

ФИЗИОЛОГИЯ

УДК УДК 612.763+612.743
DOI: 10.26456/vtbio340

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ МЫШЕЧНЫХ СИНЕРГИЙ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЛОКОМОЦИЙ*

С.А. Моисеев

¹Великолукская государственная академия физической культуры и спорта,
Великие Луки

Изучали особенности пространственно-временной структуры мышечных синергий при разбеге, беге по прямой и виражу с максимальной скоростью, а также при медленном беге по прямой. Синергии извлекали с применением факторного анализа по методу главных компонент. Установлено изменение степени вовлечения скелетных мышц в структуру всех выявленных синергий, затрагивающее, преимущественно, мышцы бедра. В управлении структурой цикла бегового шага в разных условиях оказываются задействованы одни и те же мышечные модули пространственная структура которых модифицируется при изменении условий реализации локомоций.

Ключевые слова: мышечные синергии, локомоция, факторный анализ, межмышечное взаимодействие.

Введение. Известно, что управление локомоциями человека может быть реализовано с применением механизма образования синергий, т.е. такой организации, при которой элементы управляемой системы образуют модули меньшей размерности, активируемые единым управляющим сигналом (Cheung, 2009; d'Avella, 2016). Структура таких образований может быть описана понятиями весовых коэффициентов и коэффициентов активации, получаемых при факторизации матриц, включающих различные характеристики моторного выхода движений, в том числе локомоций (Tresch, 2005; Kim, 2020). Управление мышечными синергиями при локомоторной активности может осуществляться на спинальном уровне с участием центральных генераторов паттернов. В этом случае синергия реализуется как моторная программа, определяющая попеременную активацию мышц флексоров и экстензоров в структуре цикла шага

* Финансирование осуществлено в рамках плановой работы ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта»

(Latash, 2021). Однако, почти всегда при рассмотрении локомоций наблюдается некоторая вариативность параметров синергий и выяснение ее природы является фундаментальной задачей физиологии движений. В работе предполагалось выяснить, являются ли сформированные синергии пластичными, способными модифицироваться в разных условиях локомоторной активности, или же они реализуются как запрограммированный процесс, имеющий ограничения в отношении количества используемых элементов двигательной системы и их временной организации. В связи с этим цель работы заключалась в изучении пространственной и временной структуры синергий, организованных на мышечном уровне, в условиях бега с разной интенсивностью и с изменением его направления.

Методика. В исследованиях приняли участие 12 спортсменов в возрасте от 21 до 24 лет, специализирующихся в беге на короткие дистанции. Все эксперименты проведены с соблюдением требований и принципов биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинской декларации 1964 г., и одобрены локальным биоэтическим комитетом. Каждый участник представил добровольное письменное информированное согласие на участие в исследованиях.

Моделировали следующие условия локомоторной активности: разбег, медленный бег, бег с максимальной скоростью при движении по прямой и виражу. В каждом экспериментальном условии обрабатывали 10 полных циклов шага в пяти попытках, выполняемых последовательно каждым испытуемым с интервалом отдыха 5 минут между ними. Исследования проводились в специализированном зале для занятий легкой атлетикой Великолукской государственной академии физической культуры и спорта.

Во время бега регистрировали электромиограммы (ЭМГ) шестнадцати билатеральных поверхностных мышц верхних и нижних конечностей: камбаловидной (SOL), передней большеберцовой (TA), прямой бедра (BF), двуглавой бедра (RF), медиальной широкой бедра (VM), латеральной широкой бедра (VL), передних пучков дельтовидной (DELTP), задних пучков дельтовидной (DELTA). ЭМГ регистрировали при помощи 16-и канального биомонитора ME6000 (Финляндия). Синхронно осуществляли 3D-видеозахват движений антропометрических точек нижних конечностей: вертельной, верхнеберцовой, нижеберцовой, конечной, применяли систему Qualisys (Швеция). Частота дискретизации ЭМГ составляла 2000 Гц, а видеоряда – 500 Гц. Полученные вариационные ряды ЭМГ и координаты названных точек экспортировали в систему Statistica 10.0 (США), где формировали матрицу исходных данных, включающую динамические вариационные ряды ЭМГ 16 скелетных мышц и антропометрических точек для 10 полных циклов бегового шага в

каждом экспериментальном условии для каждого испытуемого. Разложение матриц выполняли с помощью факторного анализа по методу главных компонент.

В системе Statistica формировали матрицу исходных данных (X), размерностью ($I \times J$), где I – число отсчетов (мгновенных измерений), а J – число независимых переменных. Переменными являлись вариационные ряды ЭМГ и координаты антропометрических точек (Moiseev, 2022). Исходная матрица X разлагалась на произведение двух матриц: $X = T \times P + E$, где T – матрица счетов, P – матрица нагрузок, E – матрица остатков. Рассматривали компоненты – мышечные синергии (МС), имеющие собственные значения больше единицы и учитывающие не менее 5% общей дисперсии. Анализировали количество извлекаемых компонент, процент общей дисперсии (VAF), весовые коэффициенты и коэффициенты активации. Сравнение коэффициентов выполняли с помощью дисперсионного (ANOVA) и кросскорреляционного анализа. Математико-статистическая обработка данных включала расчет среднего арифметического (M), ошибки среднего арифметического (SE), коэффициентов вариативности (CV).

Результаты и обсуждение. При разбеге количество извлекаемых синергий составляло четыре с долей объясняемой дисперсии в среднем по группе $89,25 \pm 1,03$. При беге по прямой и виражу с максимальной скоростью регистрировалось такое же количество синергий и лишь в условиях медленного бега было получено большее их количество – $4,50 \pm 0,28$ при объясняемой дисперсии, достигающей $91,00 \pm 1,47\%$.

Весовые коэффициенты мышц в структуре выделенных синергий представлены на рисунках 1 и 2. При реализации разбега первая синергия характеризовалась наибольшими весовыми коэффициентами следующих мышц: камбаловидной левой, двуглавой бедра правой и левой ноги, а также передних и задних пучков дельтовидной мышцы левой стороны. Вторая синергия демонстрировала высокое вовлечение камбаловидной мышцы левой, медиальной широкой обеих нижних конечностей и латеральной широкой правой, весовые коэффициенты данных мышц превышали $0,71 \pm 0,04$ в среднем по группе. Вариативность вовлечения данных мышц в синергию оценивалась как низкая, CV не превышали $33,86\%$, а в некоторых случаях она была очень низкой, например для латеральной широкой – $4,18\%$. Третий фактор демонстрировал, преимущественно, средние весовые коэффициенты большинства мышц, среди которых можно выделить камбаловидную правой, переднюю большеберцовую левую, а также заднюю часть дельтовидной мышцы правой стороны. Здесь весовые коэффициенты имели сравнительно большие значения достигающие $0,68 \pm 0,05$, также

отмечена низкая вариативность – не более 23,55%. Четвертый фактор демонстрировал средние или высокие коэффициенты только для передних большеберцовых мышц обеих нижних конечностей – $0,79 \pm 0,08$ и $0,55 \pm 0,09$ соответственно, а CV данных мышц при оценке их включения в разных реализациях не превышали 33,17%.

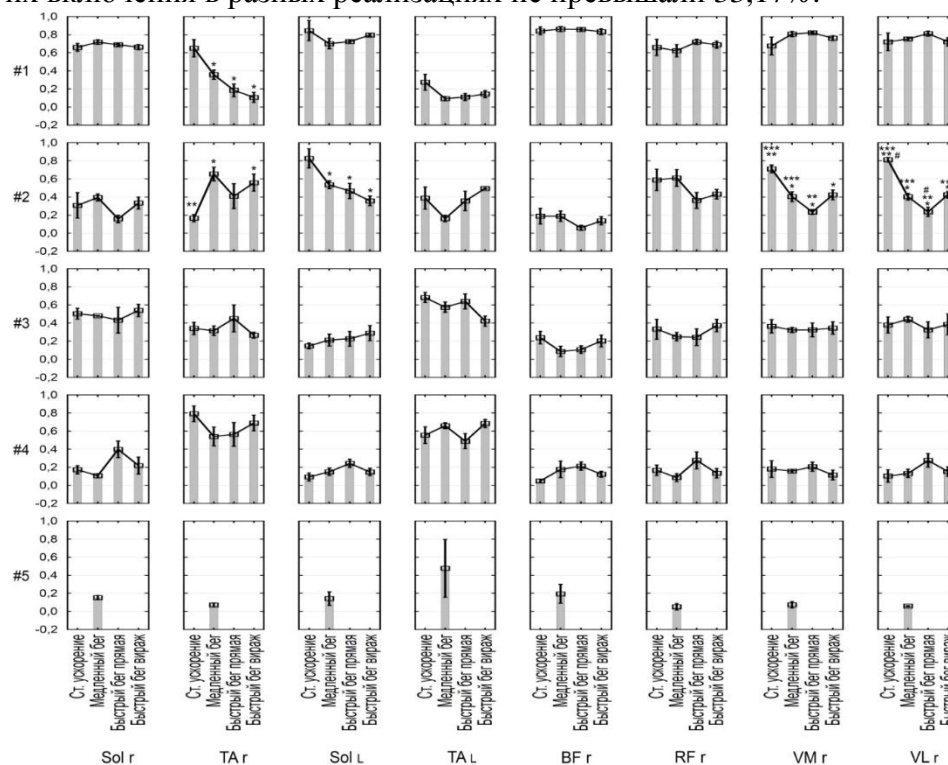


Рис. 1. Весовые коэффициенты скелетных мышц голени и бедра (правой стороны) в структуре выделенных факторов (синергий) при различных условиях локомоторной активности. #1,2,3,4,5 – номер фактора: по оси ординат – весовые коэффициенты. Данные на рисунке представлены в виде $M \pm m$. Статистически значимые различия относительно: * – разбега, ** – медленного бега, *** – быстрого бега по прямой, # – быстрого бега по вiraжу

В структуре первой мышечной синергии существенные различия весовых коэффициентов были обнаружены для передней большеберцовой мышцы правой ноги относительно всех рассматриваемых условий локомоций. Например, при реализации медленного бега коэффициенты достигали $0,35 \pm 0,05$, что существенно ниже, чем при стартовом ускорении ($P < 0,05$). При быстром беге по прямой и вiraжу также отмечены более низкие коэффициенты по отношению к таковым при стартовом ускорении. Аналогичная картина наблюдалась и с прямой мышцей бедра левой ноги, наблюдалось снижение ее вовлечение в первую синергию во всех условиях

локомоций по отношению к разбегу (рис. 2). Медиальная широкая мышца продемонстрировала снижение весовых коэффициентов при медленном беге, которые составляли в среднем по группе $0,66 \pm 0,05$, а вариативность оценивалась как низкая – не более 17,19%.

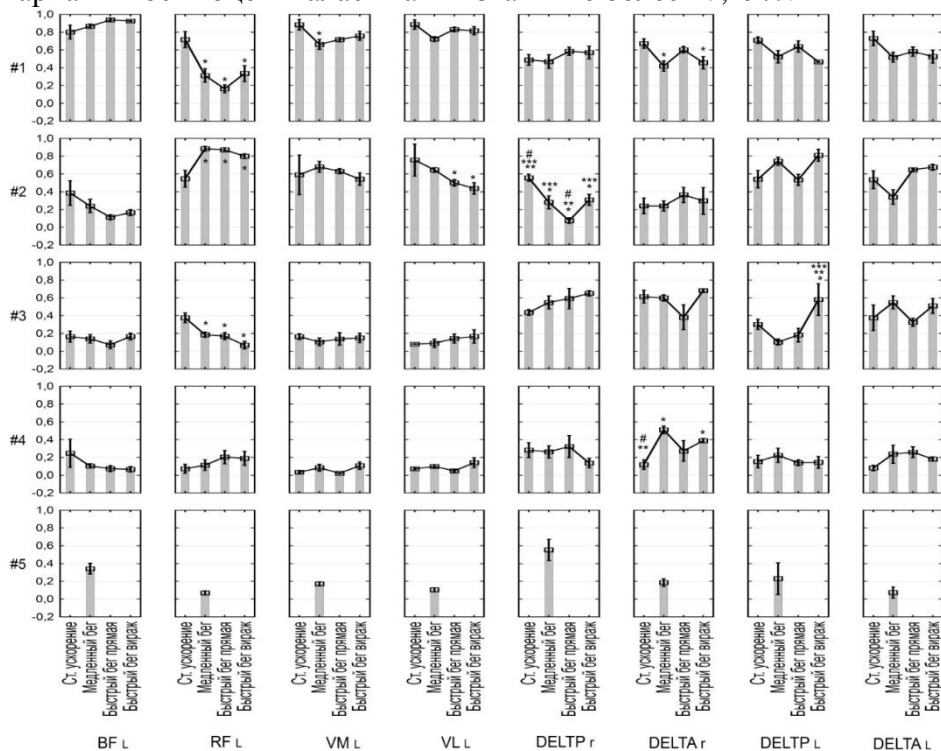


Рис. 2. Весовые коэффициенты скелетных мышц бедра (левой стороны) и верхних конечностей в структуре выделенных факторов (синергий) при различных условиях локомоторной активности.

#1,2,3,4,5 – номер фактора: по оси ординат – весовые коэффициенты. Данные на рисунке представлены в виде $M \pm m$. Статистически значимые различия относительно: * – разбега, ** – медленного бега, *** – быстрого бега по прямой, # – быстрого бега по виражу

Дельтовидная мышца (передние пучки) показывала достоверные различия весовых коэффициентов в условиях медленного бега и при беге по виражу ($P < 0,05$). В первом случае они достигали $0,41 \pm 0,05$ при вариативности 27,64% в среднем по группе, а во втором – $0,45 \pm 0,07$ ($CV = 31,18\%$). В других исследуемых мышцах различий весовых коэффициентов при разных условиях локомоций выявлено не было. Наиболее существенные изменения вовлечения мышц были обнаружены в структуре второй мышечной синергии. Так, передняя большеберцовая мышца правой ноги продемонстрировала существенно бóльшие весовые коэффициенты при медленном беге и при быстром беге по виражу. В первом случае они достигали $0,65 \pm 0,07$, а во втором

– $0,55 \pm 0,09$, вариативность в обоих случаях оценивалась как низкая. Камбаловидная мышца левой нижней конечности, наоборот, показывала снижение вовлечения по отношению к условиям бега при разбеге ($P < 0,05$). Наибольшие различия при сравнении коэффициентов в разных условиях бега были получены для медиальной и латеральной широкой мышц правой нижней конечности. Например, отмечалось статистически значимое их снижение до $0,40 \pm 0,05$ и $0,42 \pm 0,05$ по отношению к условиям при разбеге, где коэффициенты составляли $0,71 \pm 0,04$ и $0,81 \pm 0,02$ соответственно (рис. 1). Также во второй мышечной синергии было отмечено значимое возрастание вовлечения в ее структуру прямой бедра левой ноги, где весовые коэффициенты достигали $0,88 \pm 0,02$, а CV демонстрировали очень низкие значения – не более 6,53%. Аналогично коэффициенты латеральной широкой мышцы левой ноги снижались по отношению к разбегу ($P < 0,05$). Значимые изменения вовлечения задних пучков дельтовидной мышц правой руки были выявлены во всех экспериментальных условиях, отмечалось снижение коэффициентов, наиболее существенное при быстром беге по прямой.

Третья мышечная синергия демонстрировала существенные различия весовых коэффициентов для прямой мышцы бедра левой и задних пучков дельтовидной мышцы правой стороны ($P < 0,05$). Для первой мышцы отмечалось снижение вовлечения, наименьшие коэффициенты были получены при беге по виражу – $0,06 \pm 0,04$ при высокой вариативности, превышающей 100%. Вторая мышца демонстрировала большие весовые коэффициенты при быстром беге по виражу и достигали $0,65 \pm 0,03$, а вариативность оценивалась как низкая ($CV = 8,03\%$). В четвертой мышечной синергии значимые различия были выявлены только для передних пучков дельтовидной мышцы правой стороны. Было отмечено возрастание коэффициентов до $0,51 \pm 0,04$ при медленном беге по прямой и до $0,31 \pm 0,02$ при быстром беге по виражу ($P < 0,05$). Коэффициенты вариативности в названных условиях оценивались как низкие и не превышали 16,99%.

Установлено, что временная структура мышечных синергий при различных условиях реализации локомоций имела ряд закономерностей. При выполнении разбега активность первой синергии до середины цикла шага практически не изменялась, а после снижалась до его окончания (рис. 3). При медленном беге и беге с максимальной скоростью по прямой и виражу активность синергии снижалась в первых двух четвертях цикла шага, а в третьей четверти отмечался рост. В четвертой четверти наблюдался спад активности первой мышечной синергии. При сравнении коэффициентов активации в разных условиях бега отмечалось высокое их сходство только при медленном беге и беге по прямой и виражу с максимальной скоростью,

здесь коэффициенты кросскорреляционных функций с учетом смещения относительно нуля находились в диапазоне от $0,88 \pm 0,06$ до $0,92 \pm 0,06$. Коэффициенты активации в названных условиях относительно стартового ускорения демонстрировали низкое соответствие ($r < 0,37 \pm 0,07$).

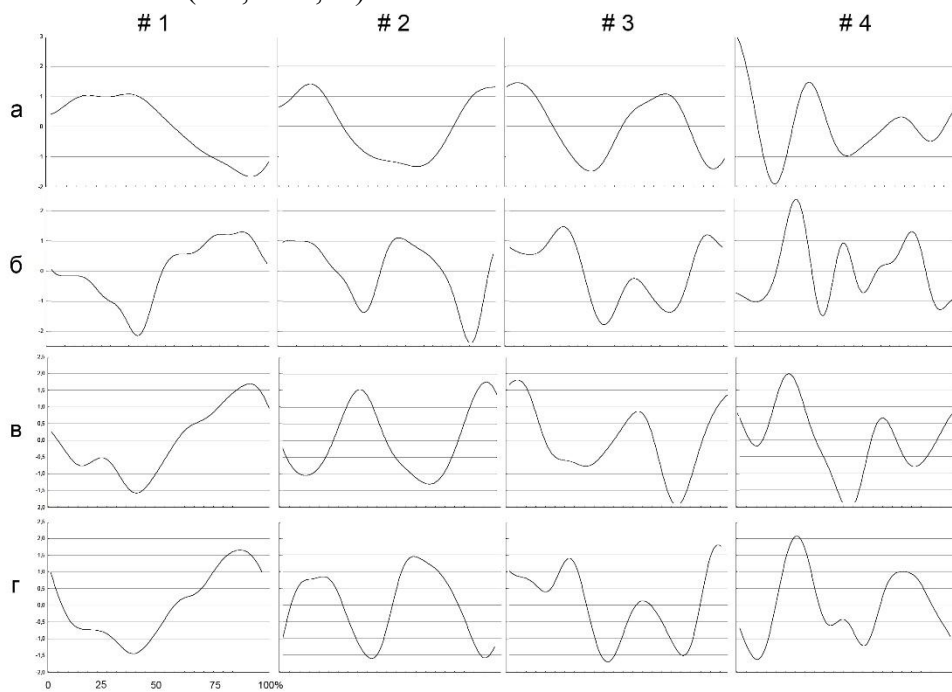


Рис. 3. Коэффициенты активации мышечных синергий при различных условиях локомоций: а – разбег, б – медленный бег, в – бег по прямой, г – бег по виражу. #1,2,3,4 – номер синергии; по оси абсцисс – прогресс цикла бегового шага, по оси ординат – у.е.

Вторая мышечная синергия при разбеге характеризовалась одним отрицательным пиком активации, приходящимся на третью четверть цикла бегового шага (рис. 3). Другие условия бега демонстрировали структуру с двумя положительными и двумя отрицательными пиками активации. Степень их соответствия в разных условиях локомоций была средней и высокой. Наибольшие коэффициенты кросскорреляции были установлены при сравнении временной структуры бега по прямой и виражу с максимальной скоростью – $0,84 \pm 0,06$ и при медленном беге с условиями разбега – $0,78 \pm 0,07$.

Третья мышечная синергия в условиях разбега демонстрировала два пика активации – в начале цикла и в третьей его четверти (рис. 3). В других условиях отмечались по три пика активации, находящиеся в разных периодах шага. Высокое сходство коэффициентов активации

данной синергии отмечались в условиях бега по прямой и виражу ($0,84 \pm 0,06$), при беге по виражу и медленном беге ($0,74 \pm 0,06$), а также при разбеге и медленном беге – $0,78 \pm 0,07$. Аналогично, в структуре четвертой мышечной синергии отмечались множественные пики активации, а степень соответствия временной структуры синергии была высокой только при сопоставлении бега с медленной скоростью и при беге по прямой и виражу, где коэффициенты кросскорреляции достигали $0,70 \pm 0,06$. С условиями разбега было отмечено низкое соответствие – не более $0,23 \pm 0,09$.

Заключение. Локомоции, выполняемые в различных направлениях и разной скоростью, реализуются посредством четырех мышечных синергий. Пространственная их организация демонстрирует изменение вовлечения отдельных мышц, преимущественно мышц бедра, в структуру выделяемых мышечных модулей. Тем не менее, временная их структура в некоторых условиях, а именно при медленном беге и при беге с максимальной скоростью по прямой и виражу, демонстрирует высокое сходство паттернов активации. Таким образом, в управлении структурой цикла бегового шага в разных условиях могут быть задействованы одни и те же мышечные модули, которые модифицируются в соответствии с изменяющимися условиями реализации локомоций, что выражается в изменении степени вовлечения отдельных мышц в их структуру.

Список литературы

- d'Avella A.* 2016. Modularity for Motor Control and Motor Learning // *Adv. Exp. Med. Biol.* № 957. P.3-19.
- Cheung V.C., d'Avella A., Bizzi E.* 2009. Adjustments of motor pattern for load compensation via modulated activations of muscle synergies during natural behaviors // *J. Neurophysiol.* V. 101. № 3. P.1235-1257.
- Tresch M.C., Cheung V.C., d'Avella A.* 2006. Matrix factorization algorithms for the identification of muscle synergies: evaluation on simulated and experimental data sets // *J. Neurophysiol.* V. 95. № 4. P. 2199-212.
- Kim Y., Stapornchaisit S., Miyakoshi M., Yoshimura N., Koike Y.* 2020. The Effect of ICA and Non-negative Matrix Factorization Analysis for EMG Signals Recorded From Multi-Channel EMG Sensors // *Front Neurosci.* V.14. P.600-804.
- Latash M.L.* 2021. One more time about motor (and non-motor) synergies // *Exp Brain Res.* V. 239. №.10. P. 2951-2967.
- Moiseev S., Pukhov A., Mikhailova E, Gorodnichev R.* 2022. Methodological and computational aspects of extracting extensive muscle synergies in moderate-intensity locomotions // *J. Evol. Biochem. Phys.* V. 58. P.88-97.

PATTERNS OF FORMATION AND MODIFICATION OF THE STRUCTURE OF MUSCLE SYNERGIES IN VARIOUS CONDITIONS OF LOCOMOTION

S.A. Moiseev

Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikiye Luki

The features of the spatio-temporal structure of muscle synergies were studied in man when running, running in a straight line and turning at maximum speed, as well as when running slowly in a straight line. The synergies were extracted using factor analysis according to the principal component method. A change in the degree of involvement of skeletal muscles in the structure of all identified synergies, affecting mainly the thigh muscles, was found. In controlling the structure of the running step cycle in different conditions, the same muscle modules are involved, the spatial structure of which is modified when the conditions for the implementation of locomotion change.

Keywords: *muscle synergies, locomotion, factor analysis, intermuscular interaction.*

Об авторе

МОИСЕЕВ Сергей Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник НИИ «Проблем спорта и оздоровительной физической культуры» Великолукской государственной академии физической культуры и спорта, 182105, Великие Луки, пл. Юбилейная, 4, e-mail: sergey_moiseev@vlgafo.ru.

Моисеев С.А. Закономерности формирования и модификации структуры мышечных синергий в различных условиях локомоций / С.А. Моисеев // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2024. № 4(73). С. 7-15.

Дата поступления рукописи в редакцию: 09.11.23

Дата подписания рукописи в печать: 01.03.24