 22 лет. Тестирование проводилось сразу после восстановительного периода, повторно в середине подготовительного периода и перед тремя ответственными стартами. В годичном цикле подготовки квалифицированных спринтеров, участвующих в исследовании мы выбрали летний период, соответственно каждый из атлетов прошел 5 тестовых исследований. Исследование было одобрено комитетом по биоэтике ВЛГАФК и соответствовало «Декларации по этическому кодексу медико-биологических исследований на людях» (Хельсинки, 1964 г.).

Результаты и обсуждение. Известно, что Н-рефлекс *m. soleus* вызывается при электрической стимуляции Ia афферентов смешанного *m. tibialis*, которые моносинаптически возбуждают альфа-мотонейроны, что приводит к синхронизированному эфферентному залпу и сокращению соответствующей мышцы. Эти ответы *m. soleus* выявляются при активации общих нейрональных путей, при инициации возбуждения на различных участках чувствительной части рефлекторной дуги, имеют моносинаптическую природу, что согласуется с данными других авторов [3; 10].

При регулярном выполнении спортсменами циклических нагрузок происходят адаптивные изменения мышечных волокон, чувствительных и двигательных нейронов и улучшение взаимодействия нервного и моторных звеньев рефлекторной дуги двигательных рефлексов. Имеются сведения о повышении рефлекторной возбудимости альфа-мотонейронов *m. soleus* у

спортсменов различных видов и квалификации [5]. Кроме того, имеются сообщения о модуляции рефлекторной возбудимости альфа-мотонейронов и других мышечных волокон, которые наиболее задействованы при выполнении бегового шага [7]. Нами установлено, что пороги рефлекторных двигательных ответов тестируемых мышц нижней конечности в середине подготовительного периода имеют достоверные различия от данных, зафиксированных в начале подготовительного периода, и существенно отличаются от показателей, полученных во время соревновательного периода (табл. 1).

Анализ полученных данных показывает, что по мере приближения соревновательного периода, т.е. при достижении спортивной формы, пороги тестируемых мышц увеличиваются, особенно это характерно для тех мышц, в композиционном составе которых больше быстрых мышечных волокон. Необходимо учитывать, что в самом начале подготовительного периода спортсмены выполняют большой объем работы умеренной и большой мощности. Вероятно, именно с этим связано повышение активности низкороговых двигательных единиц при электрической активации их через чувствительные корешки спинного мозга, что проявляется снижением порога рефлекторной возбудимости альфа-мотонейронов.

Таблица 1

Пороги рефлекторных двигательных ответов мышц нижних конечностей бегунов-спринтеров, $M \pm m$ (мА)

Мышцы	Подготовительный период		Старты соревновательного периода		
	начало	середина	1	2	3
Левая конечность					
<i>m. soleus</i>	43,97±1,17	42,41±2,07**	48,92±1,89**	50,46±1,59**	48,87±1,87*
<i>m. tibialis anterior</i>	45,16±1,93	43,38±1,89**	46,97±1,85**	47,77±1,59**	46,94±1,67
<i>m. gastrocnemius</i>	46,13±2,37	44,44±2,24**	48,36±2,18**	48,99±2,13**	48,23±2,13*
<i>m. rectus femoris</i>	44,39±1,50	42,60±1,33**	48,00±1,28**	48,96±1,17**	47,34±1,56*
Правая конечность					
<i>m. soleus</i>	43,92±2,15	41,58±2,26**	48,53±1,82**	49,27±1,57**	47,89±1,92*
<i>m. tibialis anterior</i>	44,27±1,63	41,84±1,71**	47,37±1,68**	48,70±1,60**	47,16±1,93*
<i>m. gastrocnemius</i>	45,76±2,44	43,00±2,25**	48,46±2,20**	49,14±2,16**	48,00±2,24
<i>m. rectus femoris</i>	44,28±3,61	41,82±1,49**	48,08±1,28**	49,20±1,14**	47,23±1,56*

Примечание. Достоверность отличий от показателей начала подготовительного периода * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Для вызова первых рефлекторных ответов *m. soleus* левой конечности в середине периода подготовки требовалась меньшая на 3,6% сила стимула по сравнению с началом подготовительного периода. В период ответственных стартов ответ увеличился на 15,4% относительно данных второй регистрации и на 11,3% в сравнении с порогом начала периода подготовки. Описанная тенденция характерна для билатеральной *m. soleus* – снижение тестирующей

силы во второе тестирование на 5,3% и увеличение относительно первого тестирования на 14,3% и относительно середины подготовительного периода рост в соревновательном составил 10,5%.

Для левой *m. gastrocnemius caput mediale* величина порога в середине подготовительного периода при сопоставлении с его началом была на 3,7% меньше. В период ответственных стартов величина стимула увеличилась на 8,8%; а по сравнению с первым тестированием на 4,8%; для правой конечности отличия составляли 6,0, 12,7 и 5,9% соответственно.

Порог для активации левой *m. tibialis anterior* в середине подготовительного периода уменьшился на 3,9%; в период ответственных стартов величина стимула была на 8,3% больше, в сравнении с началом периода подготовки 4,0%. Для мышц правой конечности снижение пороговой стимуляции составило 5,5%, в сравнении с данными первой регистрации, а последующее увеличение 5,9%, разница поисковой силы стимуляции в начале подготовки и в начале соревновательного периода – 13,2%.

Отмечается достоверное понижение силы стимуляции необходимой для появления первых рефлекторных двигательных ответов *m. rectus femoris* в середине подготовительного периода на 4,0% для левой и для правой на 5,6%; с последующим увеличением на 8,1% и на 8,6% для билатеральных мышц соответственно, относительно данных, зарегистрированных в начале периода подготовки. Спортсмены участвовали в трех ответственных стартах. Важно отметить, что из трех стартов практически все спортсмены (n=7) показали свои лучшие результаты на вторых соревнованиях, пороги, зарегистрированные именно после второго старта являются самыми высокими.

Величина максимальной амплитуды рефлекторного моторного ответа тестируемых мышц нижних конечностей у легкоатлетов была несколько ниже в середине подготовительного периода, по сравнению с его началом, но спустя два месяца – перед ответственными стартами амплитуда увеличилась (табл. 2). Амплитуда рефлекторных моторных ответов *m. soleus* левой и правой конечности снизилась к середине периода подготовки на 7,5 и 13,7% относительно показателей первого тестирования, а к соревнованиям амплитуда ответов левой мышцы увеличилась на 5,4%, а по отношению к началу периода подготовки лишь на 2,6%, для симметричной *m. soleus* увеличение составило 20,7 и 4,2% в соответствующие моменты исследования.

Амплитуда левой *m. tibialis anterior* к периоду ответственных стартов увеличилась на 50,9% относительно второй регистрации и на 23,9% от начала подготовительного периода. Для симметричной мышцы увеличение амплитуды составило 20 и 13,9% в соответствующие моменты тестирования.

Для *m. gastrocnemius caput mediale* увеличение амплитуды рефлекторного мышечного ответа за весь период подготовки составило 46,2%, а за вторую половину 55,9%, что связано с некоторым падением величины амплитуды рефлекторного моторного ответа мышцы. С увеличением дозы фенилэфрина и клонидина разница в их прессорном действии значительно уменьшается. При дозе 2 мкг/кг фенилэфрин в 5 раз более сильно сужал артерии, чем клонидин (по сравнению с контрольной группой), а при дозе 50 мкг/кг прессорное преимущество фенилэфрина составило 1,53 раза.

Для латеральной мышцы характерны те же количественные и качественные изменения исследуемого параметра. При сравнении значений первого и второго тестирования выявлено снижение амплитуды на 6,9%, с последующим ростом на 60,9%, однако увеличение с начала подготовительного периода несколько меньше – 49,8%.

Таблица 2

Амплитуда рефлекторных двигательных ответов мышц нижних конечностей бегунов-спринтеров, $M \pm m$ (мВ)

Мышцы	Подготовительный период		Старты соревновательного периода		
	начало	середина	1	2	3
Левая конечность					
<i>m. soleus</i>	7,06±0,47	6,53±0,39	6,88±0,36	8,08±0,35**	6,87±0,38
<i>m. tibialis anterior</i>	0,67±0,08	0,55±0,07*	0,83±0,06*	1,01±0,04**	0,92±0,07*
<i>m. gastrocnemius</i>	2,90±0,44	2,72±0,32	4,24±0,53**	6,16±0,49**	4,83±0,68**
<i>m. rectus femoris</i>	1,68±0,24	1,61±0,23	2,47±0,26**	2,82±0,20**	2,02±0,20
Правая конечность					
<i>m. soleus</i>	6,26±0,41	5,40±0,39**	6,52±0,38	8,13±0,50*	6,64±0,33
<i>m. tibialis anterior</i>	0,79±0,11	0,75±0,11	0,90±0,09	1,10±0,10**	0,79±0,07
<i>m. gastrocnemius</i>	3,21±0,40	2,99±0,37	4,81±0,49**	6,51±0,44**	5,59±0,35**
<i>m. rectus femoris</i>	1,70±0,34	1,64±0,31	2,32±0,34**	2,87±0,48**	2,31±0,37

Примечание. Достоверность отличий от показателей начала подготовительного периода * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

К середине подготовительного периода амплитуда рефлекторного моторного ответа мышц *m. rectus femoris* левой конечности снизилась на 4,2, а правой на 3,5%. К моменту начала соревнований амплитуда левой *m. rectus femoris* увеличилась на 47,0 и на 36,5% правой по сравнению с параметрами начала подготовки.

Отмеченная ранее особенность модуляции порогов в подготовительном и соревновательном периодах поддерживается выявленными закономерностями изменений амплитуды рефлекторных двигательных ответов в те же моменты тестирования. Активность альфа-мотонейронов, инициируемая электрической стимуляцией через чувствительные корешки спинного мозга, увеличивается в период выполнения нагрузок максимальной мощности и наблюдается снижение электрической активности при работе меньшей мощности, но большего объема. Выявленная закономерность характерна для двигательных нейронов, которые реагируют как на пороговую силу стимуляции, так и альфа-мотонейронов, электрическая активность которых формирует максимальный по вольтажности ответ.

Латентность рефлекторных ответов тестируемых мышц несколько

снижается к моменту начала соревновательного периода, однако эти изменения не достоверны ($p > 0,05$) и составляют менее 1% (табл. 3), при этом указанная тенденция была обнаружена у всех участников исследования. Можем полагать, что данная закономерность свидетельствует о некотором увеличении скорости прохождения электрического импульса по моносинаптической нервной дуге, мышц, регулярно вовлекаемых в напряженную двигательную деятельность. Это можно утверждать, так как за период проведения обследований контингент не поменялся, кроме того, их рост не претерпел изменений.

Таблица 3
Латентный период рефлекторных двигательных ответов мышц нижних конечностей бегунов-спринтеров, $M \pm m$ (мс)

Мышцы	Подготовительный период		Старты соревновательного периода		
	начало	середина	1	2	3
Левая конечность					
<i>m. soleus</i>	19,28±0,22	19,18±0,18	19,13±0,20	19,22±0,18	19,31±0,20
<i>m. tibialis anterior</i>	18,34±0,16	18,29±0,15	18,16±0,19	18,17±0,14	18,22±0,15
<i>m. gastrocnemius</i>	17,94±0,21	17,87±0,16	17,93±0,23	18,81±0,21	17,98±0,19
<i>m. rectus femoris</i>	16,02±0,22	15,77±0,21	15,72±0,21	15,82±0,33	15,64±0,23
Правая конечность					
<i>m. soleus</i>	19,09±0,21	19,12±0,20	19,11±0,18	19,21±0,18	19,24±0,20
<i>m. tibialis anterior</i>	18,43±0,22	18,21±0,15	18,18±0,17	18,24±0,14	18,20±0,14
<i>m. gastrocnemius</i>	17,88±0,21	17,79±0,18	17,19±0,18	17,89±0,21	17,86±0,22
<i>m. rectus femoris</i>	15,82±0,21	15,62±0,17	15,82±0,12	15,68±0,19	15,89±0,25

Модуляция рефлекторной возбудимости альфа-мотонейронов мышц *gastrocnemius caput mediale* выражена в большей степени, чем рефлекторная активность *m. soleus*, что можно объяснить функциональными особенностями и композицией этих мышц. Мышца *soleus* выполняет важную поструральную роль и рекрутируется во время медленных движений [2], тогда как *gastrocnemius caput mediale* активна в фазической фазе движений [6], соответственно в составе мышечных волокон *m. soleus* больше медленных волокон, чем в *m. gastrocnemius caput mediale*. Изменение рефлекторной возбудимости мышц происходит в рамках адаптации нервно-мышечной системы к систематическому выполнению скоростных и скоростно-силовых тренировочных нагрузок, в результате этого у квалифицированных спортсменов наблюдаются характерные признаки изменений при искусственной электрической стимуляции нагружаемых мышц.

При выполнении мощных скоростных и скоростно-силовых усилий в естественных условиях мышечной деятельности и при повышении силы

электрической стимуляции в рамках эксперимента происходит активация или большего числа двигательных единиц, или единиц, имеющих более высокий порог включения, или же и то и другое одновременно. Поэтому, мы полагаем, описание этих механизмов правомерно при объяснении модуляции рефлекторной возбудимости альфа-мотонейронов тестируемых в исследовании мышц методом моносинаптического тестирования.

Результаты исследования функционального состояния нейромоторного звена двигательной системы посредством моносинаптического тестирования указывают на перестройки во взаимоотношениях между чувствительными, двигательными нейронами и мышечными волокнами, адаптивными изменениям со стороны супраспинальных структур, не исключают и трофических изменений нейронального и мышечного аппарата, которые влияют на функциональность двигательной рефлекторной дуги. Однако данный метод при изолированном его использовании не позволяет достоверно указать ведущее звено, ответственное за изменения возбудимости в дуге двигательного рефлекса.

Несмотря на выше сказанное, для тренерского состава на первое место выходит не детализация механизмов адаптации к специфическим нагрузкам, а сам факт улучшения взаимодействия нервных и мышечных структур при выполнении соревновательного упражнения. Контроль и своевременная корректировка тренировочных планов должны опираться на данные оценки функционального состояния систем, обеспечивающих высокий спортивный результат. Именно на решение такой задачи ориентировано моносинаптическое тестирование при электрической стимуляции чувствительных волокон ряда мышц, обеспечивающих эффективность соревновательной деятельности.

Проведенная корреляция между показателями результативности соревновательной деятельности спринтеров и амплитудой рефлекторных моторных ответов не позволила выявить достоверных взаимосвязей (табл. 4). Однако корреляционное исследование установило тесную взаимосвязь порога рефлекторных ответов мышечных голени и лучшим результатом, показанным во втором старте (табл. 5).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между амплитудой рефлекторных двигательных ответов мышц спринтеров и лучшим результатом соревнований сезона

Мышцы	Левая конечность	Достоверность	Правая конечность	Достоверность
<i>m. soleus</i>	-0,854	p<0,01	-0,878	p<0,001
<i>m. tibialis anterior</i>	-0,753	p<0,01	-0,705	p<0,01
<i>m. gastrocnemius caput mediale</i>	-0,764	p<0,001	-0,780	p<0,001
<i>m. rectus femoris</i>	-0,103	p>0,05	-0,209	p>0,05

Совокупность представленных изменений параметров моносинаптических рефлекторных моторных ответов под влиянием

циклических скоростно-силовых нагрузок в течение подготовительного и соревновательного периода подготовки квалифицированных доказывает адекватность использованного метода оценки нейромоторного статуса спринтеров. Это важно и для прогноза эффективности соревновательной деятельности и контроля дозы воздействия тренировочных и соревновательных нагрузок.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между величиной пороговой силы для вызова первых рефлекторных ответов мышц спортсменов и лучшим результатом соревнований сезона

Мышцы	Левая конечность	Достоверность	Правая конечность	Достоверность
<i>m. soleus</i>	-0,854	p<0,01	-0,878	p<0,001
<i>m. tibialis anterior</i>	-0,753	p<0,01	-0,705	p<0,01
<i>m. gastrocnemius caput mediale</i>	-0,764	p<0,001	-0,780	p<0,001
<i>m. rectus femoris</i>	-0,115	p>0,05	-0,115	p>0,05

Заключение. Регулярные мышечные нагрузки вызывают модуляцию возбудимости в рефлекторной дуге элементарных двигательных рефлексов, что обусловлено повышением электроактивности тех нейронов, которые испытывают большую функциональную активность, увеличением скорости внутриспинальной и нейромышечной передачи, а также трансформацию влияний различных отделов центральной нервной системы. Адаптивные процессы в нервно-мышечной системе направлены на усиление и координацию взаимодействий нейрональных и мышечных структур как единой функциональной системы. Выполнение спринтерских нагрузок вызывает изменение тех структур, от которых зависит эффективность соревновательной деятельности. Использованный метод регистрации рефлекторной возбудимости спинальных альфа-мотонейронов имеет адекватную чувствительность для оценки процессов адаптации нервно-моторного аппарата спринтеров и может быть рекомендован как дополнительный метод контроля специфичности нагрузок при подготовке бегунов-спринтеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенков Л.Р.* Функциональная диагностика нервных болезней: Руководство для врачей. М., 2004.
2. *Козловская И.Б.* Опорная афферентация в контроле тонической мышечной активности // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2004. Т. 90. №8. С. 418 – 419.
3. *Команцев В.Н.* Методические основы клинической электронейромиографии. СПб., 2001.
4. *Персон Р.С.* Спинальные механизмы управления мышечным сокращением. М., 1985.

5. *Andriyanova E., Povareshchenkova J., Petrov D.* Neurophysiological mechanisms of leg muscles efferents excitability control // Book of Abstracts of the 13th Annual Congress of the European College of Sport Science. Estoril – Portugal, 2008. P. 398 – 399.
6. *Burke R.E.* Motor units: anatomy, physiology, and functional organization // The Nervous system / Ed. V.B. Brooks: V. II. Motor control, Part 1. Bethesda, 1981. P. 345 – 422.
7. *Coh M., Tomazin K.* Biomechanical Characteristics of Female Sprinters During the Acceleration Phase and Maximum Speed Phas // Modern Athlete and Coach. 2005. V. 43(4). P. 3 – 9.
8. *Courtine G., Harkema S.J., Dy C.J., Gerasimenko Y.P., Dyhre-Poulsen P.* Modulation of multisegmental monosynaptic responses in a variety of leg muscles during walking and running in humans // J. Physiology. 2007. V. 582(3). P. 1125.
9. *Minassian K., Persy I., Rattay F., Dimitrijevic M.R., Hofer C., Kern H.* Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord // Muscle Nerve. 2007. V. 35(3). P. 327 – 336.
10. *Hofstoetter U.S., Minassian K., Hofer C., Mayr W., Rattay F., Dimitrijevic M.R.* Modification of Reflex Responses to Lumbar Posterior Root Stimulation by Motor Tasks in Healthy Subjects // Artificial Organs. 2008. V. 32(8). P. 644 – 648.

**MONOSYNAPTIC RESEARCH OF LOCOMOTOR MUSCLES
AS AN ADDITIONAL METHOD TO MONITOR
NEUROMOTOR STATUS OF ATHLETES**

**E.A. Mikhailova, A.A. Chelnokov,
A.V. Lapchenkov, J.A. Povareshchenkova**

Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports

The research analyses parameters of the dorsal root motor responses, evoked by a single electric stimulation at the T₁₁ – T₁₂ level of the spinal cord, registered during a 12 months' training cycle of runners-sprinters. It is established, that there is an interrelation between specificity of loadings of a 12 months' training cycle, reflex excitability parameters of the basic working muscles of the athletes and their sport results. Changes of the achieved level of the neuro-muscle apparatus functional condition are reflected in modulation of the electroneuromyographic parameters.

Key words: the neuro-muscle apparatus, reflex excitability of alpha-motorneurons of skeletal muscles, sprinters, the electroneuromyographic testing.