

Мештель А.В.^а,  Мирощников А.Б.,  Смоленский А.В. 

Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», Москва, Российская Федерация

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ МЫШЕЧНОГО УЧАСТИЯ ПРИ АЭРОБНЫХ УПРАЖНЕНИЯХ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Мештель Александр Виталиевич, Мирощников Александр Борисович, Смоленский Андрей Вадимович
Функциональные различия мышечного участия при аэробных упражнениях верхних и нижних конечностей

Аннотация. Современные рекомендации по развитию окислительных возможностей организма подчёркивают эффективность аэробных тренировок, однако традиционные методики, такие как велоэргометрия, преимущественно задействуют мышцы нижних конечностей, не используя весь потенциал скелетной мускулатуры. Проведённый систематический обзор был направлен на сравнительную оценку объёма мышечных групп, вовлекаемых при аэробной работе верхних и нижних конечностей, с целью выявления их вклада в кардиореспираторные и метаболические адаптации. Анализ данных 15 исследований показал, что при стандартной работе на велоэргометре задействуется мышечная масса объёмом около 6073 см³ (6,407 кг). Подключение работы верхних конечностей увеличивает суммарный объём активной мышечной ткани на 39,1% до 8449 см³ (8,913 кг). Качественный анализ литературы выявил высокий адаптационный потенциал мышц верхних конечностей, обусловленный более низким исходным соотношением митохондрий к объёму мышечных волокон, что создаёт благоприятные условия для интенсивного митохондриального биогенеза. Расчёты показывают, что комбинированная аэробная нагрузка может привести к совокупному приросту митохондриальной массы до 0,98 г, что превышает показатели изолированной тренировки нижних конечностей. Эти данные свидетельствуют о целесообразности интеграции работы верхних конечностей в аэробные тренировочные программы для более полного вовлечения скелетной мускулатуры и максимального развития окислительных способностей организма. Такой подход способствует повышению эффективности кардиореспираторных и метаболических адаптаций, увеличению аэробной мощности и улучшению функционального качества мышц.

Ключевые слова: окислительные способности, мышечный объём, митохондриальный биогенез, верхние конечности, нижние конечности, велоэргометрия.

Мештель Александр Виталиевич, Мирощников Александр Борисович, Смоленский Андрей Вадимович
Жоғарғы және төменгі қол-сауықтардағы аэробтық жаттығуларда бұғыналық мүшелік қатысудың функционалдық әрекеттері

Аңдатпа. Қазіргі ұсыныстар организмнің тотығу мүмкіндіктерін дамытуда аэробтық жаттығулардың тиімділігін атап көрсетеді. Дегенмен дәстүрлі әдістер, мысалы, велоэргометрия, негізінен төменгі қол-сауық бұлшықеттерін ғана қолданады және бұлшықет аппаратының толық потенциалын пайдаланбайды. Өткізілген жүйелі шолу жоғары және төменгі қол-сауық бұлшықеттерінің аэробтық жұмысқа қатысу көлемін салыстырмалы бағалауға бағытталды, бұл олардың кардиореспираторлық және метаболикалық адаптацияларға қосқан үлесін анықтауға мүмкіндік береді. 15 зерттеудің деректерін талдау көрсеткендей, стандартты велоэргометриялық жұмыста шамамен 6073 см³ (6,407 кг) көлемінде бұлшықет массасы қатысады. Жоғарғы қол-сауық бұлшықеттерінің жұмысын қосу белсенді бұлшықет тінінің жалпы көлемін 39,1%-ға арттырып, 8449 см³ (8,913 кг) дейін жеткізеді. Әдебиеттің сапалы талдауы жоғарғы қол-сауық бұлшықеттерінің жоғары адаптациялық потенциалы бар екенін көрсетті, бұл бұлшықет талшықтарының бастапқы митохондрия көлемінің төмен болуымен байланысты және қарқынды митохондриялық биогенез үшін қолайлы жағдай жасайды. Есептеулер көрсеткендей, біріктірілген аэробтық жүктеме митохондриялық массаның жалпы өсуін 0,98 г-ға дейін қамтамасыз ете алады, бұл тек төменгі қол-сауық бұлшықеттерін оқытумен салыстырғанда жоғары нәтиже береді. Бұл мәліметтер аэробтық жаттығу бағдарламаларына жоғарғы қол-сауық бұлшықеттерін қосу арқылы скелет бұлшықеттерін толық қамтуға және организмнің тотығу қабілеттерін барынша дамытуға қажеттілікті көрсетеді. Мұндай тәсіл кардиореспираторлық және метаболикалық адаптациялардың тиімділігін арттыруға, аэробтық қуатты жоғарылатуға және бұлшықеттердің функционалдық сапасын жақсартуға ықпал етеді.

Түйін сөздер: тотығу қабілеттері, бұлшықет көлемі, митохондриялық биогенез, жоғарғы қол-сауық, төменгі қол-сауық, велоэргометрия.

Meshtel Alexander Vitalievich, Miroshnikov Alexander Borisovich, Smolensky Andrey Vadimovich
Functional differences in muscle engagement during aerobic exercises of the upper and lower limbs

Abstract. Current recommendations for enhancing the oxidative capacity of the body emphasize the effectiveness of aerobic training. However, traditional methods, such as cycling ergometry, primarily engage the muscles of the lower limbs, without utilizing the full potential of the skeletal musculature. This systematic review aimed to

comparatively assess the volume of muscle groups involved in aerobic activity of the upper and lower limbs, in order to evaluate their contribution to cardiorespiratory and metabolic adaptations. Analysis of 15 studies revealed that standard cycling ergometer exercise involves approximately 6073 cm³ (6.407 kg) of muscle mass. Incorporating the activity of the upper limb muscles increases the total volume of active muscle tissue by 39.1%, reaching 8449 cm³ (8.913 kg). Qualitative literature analysis identified a high adaptive potential of the upper limb muscles, associated with their lower baseline mitochondrial-to-muscle fiber volume ratio, creating favorable conditions for intensive mitochondrial biogenesis. Calculations indicate that combined aerobic exercise can lead to a total increase in mitochondrial mass of up to 0.98 g, exceeding the effects of isolated lower-limb training. These findings support the inclusion of upper limb work in aerobic training programs to more fully engage the skeletal musculature and maximize the development of the body's oxidative capacity. Such an approach contributes to enhanced cardiorespiratory and metabolic adaptations, increased aerobic power, and improved functional quality of muscles.

Key words: oxidative capacity, muscle volume, mitochondrial biogenesis, upper limbs, lower limbs, cycling ergometer.

Введение. Окислительные способности организма рассматриваются как один из интегральных показателей состояния здоровья, функционального качества скелетной мускулатуры и общего уровня физической работоспособности, тесно связанный с показателями качества жизни. Высокий уровень аэробного метаболизма ассоциирован с более эффективным энергообеспечением мышечной деятельности, качеством мышц, метаболической устойчивостью и снижением риска кардиометаболических нарушений. В этом контексте окислительный потенциал мышечной ткани может рассматриваться не только как характеристика спортивной подготовленности, но и как физиологический маркер функционально-долголетия и соматического благополучия.

Современные рекомендации по развитию и поддержанию окислительных возможностей организма подчёркивают ключевую роль систематической аэробной физической активности как одного из ведущих факторов повышения аэробной производительности и функционального резерва кардиореспираторной системы. Аэробные упражнения индуцируют выраженные структурно-функциональные перестройки скелетной мускулатуры, включая увеличение объёма митохондриального аппарата, активности окислительных ферментов и плотности капиллярной сети [1]. Эти адаптации носят преимущественно локальный характер, формируясь в мышцах, непосредственно вовлечённых в выполняемую двигательную деятельность, что подчёркивает зависимость величины и направленности окислительных перестроек от объёма и распределения активной мышечной массы [2].

С этих позиций принципиальное значение приобретает количественная оценка совокупного объёма мышц, участвующих в аэробной работе, особенно при сопоставлении двигательных режимов с доминирующим участием мышц нижних конечностей и упражнений, вовлекающих как нижние, так и верхние конечности.

Традиционная ориентация аэробных программ преимущественно на нагрузку для ног (бег, велоэргометрия) объективно ограничивает спектр локальных окислительных адаптаций, формируя их преимущественно в мышцах нижних конечностей, тогда как мышцы верхних конечностей и плечевого пояса остаются лишены аэробной нагрузки больший период времени [1, с. 1716].

Таким образом, необходимость тренировки как мышц нижних, так и верхних конечностей следует рассматривать как логическое следствие локального характера окислительных адаптаций и зависимости их выраженности от объёма вовлечённой мышечной массы. Такой подход формирует научную основу для конструирования комплексных аэробных тренировочных программ, направленных на максимизацию митохондриальной функции, капилляризации и общей окислительной способности организма, что имеет принципиальное значение как для спортивной практики, так и для прикладной и клинической физиологии. Определение совокупного объёма мышц, участвующих в работе при тренировке верхних и нижних конечностей, позволит объективно оценить вклад различных двигательных паттернов в формирование адаптационных реакций организма.

Цель исследования: систематический анализ и обобщение данных о сравнительном объёме мышечных групп, вовлекаемых в работу при аэробных тренировках верхних и нижних конечностей, для оценки потенциального вклада различных двигательных паттернов в формирование кардиореспираторных и метаболических адаптаций.

Задачи исследования:

Провести систематический анализ и количественную оценку совокупного объёма мышечной массы, вовлекаемой в аэробную работу при изолированной нагрузке на нижние и верхние конечности.

На основе качественного анализа литературы оценить адаптационный потенциал (в контек-

сте митохондриального биогенеза и мышечной микроциркуляции) мышечных групп верхних конечностей в сравнении с нижними и определить теоретический вклад их включения в тренировку в общее повышение окислительных способностей организма.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе кафедры спортивной медицины Российского университета спорта «ГЦОЛИФК» с августа по ноябрь 2025 года. Обзор проводился согласно предпочтительным элементам отчетности для систематических обзоров и мета-анализов, расширение для обзоров предметного поля (англ. Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses Extension for Scoping Reviews, PRISMA-ScR) [3].

Критерии включения источников предусматривали анализ публикаций, опубликованных за последние 20 лет на английском и русском языках. В обзор включались оригинальные исследования, систематические обзоры, мета-анализы и диссертационные работы, содержащие количественные данные об объеме мышечных групп верхних и/или нижних конечностей, задействованных при

выполнении аэробных упражнений и оценённых с использованием метода магнитно-резонансной томографии (МРТ). Поиск литературы осуществлялся в электронных базах данных PubMed, Epistemonikos, MedNar и Cochrane Library, а также дополнялся ручным анализом списков литературы включённых публикаций. Стратегия поиска основывалась на комбинациях ключевых терминов, отражающих объём и гипертрофию мышечной ткани, а также биомеханические аспекты аэробных движений, включая педалирование.

Отбор источников доказательств проводился двумя независимыми исследователями и включал два последовательных этапа: первичный скрининг заголовков и аннотаций, за которым следовала оценка полнотекстовых публикаций на соответствие установленным критериям включения.

Результаты. В результате поиска было найдено 1755 исследований, из которых всего 15 вошли в обзор. Из них 6 РКИ [4- 9], 7 перекрестных исследований [10-16] и 2 когортных исследования [17, 18]. Результаты поиска представлены на рисунке 1.

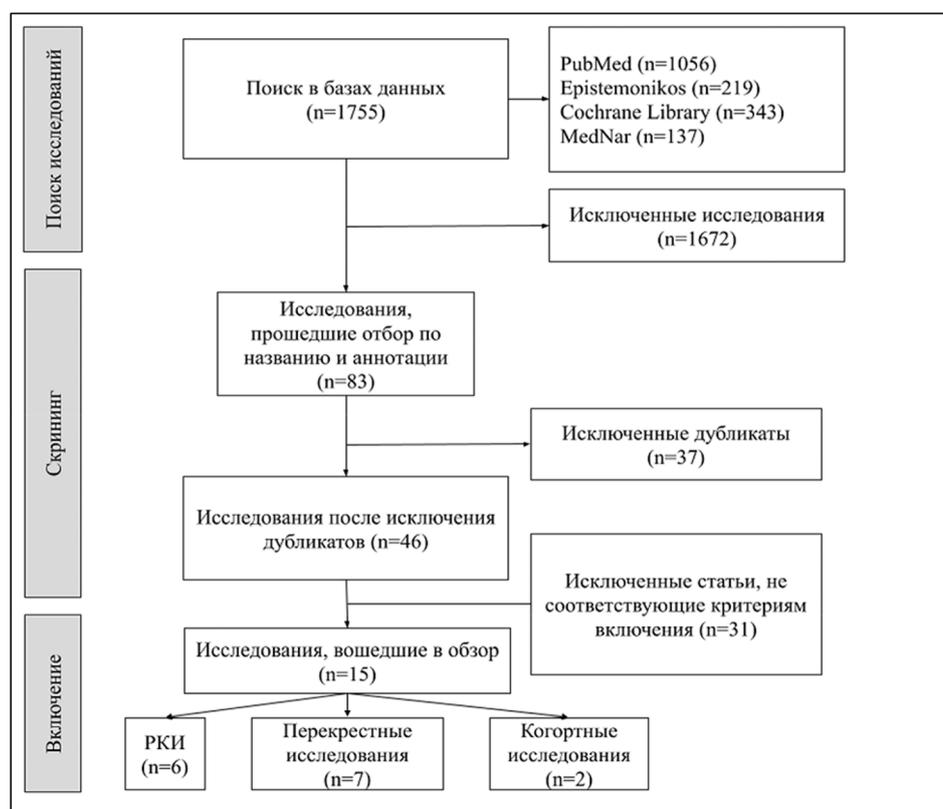


Рисунок – Результаты поиска и отбора исследований для включения в обзор. Примечание: РКИ – рандомизированные контролируемые исследования. (Рисунок составлен авторами)

Анализ мышечных групп, вовлекаемых при выполнении работы на велоэргометре, позволяет провести количественную оценку их суммарного объёма. С позиций динамической анатомии акт педалирования представляет собой циклическую последовательность четырёх взаимосвязанных движений, каждое из которых реализуется за счёт координированной активности крупных мышечных комплексов нижних конечностей. Сгибание бедра обеспечивается преимущественно за счёт функционирования *m. tensor fasciae latae*, *m. iliopsoas*, *m. pectineus* и *m. sartorius*; сгибание голени осуществляется при участии *m. semitendinosus*, *m. semimembranosus*, *m. biceps*

femoris, *m. gastrocnemius* и *m. popliteus*. Разгибание бедра реализуется посредством активности *m. gluteus maximus* и *m. adductor magnus*, тогда как разгибание голени обеспечивается работой *m. quadriceps femoris*. Помимо этого, в процессе педалирования значительную роль играют мышцы, обеспечивающие стабилизацию положения стопы, в частности *m. tibialis anterior* и *m. soleus* [19-22]. Согласно данным исследований, посвящённых количественной оценке объёма отдельных мышечных групп, суммарный объём мышц нижних конечностей, участвующих в процессе педалирования, в среднем составляет около 6073 см³ (табл. 1).

Таблица 1 – Средние значения объёма мышц нижних конечностей, задействованных при вращении педалей

Мышцы	Средний объем (см ³)*	Источники
<i>m. quadriceps femoris</i>	2015	[6, 13, 9]
<i>m. gluteus maximus</i>	954	[6, 13]
<i>m. adductor magnus</i>	666	[4, 6, 13, 8]
<i>m. iliopsoas</i>	458	[6, 13]
<i>m. soleus</i>	421	[4-6, 8]
<i>m. biceps femoris</i>	315	[4, 6, 13, 7, 9]
<i>m. gastrocnemius</i>	316	[4-6, 8]
<i>m. semimembranosus</i>	253	[4, 6, 13, 9]
<i>m. tibialis anterior</i>	190	[4, 6, 8]
<i>m. semitendinosus</i>	177	[4 6, 13, 9]
<i>m. sartorius</i>	158	[4, 6-9, 13]
<i>m. tensor fasciae latae</i>	72	[6, 13]
<i>m. pectineus</i>	61	[6, 8, 13]
<i>m. popliteus</i>	19	[6, 7, 13]

Примечание: * – средние значения объёма рассчитаны на основании совокупности данных, полученных из литературных источников.

Обсуждение. На основе совокупных данных, полученных из литературных источников, можно оценить массу мышц, вовлечённых в работу на велоэргометре. Так, согласно Engelke и соавторам [23], физическая плотность мышечной ткани составляет 1,055 г×см³. Следовательно, при выполнении педалирования нижними конечностями в работу вовлекается примерно 6,407 кг мышечной массы, значительная часть которой обладает выраженной окислительной способностью. В частности, *m. soleus* содержит

около 88% волокон типа I, характеризующихся высокой митохондриальной плотностью и устойчивостью к утомлению [24]. Тем не менее, несмотря на значительный объём задействованных мышц, данный вид тренировки охватывает лишь часть потенциала скелетной мускулатуры. Аналогично, при рассмотрении педалирования с использованием верхних конечностей возможно определить суммарный объём активируемых мышечных групп. Процесс вращения педалей руками включает четыре основных

движения: сгибание плеча, осуществляемое с участием *m. pectoralis major*, *m. deltoideus* и *m. coracobrachialis*; разгибание предплечья, выполняемое благодаря работе *m. triceps brachii* и *m. anconeus*; разгибание плеча, обеспечиваемое активностью *m. teres major*, *m. teres minor*, *m. infraspinatus*, *m. deltoideus* и *m. latissimus dorsi*; а также сгибание предплечья, при котором задействуются *m. biceps brachii*, *m. brachialis*, *m. brachioradialis* и *m. pronator teres*. Кроме того,

в движении участвуют мышцы, обеспечивающие протракцию и ретракцию пояса верхних конечностей – *m. pectoralis minor*, *m. trapezius*, *m. rhomboideus major*, *m. rhomboideus minor* и *m. serratus anterior* [25, 26]. Согласно имеющимся литературным данным, суммарный объём мышц, вовлекаемых в процесс вращения педалей руками, составляет приблизительно 2376 см³, что эквивалентно 2,506 кг мышечной массы (табл. 2).

Таблица 2 – Средние значения объёма мышц верхних конечностей, задействованных при вращении педалей

Мышцы	Средний объем (см ³)*	Источники
<i>m. deltoideus</i>	374	[10, 12, 14, 16, 17]
<i>m. triceps brachii</i>	327	[10, 12, 14, 17-18]
<i>m. trapezius</i>	278	[14, 16]
<i>m. latissimus dorsi</i>	261	[10, 12, 15-17]
<i>m. pectoralis major</i>	254	[10, 12, 14, 16, 17]
<i>m. serratus anterior</i>	199	[14, 16]
<i>m. biceps brachii</i>	125	[10, 12, 14-18]
<i>m. brachialis</i>	112	[12, 15, 17, 18]
<i>m. infraspinatus</i>	102	[10-12, 14, 17, 16]
<i>m. teres major</i>	71,4	[10, 12, 14, 16, 17]
<i>m. rhomboideus major</i>	56	[14, 16]
<i>m. brachioradialis</i>	50	[12, 15-18]
<i>m. pectoralis minor</i>	47	[14, 16]
<i>m. pronator teres</i>	32	[12, 14, 17, 18]
<i>m. coracobrachialis</i>	28	[10, 12, 14-17]
<i>m. rhomboideus minor</i>	28	[16]
<i>m. anconeus</i>	9	[12, 17]

Примечание: * – средние значения объема рассчитаны на основании совокупности данных, полученных из литературных источников

Таким образом, включение мышц верхних конечностей в стандартную тренировку на велоэргометре позволяет увеличить общий объём вовлечённой мышечной массы примерно на 39,1%. Расширение задействованной мускулатуры способствует более выраженному развитию окислительных возможностей организма, ускоряя метаболическую адаптацию и улучшая показатели кардиореспираторной выносливости. Поскольку исходное соотношение митохондрий

к объёму мышечных волокон в руках ниже, это создаёт благоприятные условия для значительной митохондриальной адаптации при систематических тренировках. Согласно данным Pesta и соавторов [27], концентрация митохондрий в нетренированной мышце в среднем составляет 5–6%, тогда как регулярные аэробные тренировки способны увеличить этот показатель до 11%. При этом масса митохондрий в мышцах нижних конечностей может возрасти с 0,32 г до 0,7 г, а

тренировка верхних конечностей повышает её с 0,13 г до 0,28 г. Совокупный прирост митохондриальной массы при вовлечении обеих групп мышц достигает около 0,98 г, что демонстрирует потенциал комбинированной аэробной нагрузки для повышения эффективности антигипертензивной терапии [28].

Высокая адаптационная способность мышц верхних конечностей подтверждается исследованием Örtengren и соавторов [29], где показано, что у элитных лыжников митохондриальный объём и капиллярная плотность в мышцах рук и ног сопоставимы. При этом в мышцах верхних конечностей наблюдается относительно большее количество волокон с тяжёлой цепью миозина II типа и более крупные волокна типа ПА, что свидетельствует о способности метаболических характеристик мышечных волокон изменяться без необходимости модификации изоформ миозина, определяющего тип сокращения. Не случайно представители лыжных дисциплин демонстрируют одни из самых высоких показателей максимального потребления кислорода (МПК) среди всех видов спорта: у мужчин значения достигают 84–87 мл×мин⁻¹×кг⁻¹ [30, 31]. Такой уровень аэробной производительности, вероятно, связан с одновременной активной работой мышц как верхних, так и нижних конечностей. Дополнительное подтверждение этому получено в исследовании Berg и соавторов (2019) [32], где у элитных лыжников митохондриальное дыхание в *m. triceps brachii* превышало аналогичный показатель в *m. vastus lateralis*, что указывает на идентичный уровень активности митохондрий

ального аппарата в мышцах верхних и нижних конечностей. В контрольной группе (физически активные мужчины) наблюдалась обратная тенденция: митохондриальное дыхание в *m. triceps brachii* было существенно ниже, тогда как дыхательная активность в *m. vastus lateralis* оставалась сопоставимой с показателями лыжников.

Заключение. Проведённый обзор показывает, что традиционные аэробные тренировки, ориентированные преимущественно на работу мышц нижних конечностей, не полностью используют потенциал скелетной мускулатуры для оптимизации кардиореспираторных и метаболических адаптаций. Установлено, что при стандартной работе на велоэргометре вовлекается мышечная масса объёмом около 6073 см³ (6,407 кг), тогда как включение мышц верхних конечностей увеличивает суммарный объём активной мышечной ткани на 39,1% до 8449 см³ (8,913 кг). Полученные данные подчеркивают целесообразность интеграции работы верхних конечностей в аэробные тренировочные программы для более полного вовлечения мышечной массы и максимизации развития окислительных способностей организма. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка и валидация комбинированных аэробных протоколов, оптимизированных с учётом объёма вовлекаемых мышечных групп и их метаболического потенциала, с целью повышения эффективности адаптационных и функциональных изменений скелетной мускулатуры.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы / References

- Liu Y, Christensen P.M, Hellsten Y, Gliemann L. Effects of Exercise Training Intensity and Duration on Skeletal Muscle Capillarization in Healthy Subjects: A Meta-analysis // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2022. – №54(10). – pp. 1714–1728. - DOI: 10.1249/MSS.0000000000002955
- Mølmen K.S., Almquist N.W., Skattebo Ø. Effects of Exercise Training on Mitochondrial and Capillary Growth in Human Skeletal Muscle: A Systematic Review and Meta-Regression // *Sports Medicine*. – 2025. – №55(1). – pp.115-144. - DOI: 10.1007/s40279-024-02120-2.
- Tricco A.C., Lillie E., Zarin W., O'Brien K.K., Colquhoun H., Levac D., Moher D., Peters M.D.J., Horsley T., Weeks L., Hempel S., Akl E.A., Chang C., McGowan J., Stewart L., Hartling L., Aldcroft A., Wilson M.G., Garrity C., Lewin S., Godfrey C.M., Macdonald M.T., Langlois E.V., Soares-Weiser K., Moriarty J., Clifford T., Tunçalp Ö., Straus S.E. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation // *Annals of Internal Medicine*. – 2018. – №169(7). – pp. 467–473. - DOI: 10.7326/M18-0850.
- Belavý D.L., Miokovic T., Rittweger J., Felsenberg D. Estimation of changes in volume of individual lower-limb muscles using magnetic resonance imaging (during bed-rest) // *Physiological Measurement*. – 2011. – №32(1). – pp. 35–50. - DOI: 10.1088/0967-3334/32/1/003.
- Commean P.K., Tuttle L.J., Hastings M.K., Strube M.J., Mueller M.J. Magnetic resonance imaging measurement reproducibility for calf muscle and adipose tissue volume // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. – 2011. – №34(6). – pp. 1285–1294. - DOI: 10.1002/jmri.22791.
- Fuchs C.J., Kuipers R., Rombouts J.A., Brouwers K., Schrauwen-Hinderling V.B., Wildberger J.E., Verdijk L.B., van Loon L.J.C. Thigh muscles are more susceptible to age-related muscle loss when compared to lower leg and pelvic muscles //

- Experimental Gerontology. – 2023. – №175. – Art.112159. - DOI: 10.1016/j.exger.2023.112159.
- 7 Maeo S., Balshaw T.G., Nin D.Z., Mc Dermott E.J., Osborne T., Cooper N.B., Massey G.J., Kong P.W., Pain M.T.G., Folland J.P. Hamstrings Hypertrophy Is Specific to the Training Exercise: Nordic Hamstring versus Lengthened State Eccentric Training // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2024. – №56(10). – pp. 1893–1905. - DOI: 10.1249/MSS.0000000000003490.
 - 8 Miokovic T., Armbrecht G., Gast U., Rawer R., Roth H.J., Runge M., Felsenberg D., Belavý D.L. Muscle atrophy, pain, and damage in bed rest reduced by resistive (vibration) exercise // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2014. – №46(8). – pp. 1506–1516. - DOI: 10.1249/MSS.0000000000000279.
 - 9 Shiotani H., Nishino Y., Ichinose H., Kawakami Y. Effects of Postural Conditions During Magnetic Resonance Imaging on Thigh Muscle Size // *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. – 2024. – №34(11). – Art.14760. - DOI: 10.1111/sms.14760.
 - 10 Bassett R.W., Browne A.O., Morrey B.F., An K.N. Glenohumeral muscle force and moment mechanics in a position of shoulder instability // *Journal of Biomechanics*. – 1990. – №23(5). – pp. 405–415. - DOI: 10.1016/0021-9290(90)90295-e.
 - 11 Chen J.J. Quantitative architectural analysis of human upper-extremity muscles: PhD dissertation. – University of Virginia, 1988.
 - 12 Holzbaur K.R., Murray W.M., Gold G.E., Delp S.L. Upper limb muscle volumes in adult subjects // *Journal of Biomechanics*. – 2007. – №40(4). – pp. 742–749. - DOI: 10.1016/j.jbiomech.2006.11.011.
 - 13 Lube J., Cotofana S., Bechmann I., Milani T.L., Özkurtul O., Sakai T., Steinke H., Hammer N. Reference data on muscle volumes of healthy human pelvis and lower extremity muscles: an in vivo magnetic resonance imaging feasibility study // *Surgical and Radiologic Anatomy*. – 2016. – №38(1). – pp. 97–106. - DOI: 10.1007/s00276-015-1524-6.
 - 14 Veeger H.E., Van der Helm F.C., Van der Woude L.H., Pronk G.M., Rozendal R.H. Inertia and muscle contraction parameters for musculoskeletal modelling of the shoulder mechanism // *Journal of Biomechanics*. – 1991. – №24(7). – pp. 615–629. - DOI: 10.1016/0021-9290(91)90294-w.
 - 15 Veeger H.E., Yu B., An K.N., Rozendal R.H. Parameters for modeling the upper extremity // *Journal of Biomechanics*. – 1997. – №30(6). – pp. 647–652. - DOI: 10.1016/s0021-9290(97)00011-0.
 - 16 Wood J.E., Meek S.G., Jacobsen S.C. Quantitation of human shoulder anatomy for prosthetic arm control. Surface modelling // *Journal of Biomechanics*. – 1989. – №22(3). – pp. 273–292. - DOI: 10.1016/0021-9290(89)90094-8.
 - 17 Vidt M.E., Daly M., Miller M.E., Davis C.C., Marsh A.P., Saul K.R. Characterizing upper limb muscle volume and strength in older adults: a comparison with young adults // *Journal of Biomechanics*. – 2012. – №45(2). – pp. 334–341. - DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.10.007.
 - 18 Winters J.M., Stark L. Estimated mechanical properties of synergistic muscles involved in movements of a variety of human joints // *Journal of Biomechanics*. – 1988. – №21(12). – pp. 1027–1041. - DOI: 10.1016/0021-9290(88)90249-7.
 - 19 Diefenthaeler F., Coyle E.F., Bini R.R., Carpes F.P., Vaz M.A. Muscle activity and pedal force profile of triathletes during cycling to exhaustion // *Sports Biomechanics*. – 2012. – №11(1). – pp. 10–19. - DOI: 10.1080/14763141.2011.637125.
 - 20 Hug F., Bendahan D., Le Fur Y., Cozzone P.J., Grélot L. Heterogeneity of muscle recruitment pattern during pedaling in professional road cyclists: a magnetic resonance imaging and electromyography study // *European Journal of Applied Physiology*. – 2004. – №92(3). – pp. 334–342. - DOI: 10.1007/s00421-004-1096-3.
 - 21 Lai A.K.M., Dick T.J.M., Brown N.A.T., Biewener A.A., Wakeling J.M. Lower-limb muscle function is influenced by changing mechanical demands in cycling // *Journal of Experimental Biology*. – 2021. – №224(Pt. 3). – P.jeb228221. - DOI: 10.1242/jeb.228221.
 - 22 Pouliquen C., Nicolas G., Bideau B., Bideau N. Impact of Power Output on Muscle Activation and 3D Kinematics During an Incremental Test to Exhaustion in Professional Cyclists // *Frontiers in Sports and Active Living*. – 2021. – №2. – Art. 516911. - DOI: 10.3389/fspor.2020.516911.
 - 23 Engelke K., Museyko O., Wang L., Laredo J.D. Quantitative analysis of skeletal muscle by computed tomography imaging-State of the art // *Journal of Orthopaedic Translation*. – 2018. – №15. – pp. 91–103. - DOI: 10.1016/j.jot.2018.10.004.
 - 24 Hamilton M.T., Hamilton D.G., Zderic T.W. A potent physiological method to magnify and sustain soleus oxidative metabolism improves glucose and lipid regulation // *iScience*. – 2022. – №25(9). – Art. 104869. - DOI: 10.1016/j.isci.2022.104869.
 - 25 Bafghi H.A., de Haan A., Horstman A., van der Woude L. Biophysical aspects of submaximal hand cycling // *International Journal of Sports Medicine*. – 2008. – №29(8). – pp. 630–638. - DOI: 10.1055/s-2007-989416.
 - 26 Vigouroux L., Cartier T., Rao G. Influence of Pedal Interface During Pedaling With the Upper Versus Lower Limbs: A Pilot Analysis of Torque Performance and Muscle Synergies // *Motor Control*. – 2024. – №28(3). – pp. 305–325. - DOI: 10.1123/mc.2023-0112.
 - 27 Pesta D. Mitochondrial density in skeletal and cardiac muscle // *Mitochondrion*. – 2024. – №75. – pp.101838. - DOI: 10.1016/j.mito.2023.101838
 - 28 Eirin A., Lerman A., Lerman L.O. Mitochondrial injury and dysfunction in hypertension-induced cardiac damage // *European Heart Journal*. – 2014. – №35(46). – pp. 3258–3266. - DOI: 10.1093/eurheartj/ehu436.
 - 29 Ørtenblad N., Nielsen J., Boushel R., Söderlund K., Saltin B., Holmberg H.C. The Muscle Fiber Profiles, Mitochondrial Content, and Enzyme Activities of the Exceptionally Well-Trained Arm and Leg Muscles of Elite Cross-Country Skiers // *Frontiers in Physiology*. – 2018. – №9. – pp. 1031. - DOI: 10.3389/fphys.2018.01031.
 - 30 Sandbakk Ø., Hegge A.M., Losnegard T., Skattebo Ø., Tønnessen E., Holmberg H.C. The Physiological Capacity of the World’s Highest Ranked Female Cross-country Skiers // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2016. – №48(6). – pp. 1091–1100. - DOI: 10.1249/MSS.0000000000000862.
 - 31 Losnegard T., Hallén J. Physiological differences between sprint- and distance-specialized cross-country skiers // *International Journal of Sports Physiology and Performance*. – 2014. – №9(1). – pp. 25–31. - DOI: 10.1123/ijsp.2013-0066.
 - 32 Berg J., Undebakke V., Rasch-Halvorsen Ø., Aakerøy L., Sandbakk Ø., Tjønnå A.E. Comparison of Mitochondrial Respiration in M. triceps brachii and M. vastus lateralis Between Elite Cross-Country Skiers and Physically Active Controls // *Frontiers in Physiology*. – 2019. – №10. – Art. 365. - DOI: 10.3389/fphys.2019.00365.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ // АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ // INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

^aАвтор для корреспонденции (первый автор)

Мештель Александр Виталиевич – преподаватель, Российский Университет Спорта «ГЦОЛИФК», г. Москва, Российская Федерация.

^aХат-хабарларгаарналган автор (бірінші автор)

Мештель Александр Виталиевич – оқытушы, «ГЦОЛИФК» Ресей Спорт Университеті, Мәскеу қ., Ресей Федерациясы.

^aThe Author for Correspondence (The First Author)

Meshtel Alexander Vitalievich – lecturer, Russian University of Sport “GTSOLIFK”, Moscow, Russian Federation.

e-mail: meshtel.author@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4982-5615>

Мирошников Александр Борисович – доктор биологических наук, доцент, Российский Университет Спорта «ГЦОЛИФК», г. Москва, Российская Федерация.

Мирошников Александр Борисович – биология ғылымдарының докторы, доцент, «ГЦОЛИФК» Ресей Спорт Университеті, Мәскеу қ., Ресей Федерациясы.

Miroshnikov Alexander Borisovich – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Russian University of Sport “GTSOLIFK”, Moscow, Russian Federation.

e-mail: benedikt116@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4030-0302>

Смоленский Андрей Вадимович – доктор медицинских наук, профессор, Российский Университет Спорта «ГЦОЛИФК», г. Москва, Российская Федерация.

Смоленский Андрей Вадимович – медицина ғылымдарының докторы, профессор, «ГЦОЛИФК» Ресей Спорт Университеті, Мәскеу қ., Ресей Федерациясы.

Smolensky Andrey Vadimovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian University of Sport “GTSOLIFK”, Moscow, Russian Federation.

e-mail: smolensky52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5663-9936>

Дата поступления статьи: 23.01.2026

Дата принятия к публикации: 05.02.2026