

УДК 612.763; 612.743

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА МЫШЕЧНЫХ СИНЕРГИЙ ТОЧНОСТНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

Моисеев С. А., Иванов С. М.

*Великолукская государственная академия физической культуры и спорта, Великие Луки, Россия
E-mail: sergey_moiseev@vlgafc.ru*

Показано, что управление пространственно-временной структурой выстрела из лука осуществляется бóльшим количеством управляемых модулей – синергий, в сравнении с движениями, не имеющими целевую направленность, но схожими по биомеханической структуре. В условиях развивающегося утомления пространственно-временная структура мышечных синергий остается относительно стабильной, коэффициенты мышечной активации и векторы синергии демонстрируют умеренное сходство при их сравнении в начале выполнения изометрического усилия при удержании растянутого лука и при его завершении. Такие особенности, вероятно, являются частью нейронной стратегии ЦНС, направленной на снижение избыточности степеней свободы нервно-мышечной системы спортсмена и поддержание оптимальных параметров мышечной активности в изменяющихся условиях выполнения двигательной задачи.

Ключевые слова: мышечные синергии; стрельба из лука; метод главных компонент, утомление; координационная структура.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос двигательного синергизма преимущественно рассматривается в рамках ряда теоретических разработок, изложенных в фундаментальных исследовательских работах, выполненных на животных и человеке [1–3]. Одна из концепций основана на утверждении о том, что управление движением осуществляется по принципу объединения различных элементов управляемой системы в модули, а контроль осуществляется гибким комбинированием в нервной системе таких модулей в зависимости от сложности двигательной задачи.

В ряде работ выявляются основные синергии при рассмотрении локомоторных и поструральных движений верхними и нижними конечностями, манипуляций руками, таких как бытовые движения запястьем – хватание, перенос предмета и другие. При изменении условий реализации таких движений, например, при изменении их направления, скорости или вследствие наступления утомления, регистрируются дополнительные, специфические для новых условий двигательные синергии с сохранением основных. Некоторые локомоторные движения, выполняемые нижними конечностями, обнаруживают единые базовые синергетические модули [4]. Данная закономерность выявляется не только при рассмотрении циклических движений, это характерно и для сложных по координации движений: в концентрической и эксцентрической фазах жима лежа в тяжелой атлетике, при выполнении технических элементов в единоборствах [5, 6].

При выполнении больших оборотов на перекладине в спортивной гимнастике обнаруживаются схожие стратегии управления движением в целом и его отдельными периодами [7].

При изучении мышечных синергий применяется относительно стандартный подход, основанный на применении методов снижения размерности и классификации данных. Такие методы подразумевают представление исходного набора электромиограмм (ЭМГ) разных мышц в виде паттернов активации синергии (коэффициентов активации) и весовых коэффициентов (векторы синергии), определяющих временную и пространственную их организацию. Доказано, что синергетические эффекты, выявленные с помощью алгоритмов факторизации данных не являются их артефактами, а отражают определенные аспекты организации мышечной активации [8, 9]. Как правило, наиболее вариативной оказывается пространственная структура мышечных синергий, а временная организация остается относительно стабильной в различных условиях выполнения двигательной задачи. Такая закономерность наблюдается при внутри- и межиндивидуальном сравнении извлеченных мышечных синергий, что приводит как доказательство в пользу нейронального их происхождения. Однако, несмотря на обилие исследовательских работ в этой области остаются малоизученными особенности синергетического взаимодействия скелетных мышц при выполнении сложнокоординационных движений, имеющих явно выраженную целевую направленность. Такие данные будут способствовать пониманию нейрональной основы формирования мышечных синергий и будут полезны для совершенствования специфических двигательных навыков, характерных для стрельбы из лука и других точностных видов спорта. В связи с этим задачами исследования являлось установление различий пространственно-временной структуры мышечных синергий при выполнении специальных упражнений, схожих по биомеханической структуре с отдельными фазами движений, выполняемых спортсменами при стрельбе по мишени. Также планировалось выявить особенности изменений пространственно-временной структуры мышечных синергий в процессе развивающегося утомления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 8 спортсменов мужского пола, специализирующихся в стрельбе из классического лука. Эксперименты выполнены на базе научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры ФГБОУ ВО «ВЛГАФК» в лаборатории физиологии нервной и мышечной систем. Все исследования проведены с соблюдением требований и принципов биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинской декларации 1964 г., и одобрены биоэтическим комитетом Великолукской государственной академии физической культуры и спорта. Каждый участник представил добровольное письменное информированное согласие на участие в исследованиях.

Каждый спортсмен выполнял 4 серии выстрелов из лука по 3 в каждой с дистанции 18 метров, в анализ включали только результативные выстрелы. Выстрел делили на две фазы – «расширение» и «дотяг». В первом случае граничными

моментами фазы являлось начало захвата тетивы с упиранием в лук до поставки тянущей руки к ориентационной точке, во втором – от завершения первой фазы до выпуска стрелы. В отдельной серии испытуемые выполняли серию натяжений тетивы лука до произвольного отказа с максимальной интенсивностью, в анализ включали движения спортсменов, выполненные в первой и последней четверти упражнения. В другой серии стрелки выполняли удержание растянутого лука до произвольного отказа, в этом случае анализировали электроактивность скелетных мышц в начале удержания и в конце выполнения упражнения. Сравнивали параметры извлеченных мышечных синергий в фазе «расширение» при выполнении выстрелов по мишени с таковыми, выявленными при выполнении многократных натяжений тетивы лука в начальном периоде и конце упражнения. Параметры синергий, зарегистрированные при стрельбе по мишени в фазе «дотяг» сопоставляли с установленными при выполнении удержания растянутого лука в начале и конце упражнения. Таким образом, различные экспериментальные условия определялись рассмотрением особенностей мышечных синергий в соответствующих фазах выстрела из лука в условиях стрельбы по мишени, при натяжении тетивы лука и при удержании растянутого лука.

Регистрировали ЭМГ восьми поверхностных скелетных мышц туловища и верхних конечностей: поверхностного сгибателя пальцев правой кисти; общего разгибателя пальцев правой кисти; задней части правой дельтовидной; верхних и нижних пучков трапециевидной мышцы правой и левой стороны; передней части дельтовидной мышцы левой верхней конечности. Применяли биомонитор ME6000 (Финляндия), ЭМГ регистрировали с частотой дискретизации 2000 Гц. Накожные отводящие электроды располагали на двигательных точках названных мышц, межэлектродное расстояние составляло 20 мм. Для определения граничных моментов фаз рассматриваемых упражнений использовали систему 3D-видеозахвата Qualisys (Швеция), синхронизированную с биомонитором.

Зарегистрированные интерференционные ЭМГ фильтровались в диапазоне 20–450 Гц, усреднялись в интервалах 0,01 с и повторно применяли фильтр низких частот 15 Гц. Частота квантования ЭМГ сигналов и видеоряда после обработки составляла 100 Гц, данные виды сигналов были интерполированы относительно единой точки отсчета. Формировалась матрица исходных данных, включающая динамические вариационные ряды ЭМГ 8 скелетных мышц всех испытуемых, к данным в матрице применялась нормализация средним (z-нормализация). Мышечные синергии (МС) извлекали методом главных компонент (РСА). В разных экспериментальных условиях оценивали количество извлекаемых компонент (синергий), долю дисперсии, учитываемой каждым компонентом при извлечении, временную (components scores – коэффициенты мышечной активации) и пространственную (components loadings – векторы синергии) структуру мышечных синергий.

Математико-статистическая обработка данных выполнена в Statistica 10.0 и включала расчет среднего арифметического (M), ошибки среднего арифметического (m). Сравнение извлеченных синергий осуществляли с помощью анализа

кросскорреляционных функций при рассмотрении временной структуры и коэффициентов корреляции Пирсона при анализе пространственной структуры МС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из задач исследования были проанализирована пространственно-временная структура мышечных синергий при реализации выстрелов из лука по мишени. Были установлены по три мышечные синергии в обеих фазах изучаемого движения. Суммарная доля дисперсии, объясняемая извлеченными компонентами в фазе «расширение» составляла 71,5 %, в фазе «дотяг» – 69,7 %. В фазе «расширение» были выявлены синергетические паттерны активации поверхностного сгибателя пальцев правой кисти, задней части дельтовидной мышцы правой верхней конечности и нижних пучков трапециевидной мышцы правой стороны тела – первая синергия. Пространственная структура второй синергии включала активность верхних пучков трапециевидных мышц обеих сторон, третья синергия содержала ЭМГ-активность одной мышцы – передней части дельтовидной левой стороны тела. При «дотяге» в первую синергию были вовлечены поверхностный сгибатель пальцев, задняя часть дельтовидной, верхние пучки трапециевидных мышц обеих сторон и нижние пучки трапециевидной мышцы правой стороны. Вторая и третья синергии были представлены активностью общего разгибателя пальцев и передней частью дельтовидной мышцы левой верхней конечности соответственно. Динамика активности извлеченных мышечных синергий представлена на рисунке 1. Так, активность первой МС в начале выстрела незначительно снижалась, затем возрастала, достигала пика в начале фазы «дотяг» и находилась на этом уровне примерно до половины данной фазы после чего демонстрировала снижение активности. Активность второй и третьей синергии была схожей в фазе «расширение», пик их активности приходился на половину фазы. Далее активность второй МС возрастала примерно до половины фазы «дотяг» и затем снижалась до окончания выстрела (рис. 1).

При выполнении упражнения, предусматривающего многократные растяжения тетивы лука, было установлено по две МС в начале выполнения и при его завершении. Следует отметить, что доля объясняемой дисперсии в обоих периодах не превышала 57,16 %. В начале выполнения упражнения наблюдалось синергетическое взаимодействие общего разгибателя пальцев, верхних пучков трапециевидной мышцы левой стороны и передней части дельтовидной мышцы левой стороны, вторая МС включала только нижние пучки трапециевидной мышцы левой стороны тела. В конце упражнения в первую синергию оказались включены поверхностный сгибатель пальцев, общий разгибатель пальцев и нижние пучки трапециевидной мышцы левой стороны тела, а вторая синергия была представлена одной мышцей – верхними пучками трапециевидной мышцы правой стороны. Временная структура выявленных мышечных синергий в этом упражнении характеризовалась постепенным возрастанием ее активности к окончанию выстрела, что было характерно для начального периода выполнения упражнения и для периода его завершения. Вторая установленная синергия демонстрировала

постепенное возрастание активности до середины и ее снижение к окончанию выстрела.

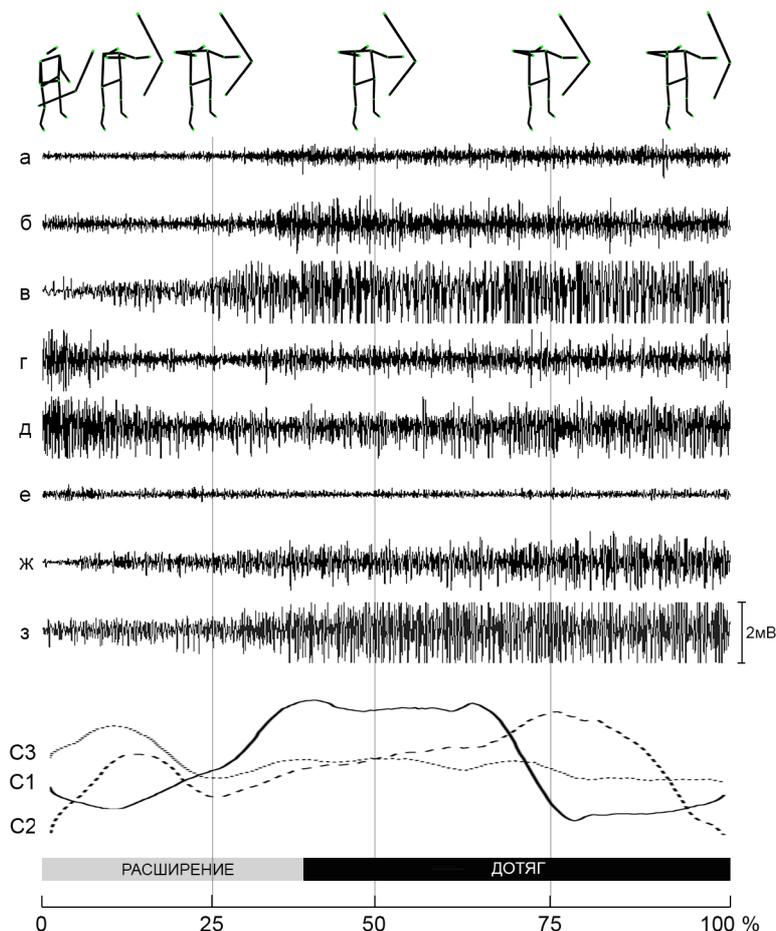


Рис. 1. Кинематограмма, электромиограммы и временная структура мышечной активации при выполнении выстрела из классического лука. а – поверхностный сгибатель пальцев кисти пр., б – общий разгибатель пальцев пр., в – задняя часть дельтовидной пр., г – верхние пучки трапецевидной пр., д – верхние пучки трапецевидной лев., е – передняя часть дельтовидной лев., ж – нижние пучки трапецевидной пр., з – нижние пучки трапецевидной лев. С1,2,3 – мышечные синергии. По оси абсцисс – прогресс выстрела.

Выявлена средняя взаимосвязь векторов первой синергий при их сравнении в условиях стрельбы по мишени и в начале выполнения упражнения по растяжению тетивы лука, коэффициенты корреляции здесь составляли $0,51 \pm 0,37$. В конце упражнения также отмечено среднее соответствие пространственной структуры первой синергии. Сопоставительный анализ первой выявленной синергии в начале и

конце выполнения упражнения показал среднюю взаимосвязь векторов МС – $0,48 \pm 0,44$. Аналогично, при сравнении пространственной структуры второй МС в разных периодах упражнения с условиями стрельбы по мишени, было установлено среднее их сходство, коэффициенты корреляции не превышали $0,45 \pm 0,35$. Примечательно, что в процессе развивающегося утомления пространственная структура второй мышечной синергии оставалась стабильной, на что указывает высокая взаимосвязь векторов МС при их сопоставлении в начале и конце упражнения – $0,87 \pm 0,35$ (рис. 2).

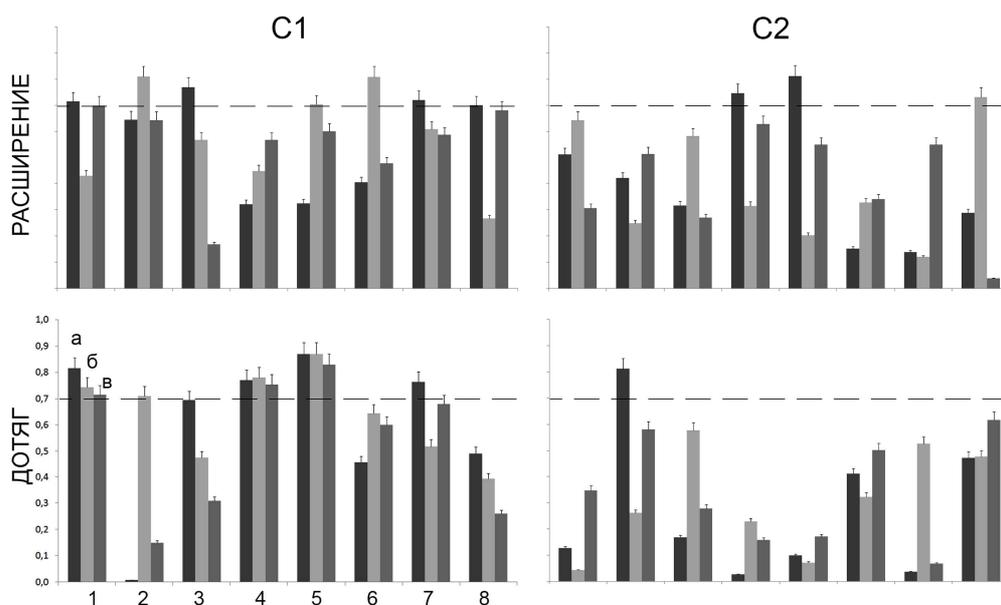


Рис. 2. Пространственная структура извлеченных мышечных синергий в различных фазах выстрела из лука при стрельбе по мишени (а), в начальном периоде специального упражнения (б), в конечном периоде специального упражнения (в). 1 – поверхностный сгибатель пальцев кисти пр., 2 – общий разгибатель пальцев пр., 3 – задняя часть дельтовидной пр., 4 – верхние пучки трапецевидной пр., 5 – верхние пучки трапецевидной лев., 6 – передняя часть дельтовидной лев., 7 – нижние пучки трапецевидной пр., 8 – нижние пучки трапецевидной лев. По оси ординат – коэффициенты синергии. С1,2 – мышечные синергии.

Сравнение коэффициентов мышечной активации первой выявленной синергии при стрельбе по мишени и в начале выполнения упражнения (растяжение тетивы лука) показало низкую их взаимосвязь, а в сравнении с окончанием упражнения – среднюю, где максимальные значения кросскорреляционных функций составляли $0,59 \pm 0,15$. В процессе развивающегося утомления временная структура изменялась в средней степени – $0,48 \pm 0,15$. При рассмотрении временной структуры второй синергии в разных экспериментальных условиях были получены схожие результаты

с первой, преимущественно, регистрировались коэффициенты кросскорреляционных функций, указывающие на среднюю воспроизводимость мышечной активности при схожих по биомеханической структуре движениях с выстрелом из лука (рис. 3).

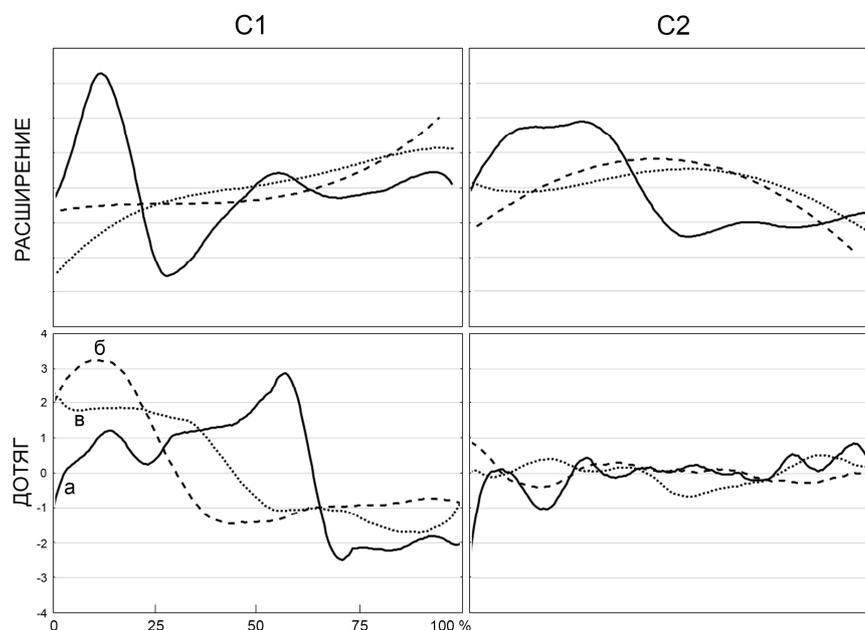


Рис. 3. Временная структура извлеченных мышечных синергий в различных фазах выстрела из лука при стрельбе по мишени (а), в начальном периоде специального упражнения (б), в конечном периоде специального упражнения (в). По оси абсцисс – прогресс упражнения, по оси ординат – коэффициенты мышечной активации (у.е.). На рисунке к данным применено отрицательное экспоненциальное сглаживание. С1,2 – мышечные синергии.

При выполнении удержания растянутого лука установлено три синергии в начале выполнения и две МС в периоде окончания упражнения. Доля объясняемой дисперсии в первом случае достигала 68,2 %, во втором – 50,06 %. Первая выявленная МС в начальном периоде включала мышцы: поверхностный сгибатель пальцев, общий разгибатель пальцев, верхние пучки трапецевидных мышцы обеих сторон. Во второй синергии можно выделить слабое взаимодействие задней части дельтовидной и нижних пучков трапецевидной мышцы правой стороны тела. Третья синергия была представлена одной мышцей – нижними пучками трапецевидной мышцей левой стороны. При завершении удержания растянутого лука первая установленная синергия включала активность поверхностного сгибателя пальцев, верхних пучков трапецевидной левой и нижних пучков трапецевидной мышц правой стороны (рис. 2). Отмечено слабое синергетическое взаимодействие общего разгибателя пальцев и нижних пучков трапецевидной мышцы – вторая синергия. Временная структура МС

при удержании растянутого лука характеризовалась относительной стабильностью обеих выявленных МС, не было выявлено резких изменений их активности в процессе реализации упражнения.

В сравнении с условиями стрельбы по мишени начальный период удержания растянутого лука характеризовался средними коэффициентами корреляции – $0,58 \pm 0,44$, была установлена высокая степень сходства пространственной структуры первой извлеченной мышечной синергии в конце выполнения удержания – $0,79 \pm 0,35$. При сравнении структуры МС в начале и конце упражнения можно отметить среднее их сходство, коэффициенты корреляции в этом случае не превышали $0,62 \pm 0,41$. Аналогичная картина наблюдалась при анализе характеристик второй извлеченной МС, а именно, отмечалось высокое их сходство в периоде окончания удержания в сравнении с условиями стрельбы по мишени – $0,77 \pm 0,35$. В других экспериментальных условиях была выявлена средняя взаимосвязь. Временная структура МС демонстрировала низкое их сходство практически во всех рассматриваемых условиях, за исключением первой синергии, где были выявлены средние коэффициенты кросскорреляционных функций при сравнении синергетических паттернов в начале и окончании удержания растянутого лука – $0,48 \pm 0,05$ (рис. 3).

Как правило, количество извлекаемых модулей (синергий), при использовании методов снижения размерности исходных данных интерпретируют как нейронную стратегию ЦНС, направленную на снижение избыточности степеней свободы. Большое количество модулей может свидетельствовать о высокой сложности движения и необходимости увеличения количества управляемых модулей со стороны управляющей системы с целью повышения стабильности параметров моторного выхода [10]. Однако на основании ранее опубликованных работ и полученных в данной работе результатов оказалось, что управление сложнокоординационным спортивным движением осуществляется не более чем тремя модулями, в то время как, например, при циклической работе регистрируется не менее пяти [11, 12]. Примечательно, что выявленное нами меньшее число МС при выполнении специальных упражнений, схожих по биомеханической структуре с отдельными фазами выстрела из лука, сопровождается снижением качества реконструкции исходных ЭМГ данных, на что указывает процент объясняемой дисперсии в каждом компоненте. На наш взгляд, такие результаты могут указывать на снижение контроля за движением со стороны управляющей системы при движениях, не имеющих явной целевой направленности, вследствие чего МС могут не иметь четкой организации.

Литературные данные указывают, что отдельные фазы сложных по координации движений включают не более двух модулей при сопоставлении синергетических эффектов во время движений, выполняемых тренированными и нетренированными людьми. Этот факт, наряду с другими закономерностями функционирования МС приводят как доказательство предположения о том, что структура двигательного действия определяет стратегию нервно-мышечного контроля. Постулируется, что при внутри- и межиндивидуальном сравнении коэффициенты активации синергий очень схожи, а векторы МС, т.е. их

компонентный состав оказывается более вариативен [13, 14, 7]. Однако, это утверждение справедливо в том случае, когда рассматривается одна двигательная модель в разных условиях. Мы изучали движения со схожим режимом мышечных сокращений и векторы МС показывали среднее сходство, а в конечном периоде удержания растянутого лука – высокое. Коэффициенты мышечной активации, наоборот, демонстрировали низкое соответствие практически во всех экспериментальных условиях. Таким образом, полученные нами данные отчасти расходятся с литературными. Вероятно, это может быть связано с тем, что использовались разные подходы к выбору рассматриваемых двигательных моделей, а именно, в наших исследованиях сопоставлялись движения с учетом режима мышечного сокращения – концентрическом и изометрическом, а критерии подбора двигательных моделей для сравнения синергетических эффектов других исследователей могли быть иными. Другая возможная причина расхождений в результатах может быть связана с общими проблемами применения различных подходов к регистрации, анализу МС, выбору методов их извлечения, предобработки исходных сигналов и прочие. Эти вопросы широко обсуждаются в литературе и до сих пор во многом остаются дискуссионными.

Второй аспект, который мы рассматривали в работе – это влияние утомления на структуру МС, извлекаемых из структуры специфических для стрельбы из лука специальных упражнений. Нами установлено, что уменьшение количества извлекаемых синергетических модулей в сравнении с условиями стрельбы по мишени сопровождается снижением качества реконструкции исходных данных. Это наблюдается при сравнении паттернов активации синергий в начале удержания растянутого лука в сравнении с периодом его завершения. В целом установленная нами пространственно-временная структура МС при утомлении демонстрировала среднюю стабильность. Такие результаты оказываются во многом схожими с таковыми при рассмотрении локомоторных и ациклических движений. Так, оказывается, что паттерны активации мышц при выполнении приседаний до утомления в течение одного исследования остаются стабильными, векторы МС, коэффициенты мышечной активации и индивидуальные значения ЭМГ-активности скелетных мышц демонстрируют высокое сходство при многодневном исследовании [15, 16, 12]. Есть результаты, показывающие изменения компонентного состава МС при утомлении, что может быть частью стратегии ЦНС по поддержанию оптимальных параметров двигательной системы [17]. Некоторые авторы приводят результаты по снижению активности МС в процессе напряженной мышечной работы как маркер надежности выявления состояния утомления [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, управление пространственно-временной структурой выстрела из лука осуществляется большим количеством управляемых модулей – синергий, в сравнении с движениями, не имеющими целевую направленность, но схожими по биомеханической структуре. В условиях развивающегося утомления пространственно-временная структура мышечных синергий остается относительно стабильной, коэффициенты мышечной активации и векторы синергии

демонстрируют умеренное сходство при их сравнении в начале выполнения изометрического усилия при удержании растянутого лука и при его завершении. Такие особенности, вероятно, являются частью нейронной стратегии ЦНС, направленной на снижение избыточности степеней свободы нервно-мышечной системы спортсмена и поддержание оптимальных параметров мышечной активности в изменяющихся условиях выполнения двигательной задачи.

Список литературы

1. Singh R. E. A systematic review on muscle synergies: from building blocks of motor behavior to a neurorehabilitation tool / R. E. Singh, K. Iqbal, G. White, et. al // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2018. – 15. – P. 1.
2. D'Avella A. Shared and specific muscle synergies in natural motor behaviors / A. d'Avella, E. Bizzi // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2005. – Vol.102, №8. – P. 3076–3081.
3. Latash M. L. Motor synergies and the equilibrium-point hypothesis / M. L. Latash // *Motor Control*. – 2010. – Vol. 14, №3. – P. 294–322.
4. Barroso F. O. Shared muscle synergies in human walking and cycling/ F. O. Barroso D. Torricelli, J. C. Moreno, et. al // *J Neurophysiol*. – 2014. – Vol. 112, №8. – P. 1984–98.
5. Kristiansen M. Inter-subject variability of muscle synergies during bench press in power lifters and untrained individuals/ M. Kristiansen, P. Madeleine, E. A. Hansen, et. al // *Scand J Med Sci Sports*. – 2015. – Vol. 25, №1. – P. 89.
6. Моисеев С. А. Особенности синергетического взаимодействия скелетных мышц при выполнении сложной координационной двигательной задачи / С. А. Моисеев, Р. М. Городничев // *Физиология человека*. – 2021. – Т.47, №1. – С. 53–62.
7. Frère J. Between-subject variability of muscle synergies during a complex motor skill / J. Frère, F. Hug // *Front Comput Neurosci*. – 2012. – Vol. 6. – P. 99.
8. Tresch M. C. Matrix factorization algorithms for the identification of muscle synergies: evaluation on simulated and experimental data sets / M. C. Tresch, V. C. Cheung, A. d'Avella // *J Neurophysiol*. – 2006. – Vol. 95, №4. – P. 2199–212.
9. Amundsen Huffmaster S. L. Muscle Synergies Obtained from Comprehensive Mapping of the Cortical Forelimb Representation Using Stimulus Triggered Averaging of EMG Activity / S. L. Amundsen Huffmaster, G. M. Van Acker, C. W. Luchies, et. al // *J Neurosci*. – 2018. – Vol. 38, №41. – P. 8759–8771.
10. Kim K. Effect of Kinetic Degrees of Freedom on Multi-Finger Synergies and Task Performance during Force Production and Release Tasks / K. Kim, D. Xu, J. Park // *Sci Rep*. – 2018. – Vol. 8, №1. – P.12758.
11. Моисеев С. А. Особенности организации процессов управления скелетными мышцами человека при локомоциях различной интенсивности / С. А. Моисеев, Е. А. Михайлова, И. В. Пискунов, и др. // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология. Химия*. – 2019. – Т.5(71). – №4. – С.79–90.
12. Hajiloo B. The effects of fatigue on synergy of selected lower limb muscles during running / B. Hajiloo, M. Anbarian, H. Esmaeili, et. al // *J Biomech*. – 2020. – Vol.103. – P.109692.
13. Santos P. D. G. Intermuscular coordination in the power clean exercise: comparison between olympic weightlifters and untrained individuals-a preliminary study / P. D. G Santos, J. R. Vaz, P. F. Correia, et. al // *Sensors (Basel)*. – 2021. – Vol.21, №5. – P.1904.
14. Bao N. T. Muscle synergy analysis in dart throwing / N. T. Bao, S. Yano, T. Kondo // *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. – 2017. – P. 2534–2537.
15. Smale K. B. Use of muscle synergies and wavelet transforms to identify fatigue during squatting / K. B. Smale, M. S. Shourijeh, D. L. Benoit // *J Electromyogr Kinesiol*. – 2016. – Vol. 28. – P.158–66.
16. Santos P. D. G. Muscle synergies reliability in the power clean exercise / P. D. G. Santos, J. R. Vaz, P. F. Correia, et. al // *J Funct Morphol Kinesiol*. – 2020. – Vol. 5, №4. – P.75.
17. Matsunaga N. Comparison of Modular Control during Side Cutting before and after Fatigue / N. Matsunaga, K. Aoki, K. Kaneoka // *Appl Bionics Biomech*. – 2021. – 8860207.

18. Ortega-Auriol P. A. Fatigue influences the recruitment, but not structure, of muscle synergies / P. A. Ortega-Auriol, T. F. Besier, W. D. Byblow, et. al // Front Hum Neurosci. – 2018. – Vol. 12. – P. 217.

MUSCLE SYNERGIES' SPATIO-TEMPORAL STRUCTURE OF HUMAN PRECISION MOVEMENTS

Moiseev S. A., Ivanov S. M.

*Velikie Luki State Academy of Physical Education and Sports, Velikie Luki, Russia
E-mail: sergey_moiseev@vlgafc.ru*

The motor synergy issue is considered in many theories which are fundamental researches performed on animals and humans. One of the muscle synergy concepts is based on the statement that motion control is provided by combining various controlled system elements into modules, and a modules' flexible combination in the nervous system, depending on the motor task complexity. However, despite the abundance of the muscle synergies researches, targeted high-coordinated movements are still poorly studied. The main goal of this study was to establish the muscle synergies spatio-temporal structure differences when performing special exercises that are similar in biomechanical structure to some phases of a targeted bow shot. It was planned to reveal the muscle synergies spatio-temporal structure changes features in some archery shot phases under developing fatigue.

The study involved 8 male classical archery athletes. Electromyograms of eight superficial trunk and upper extremities skeletal muscles were recorded with a 2kHz sampling frequency. The recorded raw electromyograms were filtered by a 20–450 Hz bandpass filter, then averaged at 0.01 s intervals, and were repeatedly processed by a 15 Hz low-pass filter. Muscle synergies were extracted by the principal component analysis method (PCA). Under different experimental conditions, the number of extracted components (synergies), the variance, described by each component during extraction, the muscle synergies temporal and spatial structure were estimated. Synergies were considered in various phases of an archery target shooting, with repeated tension of the bowstring without firing a shot, and during a stretched bow holding to failure.

It was established that the targeted complicated sports' movement control is accompanied by synergy modules number increasing to motor output parameters reliability improvement. The muscle synergies spatio-temporal structure, under developing fatigue, remains relatively stable. The muscle activation coefficients and synergy vectors show moderate similarity at the isometric effort beginning, during holding a stretched bow, and during effort completion. Such features are probably part of the central nervous system neural strategy aimed at the athlete's neuromuscular system degrees of freedom redundancy reducing and maintaining optimal muscle activity parameters during motor task conditions changing.

Keywords: muscle synergy; archery; principle component analysis, fatigue; coordination structure.

References

1. Singh R. E., Iqbal K., White G., Hutchinson T. E. A systematic review on muscle synergies: from building blocks of motor behavior to a neurorehabilitation tool. *Applied Bionics and Biomechanics*, **15**, (2018).
2. D'Avella A., Bizzi E. Shared and specific muscle synergies in natural motor behaviors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **102(8)**, 3076 (2005).
3. Latash M. L. Motor synergies and the equilibrium-point hypothesis. *Motor Control*, **14(3)**, 294 (2010).
4. Barroso F. O., Torricelli D., Moreno J. C., Taylor J., Gomez-Soriano J., Bravo-Esteban E., Piazza S., Santos C., Pons J. L. Shared muscle synergies in human walking and cycling. *J Neurophysiol*, **112(8)**, 1984 (2014).
5. Kristiansen M., Madeleine P., Hansen E. A., Samani A. Inter-subject variability of muscle synergies during bench press in power lifters and untrained individuals. *Scand J Med Sci Sports*, **25(1)**, 89 (2015).
6. Moiseev S. A., Gorodnichev R. M. Skeletal muscles synergetic interaction features during complicated coordination motor task performing. *Human physiology*, **47(1)**, 53 (2021).
7. Frère J., Hug F. Between-subject variability of muscle synergies during a complex motor skill. *Front Comput Neurosci*, **6**, 99 (2012).
8. Tresch M. C., Cheung V. C., d'Avella A. Matrix factorization algorithms for the identification of muscle synergies: evaluation on simulated and experimental data sets. *J Neurophysiol*, **95(4)**, 2199 (2006).
9. Amundsen Huffmaster S. L., Van Acker G. M. 3rd, Luchies C. W., Cheney P. D. Muscle Synergies Obtained from Comprehensive Mapping of the Cortical Forelimb Representation Using Stimulus Triggered Averaging of EMG Activity. *J Neurosci*, **38(41)**, 8759 (2018).
10. Kim K., Xu D., Park J. Effect of kinetic degrees of freedom on multi-finger synergies and task performance during force production and release tasks. *Sci Rep*, **8(1)**, 12758 (2018).
11. Moiseev S. A., Mikhailova E. A., Piskunov I. V., Bobkova E. N., Dubinin G. V., Gorodnichev R. M. Human skeletal muscles control organization processes features during various intensity locomotions. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University*, **5(4)**, 79 (2019).
12. Hajiloo B., Anbarian M., Esmaeili H., Mirzapour M. The effects of fatigue on synergy of selected lower limb muscles during running. *J Biomech*, **103**, 109692 (2020).
13. Santos P. D. G., Vaz J. R., Correia P. F., Valamatos M. J., Veloso A. P., Pezarat-Correia P. Intermuscular coordination in the power clean exercise: comparison between olympic weightlifters and untrained individuals-a preliminary study. *Sensors (Basel)*, **21(5)**, 1904 (2021).
14. Bao Nguyen Tran, Yano S, Kondo T. Muscle synergy analysis in dart throwing. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.*, 2534 (2017).
15. Smale K. B., Shourijeh M. S., Benoit D. L. Use of muscle synergies and wavelet transforms to identify fatigue during squatting. *J Electromyogr Kinesiol*, **28**, 158 (2016).
16. Santos P. D. G., Vaz J. R., Correia P. F., Valamatos M. J., Veloso A. P., Pezarat-Correia P. Muscle Synergies Reliability in the Power Clean Exercise. *J Funct Morphol Kinesiol*, **5(4)**, 75 (2020).
17. Matsunaga N., Aoki K., Kaneoka K. Comparison of modular control during side cutting before and after fatigue. *Appl Bionics Biomech*, 8860207 (2021).
18. Ortega-Auriol P. A., Besier T. F., Byblow W. D., McMorland A. J. C. Fatigue influences the recruitment, but not structure, of muscle synergies. *Front hum neurosci*, **12**, 217 (2018).