

ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯЦИИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ БЫСТРЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ НОГ ПРИ СПРИНТЕРСКОМ БЕГЕ ПО ПРЯМОЙ И ВИРАЖУ

И.В. Пискунов, С.А. Моисеев*, Р.М. Городничев**

*Великолукская государственная академия физической культуры и спорта
(Псковская область, г. Великие Луки)

Представлены результаты исследования электромиографической активности мышц ног при выполнении бега с максимальной скоростью по прямой и виражу. В эксперименте участвовали бегуны на короткие дистанции в возрасте 20–25 лет, имеющие спортивное звание кандидата в мастера спорта и первый разряд. В первой части эксперимента испытуемые выполняли бег с максимальной скоростью по прямой, во второй – по виражу. У них синхронно регистрировали кинематические и электромиографические характеристики бегового шага с помощью системы 3D-видеоанализа «Qualisys» (Швеция) и 16-канального биомонитора ME6000 (Финляндия). При беге по прямой в фазе отталкивания электромиографические параметры исследуемых мышц претерпевали существенные изменения в сравнении с фазой подседания: продолжительность их электроактивности снизилась; уменьшились амплитуда и частота биопотенциалов; в мышцах-антагонистах бедра понизился коэффициент реципрокности, в мышцах голени он, наоборот, увеличился. При беге по виражу в фазе отталкивания электромиографическая активность двуглавой мышцы бедра возросла – амплитуда биопотенциалов увеличилась на 72,1 % в сравнении с бегом по прямой; значительно повысились амплитуды электрической активности в наружной мышце бедра, камбаловидной и передней большеберцовой мышцах; коэффициент реципрокности в мышцах-антагонистах бедра в фазе отталкивания был меньше, чем при беге по прямой, в мышцах-антагонистах голени он, наоборот, увеличился. Таким образом, смена траектории движения в беге с максимальной скоростью сопровождается существенным изменением регуляторных механизмов, проявляющемся в модификации координационной структуры ведущих мышц, активность которых определяет соответствующие кинематические и динамические характеристики бегового шага.

Ключевые слова: электромиография мышц ног, координационная структура бегового шага, регуляция произвольных движений ног, спринтерский бег.

Ответственный за переписку: Моисеев Сергей Александрович, адрес: 182100, Псковская обл., г. Великие Луки, пл. Юбилейная, д. 4; e-mail: siranovl@yandex.ru

Для цитирования: Пискунов И.В., Моисеев С.А., Городничев Р.М. Электромиографическое исследование регуляции произвольных быстрых циклических движений ног при спринтерском беге по прямой и виражу // Журн. мед.-биол. исследований. 2017. Т. 5, № 2. С. 5–12. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2017.5.2.5

Электрические явления в скелетных мышцах рассматриваются как неотъемлемая часть физиологических процессов, лежащих в основе регуляции произвольных движений человека [1, 2]. Во многих работах по изучению механизмов управления движениями используется методика регистрации электрической активности скелетных мышц, обеспечивающих выполнение модельного двигательного действия [3–5]. Такой методический подход позволяет не только установить координационную структуру изучаемого произвольного движения, но и косвенно оценить величину усилий, развиваемых рабочими мышцами [6]. В большинстве исследований в качестве модельного произвольного движения изучались локомоции [7–10]. В этих работах получены данные о характеристиках электрической активности мышц, обеспечивающих выполнение ходьбы и бега с умеренной и средней скоростью по прямой, приводятся сведения о порядке активации рабочих мышц, проявлении устойчивого взаимодействия мышечных групп, обслуживающих группы функционально связанных суставов, а также о взаимодействии мышц-антагонистов верхних и нижних конечностей.

Мы предположили, что циклические движения, выполняемые с максимальной скоростью, при изменении их траектории имеют существенные отличия в координационной структуре и показателях биоэлектроактивности скелетных мышц в сравнении с бегом по прямой. В связи с этим цель нашего исследования состояла в изучении особенностей регуляции быстрых произвольных циклических движений ног при смене траектории бега по данным электромиографии.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием материально-технической базы Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры Великолукской государственной академии физической культуры и спорта (ВЛГАФК) в специализированном зале легкой атлетики. В эксперименте приняли участие 7 спортсменов 20–25 лет, имеющих спортивное звание кандидата в мастера спорта и

первый взрослый разряд, занимающихся бегом на короткие дистанции. Стаж спортивной деятельности бегунов – от 4 до 10 лет. В соответствии с принципами Всемирной Медицинской Ассоциации «Этические принципы проведения медицинских исследований с участием человека в качестве субъекта» были получены информированное письменное согласие испытуемых на участие в экспериментах и разрешение комитета по этике ВЛГАФК на проведение исследований.

В качестве модели циклической двигательной активности использовался бег с максимальной скоростью. В первой части эксперимента испытуемые выполняли бег по прямой, во второй части – по виражу. В каждом случае регистрировались три попытки с интервалами отдыха между ними до полного восстановления. Исследования проводились после предварительной разминки. Во время бега синхронно регистрировались кинематические и электромиографические параметры.

Для регистрации кинематических параметров бегового шага использовалась система 3D-видеозахвата («Qualisys», Швеция). Светоотражающие маркеры были прикреплены к антропометрическим точкам сегментов тела, совпадающим с осями вращения в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах. 3D-видеоанализ позволил определить граничные моменты и разделить беговой шаг на периоды полета и опоры. Период полета по граничным моментам был разделен на две фазы – разведение стоп в полете и сведение стоп в полете, период опоры – на подседание и отталкивание.

Отведение и регистрация биопотенциалов скелетных мышц осуществлялись по общепринятой методике [11], с помощью современного 16-канального биомонитора ME6000 (Финляндия). Обработка полученных данных осуществлялась в специализированной программе «MegaWin» (Финляндия). Во время бега регистрировалась электрическая активность билатеральных мышц бедра – двуглавой (ДБ), прямой (ПБ), внутренней (ВБ) и наружной (НБ), а также голени – камбаловидной (КМ) и передней большеберцовой (ПБМ). Анализировались

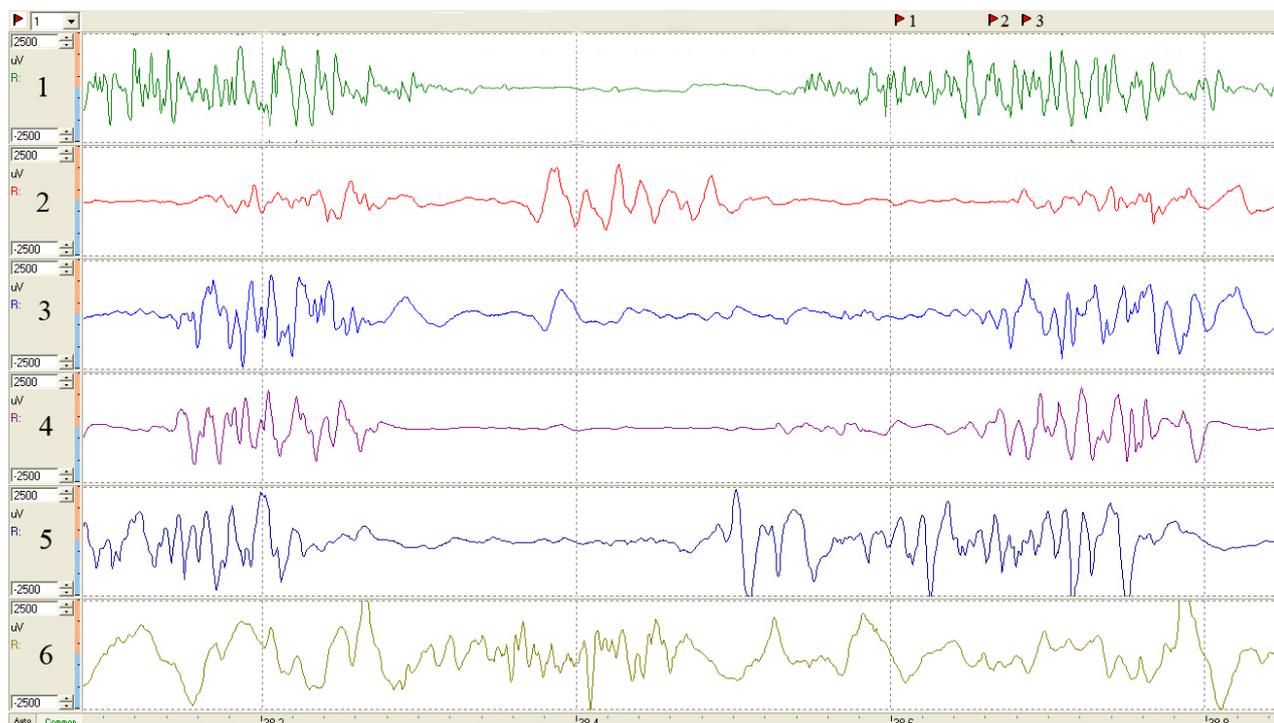
следующие параметры электромиограмм (ЭМГ): длительность электроактивности, средняя амплитуда, частота следования биопотенциалов.

Поскольку объем статьи не позволяет глубоко и детально рассмотреть все фазы бегового шага, в данной статье приводится описание электромиографических характеристик бега с максимальной скоростью по прямой и выражу только в опорный период для левой ноги в фазах подседания и отталкивания.

Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи пакетов программ «Microsoft Excel 2007» и «Statistica 10.0». Вычислялись следующие статистические параметры: среднее арифметическое (M), ошибка среднего арифметического (m); рассчитывался коэффициент реципрокности – как отношение амплитуды ЭМГ антагониста к амплитуде ЭМГ агониста, выраженное в процентах [11]. Значимость различий определялась с помощью

непараметрического критерия Вилкоксона для парных сравнений (критический уровень значимости $p < 0,05$).

Результаты. До начала основного эксперимента была зарегистрирована электрическая активность 23 билатеральных скелетных мышц, которые, по имеющимся в литературе сведениям [9], предположительно могли обеспечивать выполнение бега с максимальной скоростью и изменением его траектории. Анализ параметров зарегистрированных ЭМГ позволил выявить 6 мышц, наиболее задействованных в осуществлении быстрого бега: ДБ, ПБ, ВБ, НБ, КМ, ПБМ. В этих скелетных мышцах, которые мы условно называем ведущими, во время бега по прямой и выражу наблюдались значительные изменения амплитуды и частоты электрической активности. Типичный пример записи ЭМГ 6 ведущих мышц при беге представлен на рисунке.



Электромиограммы мышц голени и бедра левой ноги спортсменов-бегунов во время бега с максимальной скоростью по прямой: 1 – камбаловидной; 2 – передней большеберцовой; 3 – двуглавой бедра; 4 – прямой бедра; 5 – внутренней бедра; 6 – наружной бедра (маркер 1–2 – подседание, маркер 2–3 – отталкивание)

Активность ведущих мышц (*табл. 1*) существенно превышала параметры ЭМГ, зарегистрированные у других исследуемых скелетных мышц. Следовательно, ведущие мышцы развивали и более значительную силу в сравнении с остальными.

значение амплитуды ЭМГ отмечалось в ПБМ (191,9 мкВ).

Реципрокные взаимоотношения мышц-антагонистов бедра и голени имели некоторые особенности. Коэффициент реципрокности в фазе подседания был значительно меньше

Таблица 1

**ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ВЕДУЩИХ МЫШЦ
У СПОРТСМЕНОВ-БЕГУНОВ ПРИ БЕГЕ С МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ ($M \pm m, n = 7$)**

Мышца	Бег по прямой		Бег по виражу	
	подседание	отталкивание	подседание	отталкивание
<i>Длительность ЭМГ-активности, мс</i>				
Двуглавая бедра	67,2±4,9	40,1±3,9*	68,9±5,2	47,5±5,3*
Прямая бедра	65,1±5,8	40,6±4,1*	59,4±6,8	34,4±5,2*
Внутренняя бедра	65,1±4,5	32,5±4,2*	64,4±6,5	36,3±5,6*
Наружная бедра	61,1±5,7	30,1±4,1*	68,3±5,7	36,3±5,8*
Камбаловидная	68,9±4,4	45,1±2,8*	68,3±5,7	50,6±4,2*
Передняя большеберцовая	52,7±6,1	34,4±4,5	58,7±6,1	45,7±4,9*
<i>Амплитуда ЭМГ-активности, мкВ</i>				
Двуглавая бедра	797,8±129,5	605,1±178,3*	991,6±170,2	1041,5±235,9
Прямая бедра	305,4±54,7	130,6±19,9*	254,8±36,2	147,4±32,0*
Внутренняя бедра	478,8±63,1	135,9±31,0*	363,3±43,6	138,9±34,9*
Наружная бедра	377,2±26,3	96,0±20,6*	354,0±43,2	137,7±26,2*,**
Камбаловидная	642,0±49,1	328,8±68,1*	123,7±53,8	358,5±72,2*,**
Передняя большеберцовая	191,9±35,0	158,7±33,5	549,7±40,4	197,0±27,1

Примечания: * – значимость отличий от значений в фазе подседания $p < 0,05$; ** – значимость отличий от значений в беге по прямой $p < 0,05$.

Биоэлектрическая активность ведущих мышц имела свои специфические особенности, отражающиеся в порядке активации исследуемых мышц, длительности электроактивности, значениях средней амплитуды и частоты биопотенциалов.

При беге по прямой в фазе подседания самая продолжительная электроактивность регистрировалась в КМ, наиболее короткая – в ПБМ. Амплитуда ЭМГ-активности ДБ в этой фазе была наибольшей (797,8 мкВ) и существенно превышала показатели мышц передней поверхности бедра. Наименьшее

у мышц-антагонистов голени, чем у мышц-антагонистов бедра (*табл. 2*).

В фазе отталкивания параметры ЭМГ исследуемых мышц претерпевали существенные изменения в сравнении с предшествующей фазой: продолжительность их электроактивности снизилась; уменьшились амплитуда и частота биопотенциалов; в мышцах-антагонистах бедра понизился коэффициент реципрокности, в мышцах-антагонистах голени он, наоборот, увеличился.

Как следует из анализа данных, приведенных в *табл. 1*, при беге с максимальной ско-

Таблица 2

**КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕЦИПРОКНОСТИ (%) МЫШЦ-АНТАГОНИСТОВ БЕДРА И ГОЛЕНИ
У СПОРТСМЕНОВ-БЕГУНОВ ПРИ БЕГЕ С МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ ($M \pm m, n = 7$)**

Мышцы-антагонисты	Бег по прямой		Бег по виражу	
	подседание	отталкивание	подседание	отталкивание
Прямая бедра – двуглавая бедра	38,2±5,2	21,5±1,9*	25,7±5,3	14,2±5,4*
Внутренняя бедра – двуглавая бедра	60,0±5,3	22,4±3,1*	36,6±5,3	13,3±6,9
Наружная бедра – двуглавая бедра	47,2±6,3	15,8±5,2*	35,7±5,8	13,3±4,4*
Передняя большеберцовая – камбаловидная	29,9±4,8	48,2±5,1	35,5±5,1	55,0±6,1

Примечание: * – значимость отличий от значений в фазе подседания $p < 0,05$.

ростью со сменой траектории происходит модификация координационной структуры взаимодействующих мышц, особенно в фазе отталкивания. Длительность ЭМГ-активности в фазе подседания возросла в НБ и ПБМ по сравнению с бегом по прямой, уменьшилась в ПБ и осталась практически на прежнем уровне в других мышцах. В фазе отталкивания продолжительность активности увеличилась во всех мышцах за исключением ПБ, у которой период активности сократился на 15,3 %. Наибольшая амплитуда ЭМГ в фазе подседания регистрировалась в ДБ: она на 24,3 % превышала среднегрупповое значение при беге по прямой. Амплитуды ЭМГ-активности ВБ и КМ, напротив, значимо уменьшились. В других мышцах статистически значимых различий по амплитуде не отмечалось. Коэффициент реципрокности снизился во всех мышцах-антагонистах бедра, а в мышцах-антагонистах голени – увеличился (табл. 2).

В фазе отталкивания при беге по виражу ЭМГ-активность ДБ возросла в еще большей степени и превысила соответствующие значения при беге по прямой на 72,1 %. Значительно увеличилась амплитуда электрической активности в НБ, КМ и ПБМ. Коэффициент реципрокности в мышцах-антагонистах бедра в данной фазе был меньше, чем при беге по прямой, в мышцах-антагонистах голени он, наоборот, увеличился.

Обсуждение. Полученные экспериментальные факты о более продолжительной электрической активности и ее высокой амплитуде в подавляющем большинстве мышц в фазе подседания при беге по прямой и виражу в сравнении со значениями этих параметров в фазе отталкивания можно объяснить особенностями координационной структуры активности мышц во время периода опоры. В фазе подседания ведущие мышцы работают в уступающем режиме и обеспечивают оптимальное положение центра масс тела для перехода к фазе отталкивания [12]. Значительная электрическая активность в таких условиях требуется для обеспечения необходимых характеристик двигательного действия в период опоры.

При рассмотрении возможных причин более высоких амплитуд ЭМГ-активности ДБ, НБ, КМ и ПБМ в фазе отталкивания при беге по виражу в сравнении с бегом по прямой необходимо указать на следующие обстоятельства. В процессе выполнения бегового шага по виражу на спринтера действует продольная компонента центробежной силы, прижимающая его к опорной поверхности [13, 14]. Для преодоления такого воздействия требуется активация большего количества двигательных единиц названных выше мышц, которые в конечном итоге развивают более значительное по величине усилие, чем при беге по прямой, и тем са-

мым обеспечивают выполнение отталкивания от опоры с необходимыми кинематическими и динамическими характеристиками. Одновременное увеличение амплитуды и частоты биопотенциалов этих мышц свидетельствует о том, что в данном случае дополнительно активируются двигательные единицы, относящиеся к типу быстрых, малоутомляемых.

Полученные в работе результаты об особенностях биоэлектрической активности скелетных мышц ног при беге с максимальной скоростью и изменением его траектории могут быть использованы при подборе специальных упражнений для тренировочного процесса бегунов на короткие дистанции, направленного на повышение их технической подготовленности.

Список литературы

1. Николлс Дж.Г., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П. От нейрона к мозгу / пер. с англ. М., 2008. 672 с.
2. Грибанов А.В., Шерстенникова А.К. Физиологические механизмы регуляции пострального баланса человека (обзор) // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Мед.-биол. науки. 2013. № 4. С. 20–29.
3. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С., Казенников О.В., Селионов В.А. Существует ли генератор шагательных движений у человека? // Физиология человека. 1998. Т. 24, № 3. С. 42–50.
4. Gerasimenko Y., Gad P., Sayenko D., McKinney Z., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Shigueva T., Tomilovskaya E., Kozlovskaya I., Edgerton V.R. Integration of Sensory, Spinal, and Volitional Descending Inputs in Regulation of Human Locomotion // J. Neurophysiol. 2016. Vol. 116, № 1. P. 98–105.
5. Paradisis G., Cooke C., Bissas A. Electromyographic Activity During Sprinting on Horizontal, Uphill and Downhill Surfaces // Crossing Borders Through Sport Science: 21st Annual Congress of the European College of Sport Science. Vienna, 2016.
6. Городничев Р.М., Шляхтов В.Н. Физиология силы: моногр. М., 2016. 232 с.
7. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. М., 1990. 495 с.
8. Персон Р.С. Теоретические основы трактовки электромиограммы // Физиология человека. 1987. Т. 13, № 4. С. 659–673.
9. Бальсевич В.К. Онтокинезиология человека. М., 2000. 275 с.
10. Михайлова Е.А., Козлов В.А., Ершов В.Ю., Городничев Р.М. Повышение эффективности маховых движений при беге посредством чрескожной электрической стимуляции спинного мозга // Теория и практика физ. культуры. 2015. № 6. С. 29–32.
11. Команцев В.Н., Заболотных В.А. Методические основы клинической электронейромиографии. СПб., 2001. 350 с.
12. Foss M.L., Keteyian S.J. Physiological Basis for Exercise and Sport. Boston, 1998. 620 p.
13. Озолин Э.С. Спринтерский бег. М., 2010. 176 с.
14. Доронина Е.А., Немцев О.Б. Об эффективности различных способов постановки стопы на опору в спринтерском беге // Уч. зап. ун-та им. П.Ф. Лесгафта. 2007. № 10(32). С. 60–62.

References

1. Nicholls J.G., Martin A.R., Wallace B.G., Fuchs P.A. *From Neuron to Brain*. Sunderland, 2001 (Russ. ed.: Nikollс Dzh.G., Martin R., Vallas B., Fuks P. *Ot neyrona k mozgu*. Moscow, 2008. 672 p.).
2. Griбанov A.V., Sherstennikova A.K. Fiziologicheskie mekhanizmy regulyatsii postural'nogo balansa cheloveka (obzor) [Physiological Mechanisms of Human Postural Balance Regulation (Review)]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Mediko-biologicheskie nauki*, 2013, no. 4, pp. 20–29.

3. Gurfinkel' V.S., Levik Yu.S., Kazennikov O.V., Selionov V.A. Sushchestvuet li generator shagatel'nykh dvizheniy u cheloveka? [Is There a Generator of Walking Movements in Humans?]. *Fiziologiya cheloveka*, 1998, vol. 24, no. 3, pp. 42–50.
4. Gerasimenko Y., Gad P., Sayenko D., McKinney Z., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Shigueva T., Tomilovskaya E., Kozlovskaya I., Edgerton V.R. Integration of Sensory, Spinal, and Volitional Descending Inputs in Regulation of Human Locomotion. *J. Neurophysiol.*, 2016, vol. 116, no. 1, pp. 98–105.
5. Paradisis G., Cooke C., Bissas A. Electromyographic Activity During Sprinting on Horizontal, Uphill and Downhill Surfaces. *Crossing Borders Through Sport Science: 21st Annual Congress of the European College of Sport Science*. Vienna, 2016.
6. Gorodnichev R.M., Shlyakhtov V.N. *Fiziologiya sily* [The Physiology of Strength]. Moscow, 2016. 232 p.
7. Bernshteyn N.A. *Fiziologiya dvizheniy i aktivnost'* [The Physiology of Movements and Activity]. Moscow, 1990. 495 p.
8. Person R.S. Teoreticheskie osnovy traktovki elektromiogrammy [Theoretical Basis of Electromyogram Interpretation]. *Fiziologiya cheloveka*, 1987, vol. 13, no. 4, pp. 659–673.
9. Bal'sevich V.K. *Ontokineziologiya cheloveka* [Human Ontological Kinesiology]. Moscow, 2000. 275 p.
10. Mikhaylova E.A., Kozlov V.A., Ershov V.Yu., Gorodnichev R.M. Enhancement of Efficiency of Flapping When Running via Percutaneous Electrical Stimulation of Spinal Cord. *Theory Pract. Phys. Cult.*, 2015, no. 6, pp. 10–15.
11. Komantsev V.N., Zabolotnykh V.A. *Metodicheskie osnovy klinicheskoy elektroneuromiografii* [Methodological Basis of Clinical Electroneuromyography]. St. Petersburg, 2001. 350 p.
12. Foss M.L., Keteyian S.J. *Physiological Basis for Exercise and Sport*. Boston, 1998. 620 p.
13. Ozolin E.S. *Sprinterskiy beg* [Sprint]. Moscow, 2010. 176 p.
14. Doronina E.A., Nemtsev O.B. Ob effektivnosti razlichnykh sposobov postanovki stopy na oporu v sprinterskom bege [On the Efficiency of Various Ways of Placing the Foot on the Block in Sprinting]. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta*, 2007, no. 10, pp. 60–62.

DOI: 10.17238/issn2542-1298.2017.5.2.5

Ivan V. Piskunov*, Sergey A. Moiseev*, Ruslan M. Gorodnichev*

*Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports
(Pskovskaya obl., Velikiye Luki, Russian Federation)

ELECTROMYOGRAPHIC ANALYSIS OF THE REGULATION OF FAST VOLUNTARY CYCLIC LEG MOVEMENTS DURING STRAIGHT-LINE AND CURVE SPRINTING

This paper studied the electromyographic (EMG) leg muscle activity during straight-line and curve running at a maximum speed. The research involved sprinters aged 20–25 years with the ranks of the Candidate for Master of Sport and First-Class Sportsman. In the first part of the study, the subjects performed maximum-speed running in a straight line; the second part involved curve running. Kinematic and EMG characteristics of the running step were recorded simultaneously using 3D video analysis system Qualisys (Sweden) and 16-channel biomonitor ME 6000 (Finland). During straight-line running in the repulsion phase the EMG parameters of the studied muscles changed significantly compared to the loading phase: the duration of their electroactivity decreased, the amplitude and frequency of their biopotentials decreased, the reciprocity coefficient decreased in antagonist muscles of the hip

and, on the contrary, increased in calf muscles. During curve running, in the repulsion phase the EMG activity of *biceps femoris* increased: the amplitude of the biopotentials increased by 72.1 % compared to running in a straight line; the EMG amplitude of *vastus lateralis*, *soleus*, and *tibialis anterior* muscles also increased significantly. In the repulsion phase, the reciprocity coefficient in antagonist muscles of the hip was smaller than that during straight-line running; while in antagonist muscles of the calf it, on the contrary, increased. Thus, the change of trajectory during maximum-speed running is accompanied by substantial changes in the regulatory mechanisms, manifested in the modification of the coordination structure of major muscles, the activity of which determines the corresponding kinematic and dynamic characteristics of the running step.

Keywords: *electromyography of leg muscles, running step coordinating structure, voluntary leg movement regulation, sprinting.*

Поступила 17.01.2017
Received 17 January 2017

Corresponding author: Sergey Moiseev, *address:* pl. Yubileynaya 4, Velikiye Luki, 182100, Pskovskaya obl., Russian Federation; *e-mail:* siranovl@yandex.ru

For citation: Piskunov I.V., Moiseev S.A., Gorodnichev R.M. Electromyographic Analysis of the Regulation of Fast Voluntary Cyclic Leg Movements During Straight-Line and Curve Sprinting. *Journal of Medical and Biological Research*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 5–12. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2017.5.2.5