

**РОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИНЕРГИЙ
В УПРАВЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
СТРУКТУРОЙ ТОЧНОСТНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА
(на примере стрельбы из лука)**

С.А. Моисеев* ORCID: [0000-0003-3923-3285](https://orcid.org/0000-0003-3923-3285)

А.М. Пухов* ORCID: [0000-0002-8642-970X](https://orcid.org/0000-0002-8642-970X)

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

Исследование проведено на 5 высококвалифицированных стрелках из лука. Изучали процесс формирования функциональных синергий на уровне взаимодействия суставных углов, кинематических характеристик и на уровне согласованного функционирования мышечных групп, благодаря которым движения приобретают стандартную форму. Оценивали вариативность пространственно-временных параметров и электромиографических характеристик скелетных мышц в составе выявленных синергий как отражение процессов регуляции в ЦНС. Установлено, что в фазах «расширение» и «выпуск» большая часть исследуемых мышц входят в мышечную синергию и имеют достоверную функциональную зависимость внутри нее. В этих же фазах выявлена существенная величина разброса значений биоэлектрической активности мышц. В структуре мышечных синергий несмысловых фаз движения, вероятно, происходит дифференцирование вклада активности отдельных мышц в целостное движение, что проявляется в разных величинах вариативности средней амплитуды их электромиограмм. Полученные данные свидетельствуют, что образование функциональных синергий на разных уровнях их организации, вне зависимости от целевой значимости фазы двигательного действия, является одним из механизмов, обеспечивающих успешную реализацию сложнокоординационного точностного двигательного действия. Для дальнейшего выяснения роли функциональных синергий в управлении такими движениями необходимо рассмотреть процесс их формирования на нейронном уровне, используя анализ взаимосвязей активности моторных отделов коры полушарий головного мозга и мышечной активности. Вероятно, для получения таких сведений будет полезным применение методов множественного регрессионного анализа и моделирования нейронных сетей.

Ключевые слова: функциональные синергии, координационная структура двигательного действия, вариативность параметров скелетных мышц, пространственно-временные характеристики, ЭМГ-активность, стрельба из лука.

Ответственный за переписку: Моисеев Сергей Александрович, адрес: 182105, Псковская обл., г. Великие Луки, пл. Юбилейная, д. 4; e-mail: sergey_moiseev@vlgafc.ru

Для цитирования: Моисеев С.А., Пухов А.М. Роль функциональных синергий в управлении пространственно-временной структурой точностных движений человека (на примере стрельбы из лука) // Журн. мед.-биол. исследований. 2019. Т. 7, № 4. С. 410–419. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.4.410

Целенаправленное движение, как правило, осуществляется в виде целостной реакции организма, активизирующей многочисленные структуры нервно-мышечной системы [1, 2]. Выяснение закономерностей регуляции произвольных двигательных актов и нервного контроля отдельных параметров их координационной структуры по-прежнему остается актуальной проблемой физиологии движений [3–5].

Многообразие сопряженных элементов нервно-мышечной системы и уровней ее интеграции является причиной возникновения значительной вариативности на нейронном уровне. В то же время на моторном уровне интеграции, где происходит комбинирование моментов сил мышц-агонистов и -антагонистов, обеспечивающих движение в суставах, вариативность параметров существенно снижается. Ряд исследователей считают, что этот феномен является положительным аспектом, обеспечивающим соответствие системы условиям двигательной задачи [6, 7]. Большое значение в этом процессе имеет механизм образования функциональных синергий, представляющих собой интеграцию элементов нервной, мышечной и скелетной систем, вариативность которых является неотъемлемой частью их функционирования [8–11]. Представляет интерес определение таких функциональных образований и выяснение вклада отдельных их элементов в общую вариацию внешней и внутренней структуры движений.

Понимание физиологических механизмов управления функциональными синергиями особенно важно в спортивной практике, где результат во многом зависит от характеристик внутри- и межмышечной координации, например в стрелковых видах спорта. В связи с этим целью данной работы явилось изучение признаков согласованного управления пространственно-временными характеристиками и биоэлектрической активностью скелетных мышц, обеспечивающих реализацию отдельных фаз сложнокоординационного двигательного действия – выстрела из лука.

Материалы и методы. В общей сложности проанализировано 150 выстрелов, выполненных 5 спортсменами высокой квалификации (МСМК, МС), специализирующимися в стрельбе из клас-

сического лука. Во время стрельбы осуществлялся видеозахват движений с синхронной записью электромиограмм (ЭМГ) 12 поверхностных мышц, имеющих наибольшую электроактивность при реализации выстрела [12, 13]. Регистрация пространственно-временных и электромиографических параметров проводилась в крытом помещении в условиях, моделирующих соревновательную деятельность. Спортсмены выполняли по 30 выстрелов с дистанции 18 м, в расчет принимались только точные выстрелы с результатом попадания не менее 9 очков.

Видеорегистрация технических действий осуществлялась посредством системы 3D-видеоанализа Qualisys (Швеция), частота кадров видеосъемки составляла 100 Гц. Светоотражающие маркеры размещались на антропометрических точках сегментов тела спортсмена, соответствующих центрам осей вращения в суставах. Биоэлектрическая активность скелетных мышц регистрировалась 16-канальным биомонитором ME6000 (Финляндия).

Анализировались параметры основных фаз выстрела из лука. Фаза «расширение» длилась от начала подъема лука до прикладывания к ориентационной точке. Фаза «дотяг» включала действия стрелка с момента прикладывания тянущей руки к ориентационной точке до момента срабатывания кликера. Фаза «выпуск» длилась с момента срабатывания кликера до начала опускания лука. Рассматривались пространственно-временные параметры движения в изучаемых фазах: длительность фаз, суставные углы, размах углов и ускорения суставных углов верхних и нижних конечностей (локтевого, плечевого, тазобедренного, коленного, голеностопного), а также средняя амплитуда ЭМГ мышц спины и верхних конечностей.

Статистическая обработка и анализ данных выполнялись в программе Statistica 10. Анализировались показатели распределения, описательной и вариационной статистики для сгруппированных данных. Поскольку разброс среднегрупповых значений некоторых показателей координационной структуры изучаемого движения оказался значительным, данные группировались по критерию тесноты распределения значений вариационного ряда. Разни-

ца в значениях, превышающая установленную величину, принималась за признак принадлежности к определенной совокупности. В анализ включали совокупность, имеющую наибольшее количество значений, как отражающую основные закономерности изучаемых процессов и явлений в группе испытуемых. По показателю средней амплитуды разница в значениях составляла 50 мкВ, по суставным углам – 5°, по продолжительности фаз – 1 с.

Рассчитывались следующие величины: среднее арифметическое (M), медиана (Me), стандартное отклонение (SD), коэффициент вариативности (V), ошибка среднего арифметического (m), верхний ($Q_{\text{верх}}$) и нижний ($Q_{\text{ниж}}$) квартили, размах вариации (R), квартильный размах (IQR). Для выявления функциональных синергий, а также вклада их элементов в вариацию на определенном уровне интеграции нервно-мышечной системы применялся множественный регрессионный анализ [14, 15]. Адекватность построенных регрессионных моделей определялась по значению коэффициента детерминации (использовались модели с коэффициентом не менее 0,9), анализу распре-

деления остатков и сравнению предсказанных величин с наблюдаемыми в доверительном интервале 95 %. При анализе зависимостей между величинами электроактивности скелетных мышц в качестве зависимой переменной выступала мышца, имеющая наибольшую амплитуду ЭМГ в данной фазе. При регрессионном анализе пространственно-временных характеристик зависимой переменной являлся угол в суставе, имеющем наибольший размах.

Результаты. Анализ зависимостей средней амплитуды ЭМГ в фазе «расширение» установил синергетическое взаимодействие следующих скелетных мышц: передней части дельтовидной мышцы левой руки (y), локтевого разгибателя кисти правой руки (x_1), лучевого сгибателя кисти правой и левой рук (x_2, x_3), нижних пучков трапецевидной мышцы левой и правой сторон (x_4, x_5), а также трехглавых мышц плеча обеих рук (x_6, x_7). Уравнение регрессии имело вид

$$y = -37,42 - 1,43x_1 + 4,67x_2 - 0,37x_3 - 0,20x_4 + 0,52x_5 - 2,54x_6 - 1,65x_7.$$

В табл. 1 представлены статистические параметры, характеризующие величину разброса

Таблица 1

**ПАРАМЕТРЫ ВАРИАТИВНОСТИ СРЕДНЕЙ АМПЛИТУДЫ ЭМГ
СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИНЕРГИИ ДЛЯ ФАЗЫ «РАСШИРЕНИЕ»
У ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СПОРТСМЕНОВ ПРИ СТРЕЛЬБЕ ИЗ ЛУКА ($n = 939$)**

Параметр	Скелетные мышцы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
M	203,51	48,61	53,53	23,33	182,18	269,74	256,73	371,55
Me	197,56	45,91	46,58	17,38	180,56	263,14	271,98	374,17
$Q_{\text{верх}}$	172,16	37,36	36,45	15,35	166,86	238,71	182,86	335,89
$Q_{\text{ниж}}$	232,94	59,84	63,66	22,24	198,22	308,69	307,94	405,89
R	136,68	51,08	83,54	50,80	86,92	163,76	247,26	197,60
IQR	60,78	22,48	27,21	6,89	31,36	69,98	125,08	70,00
SD	37,04	12,89	21,84	13,96	21,69	43,35	69,89	49,27
V	18,20	26,52	40,80	59,84	11,91	16,07	27,22	13,26
m	3,95	1,06	1,79	1,15	2,01	3,99	7,54	5,31

Примечание: 1 – лучевой сгибатель кисти правой руки; 2 – локтевой разгибатель кисти правой руки; 3 – трехглавая мышца плеча правой руки; 4 – лучевой сгибатель кисти левой руки; 5 – трехглавая мышца плеча левой руки; 6 – передняя часть дельтовидной мышцы левой руки; 7 – нижние пучки трапецевидной мышцы правой стороны; 8 – нижние пучки трапецевидной мышцы левой стороны.

значений средней амплитуды ЭМГ мышц, входящих по результатам регрессионного анализа в единое функциональное образование (синергию) в фазе «расширение». Следует отметить небольшие различия в значениях среднего арифметического и медианы практически всех исследуемых мышц – не более 6,95 мкВ, за исключением нижних пучков трапециевидной мышцы правой стороны – 15,25 мкВ. Разница между квартильным размахом и вариационным размахом составила от 13,55 % в лучевом сгибателе кисти левой руки до 50,59 % в нижних пучках трапециевидной мышцы правой стороны. Коэффициенты вариативности находились в пределах от 11,91 % в трехглавой мышце плеча левой руки до 59,84 % в лучевом сгибателе кисти левой руки.

Регрессионный анализ показал наличие зависимости угла в локтевом суставе правой руки (y) от электроактивности следующих мышц: верхних пучков трапециевидной мышцы левой стороны (x_1), задней части дельтовидной мышцы правой руки (x_2), локтевого разгибателя (x_3) и лучевого сгибателя кисти правой руки (x_4), нижних пучков трапециевидных мышц обеих сторон (x_5 , x_6) и локтевого разгибателя кисти левой руки (x_7).

Уравнение регрессии имело вид

$$y = 138,94 + 0,08x_1 + 0,05x_2 - 0,68x_3 - 0,20x_4 + 0,04x_5 + 0,04x_6 - 0,09x_7.$$

Зависимостей на статистически значимом уровне между длительностью и амплитудой ЭМГ скелетных мышц, а также между амплитудой ЭМГ скелетных мышц и суставными углами в фазе «расширение» выявлено не было. В этой же фазе отмечено, что в структуру функциональной синергии вошли практически все изучаемые суставы нижних и верхних конечностей, за исключением тазобедренного левой ноги. В качестве зависимой переменной в данном случае выступал угол в локтевом суставе правой руки. В табл. 2 приведены основные их параметры вариативности.

Обращают на себя внимание низкие значения коэффициентов вариативности, в большинстве углов они составили не более 7 %, что характеризует низкую вариативность. Также следует отметить минимальную разницу среднего арифметического и медианы, в некоторых суставных углах она составила не более 0,2–0,4°, что свидетельствует об очень высокой плотности значений и очень низкой вариативности.

Таблица 2

**ПАРАМЕТРЫ ВАРИАТИВНОСТИ СУСТАВНЫХ УГЛОВ,
ОБРАЗУЮЩИХ ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ СИНЕРГИЮ, В ФАЗЕ «РАСШИРЕНИЕ»
У ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СПОРТСМЕНОВ ПРИ СТРЕЛЬБЕ ИЗ ЛУКА ($n = 1332$)**

Параметр	Суставы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M	60,2	97,5	170,9	169,8	99,2	35,6	160,5	167,1	170,0
Me	60,6	98,9	174,2	170,5	101,1	35,4	159,5	167,7	169,3
$Q_{\text{верх}}$	55,8	91,2	168,5	167,7	94,2	34,2	158,3	165,1	166,3
$Q_{\text{ниж}}$	65,6	101,5	174,9	173,3	101,9	36,7	162,9	171,7	173,9
R	21,7	18,5	19,6	17,6	18,4	15,6	11,6	21,6	13,4
IQR	9,9	10,3	6,4	5,6	7,7	2,5	4,7	6,6	7,6
SD	6,0	5,4	6,5	5,2	5,4	2,5	3,1	5,4	3,9
V	10,0	5,5	3,8	3,1	5,5	7,0	1,9	3,2	2,3
t	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,3

Примечание: 1 – плечевой сустав правой руки; 2 – локтевой сустав правой руки; 3 – коленный сустав правой ноги; 4 – голеностопный сустав правой ноги; 5 – плечевой сустав левой руки; 6 – локтевой сустав левой руки; 7 – тазобедренный сустав левой ноги; 8 – коленный сустав левой ноги; 9 – голеностопный сустав левой ноги.

В фазе «дотяг» аналогично были выявлены зависимости между средними амплитудами ЭМГ скелетных мышц, а также суставными углами. Уравнение регрессии для средней амплитуды имело вид

$$y = -515,52 + 5,89x_1 + 5,95x_2 + 0,69x_3 + 0,45x_4,$$

где y – средняя амплитуда ЭМГ задней части дельтовидной мышцы правой руки; x_1 , x_2 , x_3 и x_4 – средняя амплитуда ЭМГ локтевого разгибателя кисти правой руки, лучевого сгибателя кисти левой руки, нижних пучков трапецевидной мышцы левой и правой рук соответственно. Статистически значимую зависимость имели коленные, локтевые, голеностопный правый и тазобедренный левый суставы. Вариативность средней амплитуды ЭМГ мышц, входящих в состав синергии, оценивалась как низкая (коэффициенты вариативности здесь не превышали 10 %), за исключением амплитуды локтевого разгибателя кисти правой руки и лучевого сгибателя кисти левой руки (44 и 57 % соответственно), однако анализ размаха вариации, квартильного размаха, а также коэффициентов асимметрии показал, что такие коэффициенты вариативности рассчитывались в связи с наличием ряда значений, сильно смещенных от медианного, внутри группы. Анализируя значения, ограниченные квартилями, можно говорить также о низкой вариативности средней амплитуды ЭМГ этих мышц.

В фазе «выпуск» статистически значимые регрессионные зависимости установлены в электроактивности скелетных мышц, а также между правым локтевым суставным углом и исследуемыми мышцами. В функциональное объединение вошли 8 из 12 исследуемых мышц. Кроме того, углы правого плечевого сустава в данной фазе движения статистически значимо зависели от электроактивности 8 скелетных мышц спины и верхнего плечевого пояса.

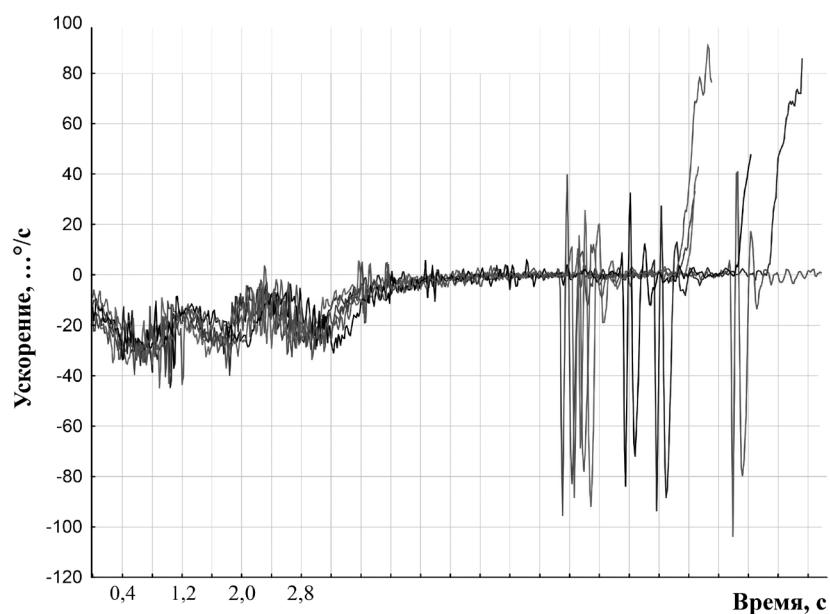
Поскольку угол в локтевом суставе правой руки характеризовался наибольшим размахом во всех исследуемых фазах выстрела, рассмотрим его пространственные характеристики подробно. На *рисунке* представлена динамика

ускорений и суставных углов при 6 выстрелах, выполненных одним из испытуемых.

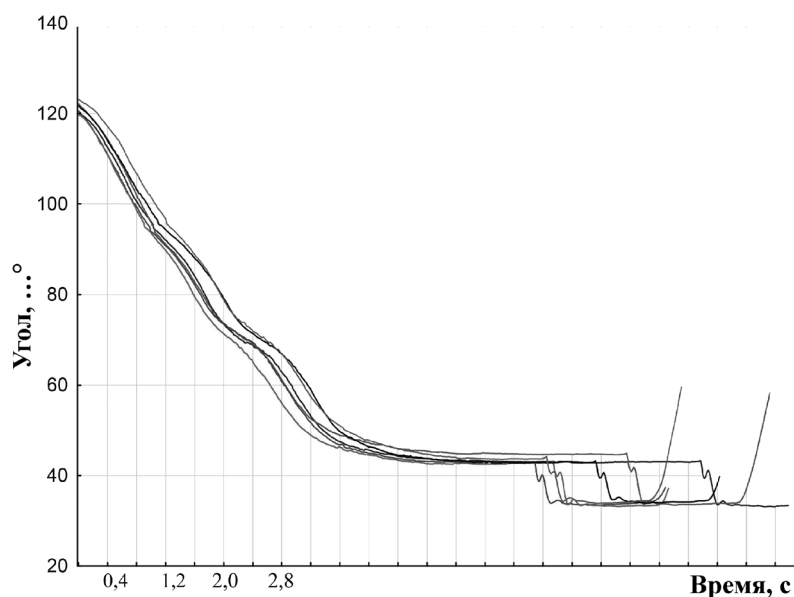
Очевидно, что угловые ускорения в начальной фазе движения более вариативны, чем в последующих, также в финальной части движения прослеживается явное несовпадение характеристик разных выстрелов во времени. По значениям углов в данном суставе в фазах «расширение» и «дотяг» наблюдалась высокая воспроизводимость характеристик от выстрела к выстрелу, однако время реализации финальной части выстрелов существенно различалось.

Обсуждение. Синергия представляет собой сочетание движений в нескольких суставах, имеющих большое число степеней свободы, обеспечиваемых активностью скелетных мышц, для достижения результата. Даже в относительно простых движениях выявление взаимосвязей параметров элементов костно-мышечной системы представляется затруднительным, а когда двигательная модель состоит из большого числа звеньев, выяснение закономерностей функционирования синергий может значительно усложняться. Одним из методов анализа таких закономерностей является регрессионный анализ, позволяющий моделировать множественные зависимости, характеризующие процесс или явление [16].

Известно, что контроль произвольных движений человека осуществляется на разных уровнях интеграции нервно-мышечной системы, начиная от нейронного и заканчивая уровнем целостного движения, где происходит комбинирование моментов действия, обеспечивающих синергетическое достижение общей цели [17]. Исходя из этого, в функциональные синергии могут быть включены различные системы организма в зависимости от того, какие уровни организации задействованы в движении [18–20]. В движениях, реализуемых в различных фазах выстрела из лука, вероятно, используются разные механизмы управления, поскольку каждая из них имеет разную целевую значимость. Нервная система допускает большую вариативность характеристик движения в фазах, менее важных для достижения



а



б

Изменение ускорений и углов правого локтевого сустава при выполнении выстрела из лука испытуемым М.А. Представлено наложение 6 выстрелов, синхронизированных в начальной точке

цели, поэтому в мышечные синергии в таких фазах могут быть вовлечены обширные мышечные группы, обеспечивающие взаимодействие

элементов многозвенной кинематической цепи [21]. Нами показано, что в фазе «расширение» бóльшая часть исследуемых скелетных мышц

входят в мышечную синергию и имеют достоверную функциональную зависимость внутри нее, что согласуется с вышесказанным. Также установлена существенная величина разброса значений биоэлектрической активности мышц, являющихся частью синергии, в фазах «расширение» и «выпуск». Кроме того, обнаружено, что в структуре мышечной синергии в этих же фазах имеется дифференцирование вклада активности отдельных мышц в целостное движение, что отражено в величинах разброса значений электроактивности, т. е. в мере вариативности их усилий. Например, в фазе «расширение» некоторые мышцы в составе установленной синергии, такие как трехглавая мышца левого плеча и передняя часть дельтовидной мышцы левой руки, имели низкие показатели вариации, в то время как электроактивность ряда других мышц демонстрировала значительную вариативность.

Отличительной особенностью установленных синергий на кинематическом и мышечном уровнях в фазе «дотяг» являлось значительно меньшее число суставных углов и скелетных мышц, входящих в них. Вариативность характеристик таких образований на мышечном уровне оценивалась как низкая, а на уровне отношений суставных углов – крайне низкая. Например, разница большинства суставных углов данной фазы в среднем по группе не превышала 2° , а индивидуальные колебания суставных углов – $0,5^\circ$.

Одним из механизмов организации координационной структуры точностных движений является уменьшение числа степеней свободы в фазе их реализации. Исключая мышцы, осуществляющие фиксацию звена, реализующего точность в оптимальном положении, управляющая система заменяет параллельное использование двух моторных программ одной, уменьшая тем самым количество шумов и улучшая качество дифференцирования и обработки информации о протекании фазы реализации. Признаками такого ограничения степеней свободы звеньев тела может

служить одновременная активность мышц-антагонистов, «фиксирующих» суставы, или частичное уменьшение подвижности за счет изменения положения других звеньев тела. Таким образом, число степеней свободы кинематической цепи, программно изменяемое ЦНС в зависимости от времени движения, является одним из основных биомеханических факторов, определяющих точность движения [22–24]. В нашей работе это могло бы означать, что мышцы и звенья тела, не являющиеся активными элементами системы, реализующей точность, должны быть «заморожены», а подвижность в данных суставах максимально ограничена. Другими словами, вариативность параметров внешней и внутренней структуры должна быть минимальной. Однако регрессионный анализ на кинематическом уровне показал связи и зависимости многих суставных углов, в т. ч. и звеньев нижних конечностей, а на мышечном – целого ряда мышц, имеющих как высокую, так и низкую вариативность параметров электроактивности.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что образование функциональных синергий на разных уровнях их организации, вне зависимости от целевой значимости фазы двигательного действия, является одним из механизмов, обеспечивающих успешную реализацию сложнокоординационного точностного двигательного действия. Однако для дальнейшего выяснения роли функциональных синергий в управлении такими движениями необходимо рассмотреть процесс их формирования на нейронном уровне, например, используя анализ взаимосвязей активности моторных отделов коры полушарий головного мозга и мышечной активности по показателям электроэнцефалограмм и электромиограмм соответственно. Вероятно, для получения таких сведений будет полезным применение методов множественного регрессионного анализа и моделирования нейронных сетей [25, 26].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.Л. Регуляция позы человека. М.: Наука, 1965. 256 с.
2. Грибанов А.В., Шерстенникова А.К. Физиологические механизмы регуляции постурального баланса человека (обзор) // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Мед.-биол. науки. 2013. № 4. С. 20–29.
3. Дёмин А.В., Гудков А.Б., Грибанов А.В. Особенности постуральной стабильности у мужчин пожилого и старческого возраста // Экология человека. 2010. № 12. С. 50–54.
4. Гудков А.Б., Дёмин А.В., Грибанов А.В., Торшин В.И., Дерягина Л.Е. Возрастные особенности компонентов постурального контроля у женщин 55–64 лет // Экология человека. 2016. № 11. С. 35–41.
5. Дёмин А.В., Гудков А.Б., Грибанов А.В., Пащенко В.П., Попова О.Н. Характеристика компонентов постурального контроля у женщин 55–64 лет с риском развития гериатрического синдрома падений // Экология человека. 2018. № 4. С. 43–50.
6. Newell K.E., Corcos D.M. Variability and Motor Control. Champaign: Human Kinetics Publishers, 1993. P. 1–11.
7. Latash M.L., Scholz J.P., Schönner G. Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability // Exerc. Sport Sci. Rev. 2002. Vol. 30, № 1. P. 26–31.
8. Winter D.A. Overall Principle of Lower Limb Support During Stance Phase of Gait // J. Biomech. 1980. Vol. 13, № 11. P. 923–927.
9. Winter D.A. Kinematic and Kinetic Patterns in Human Gait: Variability and Compensating Effects // Hum. Mov. Sci. 1984. Vol. 3, № 1-2. P. 51–76.
10. Ламаи М.Л. Структурированная вариабельность как отличительный признак биологических процессов // Вопр. психологии. 2016. № 3. С. 120–126.
11. Inouye J.M., Valero-Cuevas F.J. Muscle Synergies Heavily Influence the Neural Control of Arm Endpoint Stiffness and Energy Consumption // PLoS Comput. Biol. 2016. Vol. 12, № 2. Art. № e1004737.
12. Моисеев С.А. Вариативность как фактор стабилизации системы управления движениями в стрельбе из лука // Теория и практика физ. культуры. 2015. № 6. С. 17–19.
13. Пухов А.М., Иванов С.А., Моисеев С.А., Городничев Р.М. Особенности мышечной активности при выполнении выстрела из лука // Наука и спорт: современ. тенденции. 2016. Т. 11, № 2. С. 82–87.
14. Масальгин Н.А., Медведев А.С., Смирнов В.Е. Математический анализ функциональных резервов спортсменов методами корреляции и регрессии: метод. разработки. М.: РГАФК, 1993. 22 с.
15. Радченко С. Г. Методология регрессионного анализа: моногр. Киев: Корнійчук, 2011. 376 с.
16. de Freitas S.M., Scholz J.P. Comparison of Methods for Identifying the Jacobian for Uncontrolled Manifold Variance Analysis // J. Biomech. 2010. Vol. 43, № 4. P. 775–777.
17. Winter D.A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Hoboken: Wiley, 2009. 370 p.
18. Платонов А.К., Фролов А.А., Бирюкова Е.В., Пряничников В.Е., Емельянов С.Н. Методы биомехатроники тренажера руки человека // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 82. С. 1–40.
19. Santello M., Baud-Bovy G., Jörintell H. Neural Bases of Hand Synergies // Front. Comput. Neurosci. 2013. Vol. 7. Art. № 23.
20. Bizzi E., Cheung V.C.K. The Neural Origin of Muscle Synergies // Front. Comput. Neurosci. 2013. Vol. 7. P. 51.
21. Bernstein N.A. The Co-Ordination and Regulation of Movements. Oxford: Pergamon Press, 1967. 196 p.
22. Голомазов С.В., Кадри М.М., Селуянов В.Н., Шейх М. Состояние исполнительного аппарата как фактор, определяющий точность целевого препрограммируемого двигательного действия // Теория и практика физ. культуры. 1994. № 11. С. 27–30.
23. Немцев О.Б. Биомеханические основы точности движений. Майкоп: АГУ, 2004. 187 с.
24. Todorov E. Optimality Principles in Sensorimotor Control // Nat. Neurosci. 2004. Vol. 7, № 9. P. 907–915.
25. Клочков А.С., Хиженникова А.Е., Назарова М.А., Черникова Л.А. Патологические синергии в руке у пациентов с постинсультными гемипарезами // Журн. высш. нерв. деятельности. 2017. Т. 67, № 3. С. 273–287. DOI: 10.7868/S0044467717030066
26. Грибанов А.В., Аникина Н.Ю., Котцова О.Н. Распределение церебральных энергетических процессов у молодых людей, постоянно проживающих в Арктическом регионе // Журн. мед.-биол. исследований. 2019. Т. 7, № 1. С. 118–123. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.1.118

References

1. Gurfinkel' V.S., Kots Ya.M., Shik M.L. *Regulyatsiya pozy cheloveka* [Regulation of Human Posture]. Moscow, 1965. 256 p.
2. Gribanov 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. Demin A.V., Gudkov A.B., Gribanov A.V. Osobennosti postural'noy stabil'nosti u muzhchin pozhilogo i starcheskogo vozrasta [Features of Postural Balance in Elderly and Old Men]. *Ekologiya cheloveka*, 2010, no. 12, pp. 50–54.
4. Gudkov A.B., Demin A.V., Gribanov A.V., Torshin V.I., Deryagina L.E. Vozrastnye osobennosti komponentov postural'nogo kontrolya u zhenshchin 55–64 let [Age Characteristics of Postural Control Components in Women 55–64 Years Old]. *Ekologiya cheloveka*, 2016, no. 11, pp. 35–41.
5. Demin A.V., Gudkov A.B., Gribanov A.V., Pashchenko V.P., Popova O.N. Kharakteristika komponentov postural'nogo kontrolya u zhenshchin 55–64 let s riskom razvitiya geriatricheskogo sindroma padeniy [Component Characteristics of the Postural Control in Women 55–64 Years Old with the Risk Development of the Geriatric Syndrome of Falls]. *Ekologiya cheloveka*, 2018, no. 4, pp. 43–50.
6. Newell K.E., Corcos D.M. *Variability and Motor Control*. Champaign, 1993, pp. 1–11.
7. Latash M.L., Scholz J.P., Schöner G. Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 2002, vol. 30, no. 1, pp. 26–31.
8. Winter D.A. Overall Principle of Lower Limb Support During Stance Phase of Gait. *J. Biomech.*, 1980, vol. 13, no. 11, pp. 923–927.
9. Winter D.A. Kinematic and Kinetic Patterns in Human Gait: Variability and Compensating Effects. *Hum. Mov. Sci.*, 1984, vol. 3, no. 1-2, pp. 51–76.
10. Latash M.L. Strukturirovannaya variabel'nost' kak otlichitel'nyy priznak biologicheskikh protsessov [Structured Variability as a Distinctive Feature of Biological Processes]. *Voprosy psikhologii*, 2016, no. 3, pp. 120–126.
11. Inouye J.M., Valero-Cuevas F.J. Muscle Synergies Heavily Influence the Neural Control of Arm Endpoint Stiffness and Energy Consumption. *PLoS Comput. Biol.*, 2016, vol. 12, no. 2. Art. no. e1004737.
12. Moiseev S.A. Variativnost' kak faktor stabilizatsii sistemy upravleniya dvizheniyami v strel'be iz luka [Variability as a Factor of Stabilization of Motor Control System in Archery]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*, 2015, no. 6, pp. 17–19.
13. Pukhov A.M., Ivanov S.A., Moiseev S.A., Gorodnichev R.M. Osobennosti myshechnoy aktivnosti pri vypolnenii vystrela iz luka [Features of Muscle Activity During Performing a Shot from a Bow]. *Nauka i sport: sovremennye tendentsii*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 82–87.
14. Masal'gin N.A., Medvedev A.S., Smirnov V.E. *Matematicheskii analiz funktsional'nykh rezervov sportsmenov metodami korrelyatsii i regressii* [Mathematical Analysis of the Functional Reserves of Athletes by Means of the Correlation and Regression Methods]. Moscow, 1993. 22 p.
15. Radchenko S. G. *Metodologiya regressionnogo analiza* [Methodology of Regression Analysis]. Kiev, 2011. 376 p.
16. de Freitas S.M., Scholz J.P. Comparison of Methods for Identifying the Jacobian for Uncontrolled Manifold Variance Analysis. *J. Biomech.*, 2010, vol. 43, no. 4, pp. 775–777.
17. Winter D.A. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Hoboken, 2009. 370 p.
18. Platonov A.K., Frolov A.A., Biryukova E.V., Pryanichnikov V.E., Emel'yanov S.N. Metody biomekhatroniki trenazhera ruki cheloveka [Methods of Biomechatronic for Human Arm Stimulator]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysa*, 2012, no. 82, pp. 1–40.
19. Santello M., Baud-Bovy G., Jörntell H. Neural Bases of Hand Synergies. *Front. Comput. Neurosci.*, 2013, vol. 7. Art. no. 23.
20. Bizzi E., Cheung V.C.K. The Neural Origin of Muscle Synergies. *Front. Comput. Neurosci.*, 2013, vol. 7. Art. no. 51.
21. Bernstein N.A. *The Co-Ordination and Regulation of Movements*. Oxford, 1967. 196 p.
22. Golomazov S.V., Kadri M.M., Seluyanov V.N., Sheykh M. Sostoyanie ispolnitel'nogo apparata kak faktor, opredelyayushchiy tochnost' tselevogo preprogrammiruemogo dvigatel'nogo deystviya [The State of the Executive Apparatus as a Factor Determining the Accuracy of the Target Preprogrammed Motor Action]. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*, 1994, no. 11, pp. 27–30.
23. Nemtsev O.B. *Biomekhanicheskie osnovy tochnosti dvizheniy* [Biomechanical Bases of Movement Precision]. Maikop, 2004. 187 p.

24. Todorov E. Optimality Principles in Sensorimotor Control. *Nat. Neurosci.*, 2004, vol. 7, no. 9, pp. 907–915.
25. Klochov A.S., Khizhnikova A.E., Nazarova M.A., Chernikova L.A. Patologicheskie sinergii v ruke u patsientov s postinsul'tnymi gemiparezami [Pathological Upper Limb Synergies of Poststroke Patients]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti*, 2017, vol. 67, no. 3, pp. 273–287. DOI: 10.7868/S0044467717030066
26. Gribanov A.V., Anikina N.Yu., Kottsova O.N. Distribution of Cerebral Energy Processes in Young People Permanently Living in the Arctic Region. *J. Med. Biol. Res.*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 118–123. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.1.118

DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.4.410

*Sergey A. Moiseev** ORCID: [0000-0003-3923-3285](https://orcid.org/0000-0003-3923-3285)
*Aleksandr M. Pukhov** ORCID: [0000-0002-8642-970X](https://orcid.org/0000-0002-8642-970X)

*Velikiye Luki State Academy of Physical Education and Sports
(Velikie Luki, Pskov Region, Russian Federation)

THE ROLE OF FUNCTIONAL SYNERGIES IN MANAGING THE SPACE-TIME STRUCTURE OF HUMAN PRECISION MOVEMENTS (Exemplified by Target Archery)

Five highly skilled archers took part in this research, which studied the formation of functional synergies at the level of joint angles, kinematic characteristics and coordinated work of muscle groups, all of which make the movements look the standard way. We evaluated the variability of space-time parameters and electromyographic characteristics of skeletal muscles within the identified synergies as a reflection of the regulation processes in the central nervous system. It was found that during the “expansion” and “release” phases, most of the skeletal muscles under study are involved in muscle synergy and demonstrate a reliable functional dependence in it. Moreover, in these phases a significant variation in the parameters of muscle bioelectrical activity was revealed. Within the structure of muscle synergies of non-determinative phases of movement, differentiation of the contribution of individual muscles to the whole movement probably takes place, which is manifested in different values of the average amplitude variability on their electromyograms. The data obtained indicate that the formation of functional synergies at different organization levels, regardless of the significance of the phase of motor action, is one of the mechanisms ensuring successful performance of a complex coordination precision movement. However, in order to further clarify the role of functional synergies in managing such movements, it is necessary to consider the process of their formation at the neural level, for example, by analysing the relationships between the motor cortex and muscle activity. We believe that multiple regression analysis and neural network modelling methods will be useful for these purposes.

Keywords: functional synergies, coordination structure of motor action, variability of skeletal muscle parameters, space-time characteristics, EMG activity, target archery.

Поступила 29.03.2019

Принята 09.09.2019

Received 29 March 2019

Accepted 9 September 2019

Corresponding author: Sergey Moiseev, address: pl. Yubileynaya 4, Velikie Luki, 182105, Pskovskaya obl., Russian Federation; e-mail: sergey_moiseev@vlgafc.ru

For citation: Moiseev S.A., Pukhov A.M. The Role of Functional Synergies in Managing the Space-Time Structure of Human Precision Movements (Exemplified by Target Archery). *Journal of Medical and Biological Research*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 410–419. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.4.410