

DOI: 10.17238/ISSN2223-2524.2019.4.25

УДК: 796.015.52

## Влияние высокоинтенсивной интервальной тренировки на гипертрофию, силу и окислительные способности рабочих мышц спортсменов силовых видов спорта: поперечное исследование

*А.Б. Мирошников, В.В. Волков, А.В. Смоленский*

*ФГБОУ ВО Российский государственный университет физической культуры, спорта, молодежи и туризма, Министерство спорта РФ, Москва, Россия*

### РЕЗЮМЕ

**Цель исследования:** оценить влияние высокоинтенсивной работы на окислительные способности, силу и гипертрофию рабочих мышц у спортсменов силовых видов спорта. **Материалы и методы:** обследованы 35 представителей силовых видов спорта (пауэрлифтинг), средний возраст спортсменов-мужчин –  $30 \pm 5,4$  лет. Используются методы: газометрический анализ (определение анаэробного порога и частоты сердечных сокращений на этом уровне, максимальное потребление кислорода и мощности педалирования на максимальном потреблении кислорода, потребление кислорода на анаэробном пороге и максимальном потреблении кислорода), ультразвукографические измерения анатомической площади поперечного сечения четырехглавой мышцы бедра, оценка максимальной произвольной силы четырехглавой мышцы бедра и методы математической статистики. Спортсмены 3 раза в неделю (120 дней) выполняли тренировку на велоэргометре по следующему протоколу: 7 интервалов на мощности педалирования 100% от максимального потребления кислорода по 2 минуты и интервалы с частотой сердечных сокращений на уровне 85% от анаэробного порога продолжительностью 2 минуты. **Результаты:** после 120 дней тренировок достоверно у спортсменов силовых видов спорта увеличилась на анаэробном пороге мощность работы и потребление кислорода на 22,7 и 14,5% соответственно, а также мощность работы и потребление кислорода на уровне максимального потребления кислорода на 18,5 и 13,6%, соответственно. Также регулярные высокоинтенсивные тренировки на велоэргометре вызывают мышечно-специфическую гипертрофию, что приводит к региональным изменениям четырехглавой мышцы бедра и росте ее силы на 6,5%. **Выводы:** разработанный тренировочный протокол аэробной работы, позволит атлетам эффективно и безопасно влиять на окислительные способности рабочих мышц, при этом не теряя основные силовые показатели.

**Ключевые слова:** гипертрофия, пауэрлифтинг, силовые виды спорта

**Для цитирования:** Мирошников А.Б., Волков В.В., Смоленский А.В. Влияние высокоинтенсивной интервальной тренировки на гипертрофию, силу и окислительные способности рабочих мышц спортсменов силовых видов спорта: поперечное исследование // Спортивная медицина: наука и практика. 2019. Т.9, №4. С. 25-32. DOI: 10.17238/ISSN2223-2524.2019.4.25.

## The effect of high-intensity interval training on hypertrophy, strength and oxidative capacity of active muscles in power sports athletes: a cross-sectional study

*Alexander B. Miroshnikov, Vasily V. Volkov, Andrey V. Smolensky*

*Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

**Objective:** the purpose of the study was to evaluate how high-intensity interval training affects strength, oxidative capacity and hypertrophy of working muscles in power sports athletes. **Materials and methods:** the study included 35 male power sports athletes (powerlifting), the average age was  $30 \pm 5,4$  years. Metabolic exhaled gas analysis (determination of the anaerobic threshold and heart rate, maximum oxygen consumption and pedaling power at the maximum oxygen consumption, oxygen consumption at the anaerobic threshold and maximum oxygen consumption), ultrasonographic measurements of the anatomical cross-sectional area of the quadriceps femoris, the assessment of the maximum strength of the quadriceps femoris and methods of mathematical statistics were utilized. Athletes were subject to bicycle ergometry testing 3 times a week during 120 days according to the following protocol: 7 intervals with pedaling power of 100% of the maximum oxygen consumption for 2 min, and intervals with a heart rate of 85% of the anaerobic threshold for 2 min. **Results:** after 120 days of training, power athletes significantly increased the anaerobic threshold, power and

oxygen consumption by 22,7 and 14,5%, respectively, as well as power and oxygen consumption at the level of maximum oxygen consumption by 18,5 and 13,6%, respectively. Regular high-intensity training on a bicycle ergometer causes muscle-specific hypertrophy, which leads to regional changes in the quadriceps femoris muscle and an increase in its strength by 6,5%. **Conclusions:** the aerobic workout training protocol that we developed allows athletes to effectively and safely increase the oxidizing capacities of active muscles, while not losing their main strength indicators.

**Key words:** hypertrophy, powerlifting, power sports

**For citation:** Miroshnikov AB, Volkov VV, Smolensky AV. The effect of high-intensity interval training on hypertrophy, strength and oxidative capacity of active muscles in power sports athletes: a cross-sectional study. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika (Sports medicine: research and practice)*. 2019;9(4):25-32. Russian. DOI: 10.17238/ISSN2223-2524.2019.4.25.

### 1. Введение

Хорошо известно, что низкие показатели работоспособности при велоэргометрическом тестировании связаны с повышенной смертностью в том числе и от сердечно-сосудистых заболеваний, а также с повышенным риском диагностики в будущем ишемической болезни сердца, сердечной недостаточности и ранней госпитализации [1]. Также известно, что силовая тренировка увеличивает размер гликолитических мышечных волокон с одновременным уменьшением содержания окислительных ферментов, плотности капилляров, митохондрий и развитием концентрической гипертрофии левого желудочка – все это может быть причиной развития гипертонической болезни у спортсменов силовых видов спорта [2]. Американский Колледж Спортивной Медицины, Европейское Общество Гипертонии и Европейское Общество Кардиологов рекомендуют аэробную работу, как основной вид физической активности с целью профилактики/лечения сердечно-сосудистых заболеваний и гипертонической болезни [3]. Однако в тренировочных программах спортсменов силовых видов спорта аэробная нагрузка практически отсутствует.

Мета-анализ Wilson JM и соавторов показал, что симультанная мышечная деятельность (тренировка выносливости и силовая тренировка), приводит к снижению силы, гипертрофии и мощности работы [4]. Однако тренировка на выносливость (endurance training), зачастую, представляет собой лишь один из немногих подходов к развитию выносливости и традиционно включает в себя непрерывную мышечную деятельность  $\geq 20$  минут аэробных упражнений (например, бег, езда на велосипеде, гребля). Напротив, высокоинтенсивная интервальная тренировка (ВИИТ) включает в себя короткие многократные аэробные упражнения с высокой интенсивностью и с периодами восстановления между ними. Мета-анализ Sabag A и соавторов показал, что одновременный ВИИТ и силовая работа не оказывает негативного влияния на гипертрофию или силу верхней части тела, и что любое возможное негативное влияние на силу мышц нижних конечностей может быть уменьшено путем включения, основанного на беге ВИИТ и более продолжительных интермодальных периодов отдыха [5]. Также многие исследователи показали, что высокоинтенсивная аэробная тренировка способствует гипертрофии рабочих мышц [6] и сопоставимому с силовой тренировкой росту силовых и мощностных показателей [7]. Однако неизвестно, как ВИИТ влияет на

силу, гипертрофию и окислительные способности рабочих мышц и возможно ли создать протокол ВИИТ для одновременного развития этих качеств. На основании анализа проблемной ситуации, данных современной научной литературы и запросов спортивных врачей, тренеров и спортсменов силовых видов спорта была сформулирована цель исследования.

**Цель исследования** – оценить влияние высокоинтенсивной работа на окислительные способности, силу и гипертрофию рабочих мышц у спортсменов силовых видов спорта.

#### Задачи исследования:

- 1) изучить влияние ВИИТ на одновременное развитие силы, гипертрофии и окислительных способностей рабочих мышц в научной периодике;
- 2) исследовать как влияет ВИИТ на силовые показатели и гипертрофию рабочих мышц у спортсменов силовых видов спорта;
- 3) оценить, как влияет ВИИТ на окислительные способности рабочих мышц.

### 2. Материалы и методы

Исследование проходило на базе кафедры спортивной медицины РГУФКСМиГ. Обследованы 35 мужчин, представителей силовых видов спорта (пауэрлифтинг), имеющих спортивную квалификацию кандидата в мастера спорта (КМС) и мастера спорта (МС), тяжелых весовых категорий (масса тела –  $105,3 \pm 5,3$  кг). Средний возраст спортсменов –  $30 \pm 5,4$  лет. Все спортсмены дали добровольное информированное согласие на участие в исследовании согласно Хельсинкской декларации. У всех спортсменов перед началом и по окончании исследования проводили комплексное обследование: опрос, осмотр, газометрический анализ (определение анаэробного порога (АнП) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) на этом уровне, максимальное потребление кислорода (МПК) и мощности педалирования на МПК, потребление кислорода (ПК) на АнП и МПК), ультрасонографические измерения анатомической площади поперечного сечения (ППС) четырехглавой мышцы бедра, оценка максимальной произвольной силы четырехглавой мышцы бедра.

**Эргоспирометрия.** Ступенчатый тест выполняли на велоэргометре «MONARK 839 E» (Monark AB, Швеция), нагрузку задавали, начиная с 20 Вт с прибавлением по 20 Вт каждые 2 мин. Газометрический анализ проводили с использованием газоанализатора «CORTEX» (Meta Control 3000, Германия), выполняющего измерение по-

требления кислорода и выделения углекислого газа от вдоха к выдоху. ЧСС и R-R интервалы фиксировали с помощью монитора сердечного ритма «POLAR RS800» (Финляндия). Тест выполняли в темпе  $75 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$  до определения МПК, АП [8, 9], ЧСС на уровне АП и мощности педалирования на МПК.

**Ультрасонографические измерения.** У всех участников проведены ультрасонографические измерения анатомической площади поперечного сечения четырехглавой мышцы бедра до внедрения тренировочного протокола, а также еще два контрольных замера брались с интервалом в 30 дней. Измерения выполняли через 5-6 дней после последней тренировки, чтобы предотвратить влияние отека на размер мышцы. ППС четырехглавой мышцы бедра оценивалась в состоянии покоя с помощью ультразвуковой визуализации В-режима с линейным датчиком 1,6-5,0 МГц, длиной сканирующей поверхности 65 мм и шириной 17 мм (модель Vivid 7 Dimensio/Vivid 7 PRO, General Electric). Для лучшего акустического сцепления сканирующую поверхность датчика и кожную поверхность мышцы покрывали специальным гелем, и датчик ориентировали по средне-сагиттальной оси мышцы. Проводили эхографию всех четырех головок мышцы. Зона расположения датчика для эхолокации – на расстоянии 13 и 25 см проксимально от основания надколенника по передней, передне-внутренней и передненаружной поверхности бедра. Все измерения проводились на правой ноге после того, как испытуемые находились в положении лежа на спине в течение 20 мин, чтобы обеспечить возможность сдвига жидкости. Во время ультразвуковых исследований испытуемых инструктировали – «полностью расслабить мышцы конечности», с положением коленного сустава близко к полному разгибанию. Во время сканирования применяли минимальное давление датчика на кожные покровы, чтобы избежать давления на мышцу. Полученные изображения записывались на жесткий диск с формированием файла для дальнейшего анализа. По данным исследований цифровых значений эхограмм всех четырех порций определяли степень выраженности гипертрофии четырехглавой мышцы бедра.

**Оценка максимальной произвольной силы четырехглавой мышцы бедра.** Оценка максимальной произвольной силы четырехглавой мышцы бедра была выполнена с помощью теста на один повторный максимум (1ПМ), используя односуставное упражнение разгибание голени, сидя в тренажере (HOIST RS-1401, США). Все сеансы тестирования проводили утром, в одно и то же время суток. Участники выполняли упражнение с заданным 2 секундным темпом, как для концентрической, так и эксцентрической фазы. Им рекомендовано избегать утомительных упражнений и занятий спортом в течение 48 часов перед каждым тестированием. Важным аспектом тестирования с отягощением было то, что подходы выполнялись до мышечного отказа, определяемым как неспособность выполнить концентрическую фазу

сокращения мышц. Во время первого дня тестирования после 5-минутной разминки на велоэргометре и демонстрации правильной техники выполнения упражнения проведены испытания на максимальное количество повторений, измеренных для определенной нагрузки, после чего использовалось прогностическое уравнение для расчёта  $1\text{ПМ} = \text{BrzyskiM} : 1\text{ПМ} (\text{кг}) = \text{Вес отягощений} (\text{кг}) / (1,0278 - 0,0278 \cdot \text{количество повторений} (\text{кг}))$  [10]. На второй процедуре после разминки, интенсивность нагрузки была установлена на уровне 90% от расчетного 1ПМ и увеличивалась на 2,5-5,0% после каждого успешного подъема, до потери возможности у субъекта выполнить концентрическую фазу в полной амплитуде движения. Периоды отдыха между подходами составляли 2-3 мин, 1 ПМ при разгибании голени в настоящем исследовании обычно достигался в течение 3-4 попыток у всех участников. Повторение было действительным, если субъект мог выполнить его подконтрольно без посторонней помощи. Все измерения выполнены на правой ноге, и все процедуры испытаний выполнены одним и тем же исследователем.

**Протоколы физической активности.** Спортсмены тренировались 120 дней (3 раза в неделю) по следующему протоколу: к традиционной силовой работе была добавлена аэробная работа на велоэргометре, 7 высокоинтенсивных интервалов (на мощности педалирования 100% от МПК) по 2 минуты и низкоинтенсивные интервалы с ЧСС на уровне 75% от АП продолжительностью 2 минуты. Время тренировочной сессии составляло 28 минут. Спортсмены исключили на время исследования все силовые упражнения на четырехглавую мышцу бедра.

### 3. Результаты и их обсуждение

Адаптивный ответ митохондриального содержимого мышц на регулярно выполняемые упражнения был впервые убедительно продемонстрирован Holloszy JO в его классической публикации в 1967 году. Он продемонстрировал, что высокоинтенсивные тренировки могут привести к значительному увеличению уровня окислительных ферментов, а также к умеренным изменениям в составе митохондрий (т.е., к более плотным упаковкам белков транспортной электронной цепи) [11]. Позже ряд исследований подтвердил, что наилучшей корреляцией между любым физиологическим параметром и выносливостью является митохондриальное содержимое мышцы [12]. Известно, что окислительная способность мышц определяется в первую очередь митохондриальной окислительной способностью, которая, в свою очередь, определяется доставкой кислорода, окислительным ферментативным механизмом и транспортной цепью электронов, локализованной в кристах митохондрий, и аэробная тренировка повышает окислительные способности рабочих мышц за счет сильного расширения митохондриальной сети и увеличенной площади поверхности крист в пределах митохондрий [13]. Многие исследователи отметили, что ВИИТ (несмотря на

короткий мышечный стимул) заставляет рекрутировать все мышечные волокна в рабочей мышце, что приводит к убедительным изменениям в митохондриальном содержимом всей активной мышцы [14-16]. После 120 дней тренировок достоверно у спортсменов силовых видов спорта увеличилась на АНП мощность работы и потребление кислорода на 22,7 и 14,5% соответственно (табл. 1).

Также мощность работы и потребление кислорода на уровне МПК увеличились на 18,5 и 13,6%, соответственно. Напротив, митохондриальная адаптация к тренировкам с отягощениями показывает обратные результаты (исходя из начальных данных окислительных способностей спортсменов силовых видов спорта). Оригинальные исследования показали, что, хотя стимул, вызванный такой тренировкой, вызывал большие изменения в уровнях миофибрилярного белка и гипертрофии мышечных волокон, практически не наблюдалось изменений в митохондриальном содержимом, что приводило к «разбавлению» митохондриального содержимого в растущем волокне. Эта адаптация является физиологически невыгодной, поскольку разбавление митохондриального содержимого увеличивает диффузионное расстояние между капилляром и митохондриальным местоположением, что может привести к ухудшению показателей выносливости и работоспособности [17]. В некоторых исследованиях сообщалось, что после тренировок с отягощениями неизменными были значения МПК [18], а также неизменная [19] или более низкая плотность митохондрий, активность окислительных ферментов и плотность капилляров в гипертрофированных мышцах [20, 21].

Через 120 дней ВИИТ на велоэргометре, наблюдали увеличение ППС четырехглавой мышцы бедра, что было статистически значимо на расстоянии 13 см и 25 см от основания надколенника (табл. 2, 3).

В сравнительном анализе гипертрофии четырех головок в разных зонах расположения датчика для эколо-

кации были получены достоверные различия в гипертрофии: *musculus rectus femoris*, *musculus vastus medialis* и недостоверные различия в мышечных группах: *musculus vastus lateralis*, *musculus vastus intermedius* (табл. 4)

Многие исследователи обнаружили более выраженную анатомическую ППС четырехглавой мышцы бедра у опытных велосипедистов по сравнению с нетренированными субъектами или увеличение ППС или объема мышц после циклических тренировок в течение 6-12 недель [22, 23]. Однако другие исследователи не обнаруживают гипертрофию рабочих мышц в результате циклической мышечной деятельности [24, 25]. Вышеуказанное несоответствие может быть связано с неоднородной гипертрофией мышц бедра по всей ее длине [26, 27], потому что ППС в одном регионе не точно представляет весь объем рабочих мышц [28]. Например, Narici и соавторы [29] продемонстрировали, что относительное увеличение ППС четырехглавой мышцы бедра было больше в проксимальной части, чем в дистальных областях после тренировки с разгибанием колена. Две возможные причины региональных различий в мышечной гипертрофии были предложены специалистами: 1) различия в мышечной активации и 2) различия в синтезе сократительного белка [30].

#### 4. Выводы

1. Анализ и обобщение источников современной научной литературы позволил нам ответить на ключевые вопросы относительно того, может ли высокоинтенсивная аэробная тренировка создать первичные стимулы для гипертрофии скелетных мышц и способны ли мышцы увеличивать свои размеры и становиться сильнее при сохранении окислительных способностей. Наш тезис относительно способности циклической тренировки выше анаэробного порога вызывать гипертрофию рабочих мышц подтверждается рядом исследований [6, 22, 29, 31, 32], однако одновременный рост при этом окислительных способностей недостаточно изучен.

Таблица 1

Показатели газометрического тестирования спортсменов силовых видов спорта

Table 1

Indicators of gasometric testing of athletes of power sports

N=35	Анаэробный порог / Anaerobic threshold			Максимальное потребление кислорода / Maximal oxygen consumption		
	До исследования / Before the experiment	После исследования / After the experiment	Δ	До исследования / Before the experiment	После исследования / After the experiment	Δ
Мощность, (Вт/кг) / Power (W/kg)	2,2±0,3	2,7±0,3	+0,5*	2,7±0,2	3,2±0,2	+0,5*
Потребление кислорода (мл/кг) / Oxygen consumption (ml/kg)	26,9±2,5	30,8±1,8	+3,9*	31,5±2,5	35,8±1,2	+4,3*

Примечание: \* – статистически значимые различия показателей с исходным уровнем (p<0,05).

Note: \* – highlights significant differences compared to the start level (p<0,05).

Таблица 2

**Площадь поперечного сечения четырехглавой мышцы бедра:  
зона расположения датчика для эхолокации – на расстоянии 13 см от основания надколенника**

Table 2

**The cross-sectional area of the quadriceps femoris: ultrasound probe placed at a distance of 13 cm from the base of the patella**

Название мышц / Muscle	До исследования (см <sup>2</sup> ) / Before experiment (cm <sup>2</sup> )	Через 120 дней (см <sup>2</sup> ) / After 120 days (cm <sup>2</sup> )	Δ
<i>Musculus rectus femoris</i>	4,3±0,6	7,24±0,55	+2,94*
<i>Musculus vastus medialis</i>	23,18±1,52	25,74±1,43	+2,56*
<i>Musculus vastus lateralis</i>	31,6±2,6	43,62±2,55	+12,01*
<i>Musculus vastus intermedius</i>	20,42±1,42	25,36±1,2	+4,94*

Примечание: \* – статистически значимые различия показателей с исходным уровнем (p<0,05).

Note: \* – highlights significant differences compared to the start level (p<0,05).

Таблица 3

**Площадь поперечного сечения четырехглавой мышцы бедра:  
зона расположения датчика для эхолокации – на расстоянии 25 см от основания надколенника**

Table 3

**The cross-sectional area of the quadriceps femoris: ultrasound probe placed at a distance of 25 cm from the base of the patella**

Название мышц / Muscle	До исследования (см <sup>2</sup> ) / Before experiment (cm <sup>2</sup> )	Через 120 дней (см <sup>2</sup> ) / After 120 days (cm <sup>2</sup> )	Δ
<i>Musculus rectus femoris</i>	18,95±1,52	24,58±1,28	+5,62*
<i>Musculus vastus medialis</i>	9,37±1,53	16,5±1,43	+7,12*
<i>Musculus vastus lateralis</i>	42,77±3,5	55,54±3,49	+12,76*
<i>Musculus vastus intermedius</i>	23,41±2,44	28,53±2,43	+5,12*

Примечание: \* – статистически значимые различия показателей с исходным уровнем (p<0,05).

Note: \* – highlights significant differences compared to the start level (p<0,05).

Таблица 4

**Сравнительный анализ площади поперечного сечения четырехглавой мышцы бедра:  
зоны расположения датчика для эхолокации – на расстоянии 13 и 25 см от основания надколенника**

Table 4

**The cross-sectional area of the quadriceps femoris: ultrasound probe placed at a distance of 13 and 25 cm from the base of the patella**

Название мышц / Muscle	Зона эхолокации – 13 см (см <sup>2</sup> ) / Ultrasound probe placement – 13 cm from the patella base (cm <sup>2</sup> )	Зона эхолокации – 25 см (см <sup>2</sup> ) / Ultrasound probe placement – 25 cm from the patella base (cm <sup>2</sup> )	Δ
<i>Musculus rectus femoris</i>	2,94	5,62	2,68*
<i>Musculus vastus medialis</i>	2,56	7,12	4,56*
<i>Musculus vastus lateralis</i>	12,01	12,76	0,75
<i>Musculus vastus intermedius</i>	4,94	5,12	0,18

Примечание: \* – статистически значимые различия сравниваемых показателей (p < 0,05).

Note: \* – highlights significant differences compared to the the start level (p<0,05).

2. Регулярные высокоинтенсивные тренировки на велоэргометре вызывают мышечно-специфическую гипертрофию, что приводит к региональным изменениям четырехглавой мышцы бедра и росте ее силы на 6,5%. Эти уникальные мышечные изменения могут быть обусловлены избирательным использованием определенных мышц во время езды на велосипеде, а также частично из-за различий в количестве суставов, которые мышцы пересекают. Принимая езду на велосипеде в качестве упражнения, направленного на увеличение мышечной массы бедра, спортсмены и тренеры должны учитывать специфику региональной гипертрофии рабочих мышц.

3. Поскольку высокоинтенсивная аэробная тренировка рекрутирует аналогичные высокопороговые мышечные волокна, что и силовая, и оба вида физической активности предлагают мышцам одинаковые стимулы для создания хронических физиологических адаптаций, как для кардиореспираторной работоспособности, так

для роста силы и мышечной гипертрофии [33], то необходимо включить ВИИТ для профилактики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний спортсменам силовых видов спорта. Наше исследование показывает, что ВИИТ в течение 120 дней продемонстрировал увеличение роста окислительных способностей рабочих мышц (МПК увеличились на 13,6%) и это увеличение сопровождалось ростом четырехглавой мышцы бедра и приростом силовых показателей. Разработанный нами тренировочный протокол аэробной работы, построенный с учетом метаболических переменных, позволит атлетам эффективно и безопасно влиять на окислительные способности рабочих мышц, при этом не теряя основные силовые показатели. Дальнейшей приоритетной областью является проведение педагогической работы среди атлетов силовых видов спорта на предмет включения аэробных велоэргометрических сессий в тренировочные протоколы.

#### Список литературы

1. Lindow T, Brudin L, Elmberg V, Ekström M. Long-term follow-up of patients undergoing standardized bicycle exercise stress testing: new recommendations for grading of exercise capacity are clinically relevant // *Clin Physiol Funct Imaging* 2020 Mar 27;40(2):83-90. DOI: 10.1111/cpf.12606.
2. Tesch PA. Skeletal muscle adaptations consequent to long-term heavy resistance exercise // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1988. Vol.20, №5. P. 132-134.
3. Mancía G, De Backer G, Dominiczak A. European Guidelines for the management of arterial hypertension // *Eur. Heart J.* 2007. Vol.28. P. 1462-1536.
4. Wilson JM, Marin PJ, Rhea MR, Wilson SM, Loenneke JP, Anderson JC. Concurrent training: a meta-analysis examining interference of aerobic and resistance exercises // *J Strength Cond Res.* 2012 Aug; Vol.26, № 8. P. 2293-2307. DOI: 10.1519/JSC.0b013e31823a3e2d.
5. Sabag A, Najafi A, Michael S, Esgin T, Halaki M, Hackett D. The compatibility of concurrent high intensity interval training and resistance training for muscular strength and hypertrophy: a systematic review and meta-analysis // *J Sports Sci.* 2018 Nov. Vol.36, №21. P. 2472-2483. DOI:10.1080/02640414.2018.1464636.
6. Nuell S, Illera-Domínguez VR, Carmona G, Alomar X, Padullés JM, Lloret M, Cadefau JA. Hypertrophic muscle changes and sprint performance enhancement during a sprint-based training macrocycle in national-level sprinters // *Eur J Sport Sci.* 2019, P. 1-10. DOI: 10.1080/17461391.2019.1668063.
7. Kristoffersen M, Sandbakk Ø, Rønnestad BR, Gundersen H. Comparison of Short-Sprint and Heavy Strength Training on Cycling Performance // *Front Physiol.* 2019. Vol.10, P. 1132. DOI: 10.3389/fphys.2019.01132.
8. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange // *J Appl Physiol.* 1986. Vol.60, № 6. P.2020-2027. DOI:10.1152/jappl.1986.60.6.2020.
9. Pallarés JG, Morán-Navarro R, Ortega JE, Fernández-Eliás VE, Mora-Rodríguez R. Validity and Reliability of Ventilatory and Blood Lactate Thresholds in Well-Trained Cyclists // *PLoS One.* 2016. Vol.11, №9. P. 1-16. DOI: 10.1371/journal.pone.0163389.
10. Brzycki M. Strength testing: prediction of one-rep max from reps-to-fatigue // *J Health Phys Educ Rec Dance.* 1993. Vol.64. P. 88-90. DOI:10.1080/07303084.1993.10606684.

#### References

1. Lindow T, Brudin L, Elmberg V, Ekström M. Long-term follow-up of patients undergoing standardized bicycle exercise stress testing - New recommendations for grading of exercise capacity are clinically relevant. *Clin Physiol Funct Imaging* 2020 Mar 27;40(2):83-90. DOI: 10.1111/cpf.12606.
2. Tesch PA. Skeletal muscle adaptations consequent to long-term heavy resistance exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1988;20(5):132-134.
3. Mancía G, De Backer G, Dominiczak A. European Guidelines for the management of arterial hypertension. *Eur. Heart J.* 2007;28:1462-1536.
4. Wilson JM, Marin PJ, Rhea MR, Wilson SM, Loenneke JP, Anderson JC. Concurrent training: a meta-analysis examining interference of aerobic and resistance exercises. *J Strength Cond Res.* 2012;26(8):2293-307. DOI: 10.1519/JSC.0b013e31823a3e2d.
5. Sabag A, Najafi A, Michael S, Esgin T, Halaki M, Hackett D. The compatibility of concurrent high intensity interval training and resistance training for muscular strength and hypertrophy: a systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci.* 2018;36(21):2472-2483. DOI:10.1080/02640414.2018.1464636.
6. Nuell S, Illera-Domínguez VR, Carmona G, Alomar X, Padullés JM, Lloret M, Cadefau JA. Hypertrophic muscle changes and sprint performance enhancement during a sprint-based training macrocycle in national-level sprinters. *Eur J Sport Sci.* 2019;26:1-10. DOI: 10.1080/17461391.2019.1668063.
7. Kristoffersen M, Sandbakk Ø, Rønnestad BR, Gundersen H. Comparison of Short-Sprint and Heavy Strength Training on Cycling Performance. *Front Physiol.* 2019 Aug;28(10):1132. DOI: 10.3389/fphys.2019.01132.
8. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol.* 1986;60(6):2020-2027. DOI:10.1152/jappl.1986.60.6.2020.
9. Pallarés JG, Morán-Navarro R, Ortega JE, Fernández-Eliás VE, Mora-Rodríguez R. Validity and Reliability of Ventilatory and Blood Lactate Thresholds in Well-Trained Cyclists. *PLoS One.* 2016;11(9):1-16. DOI: 10.1371/journal.pone.0163389.
10. Brzycki M. Strength testing: prediction of one-rep max from reps-to-fatigue. *J Health Phys Educ Rec Dance.* 1993;64:88-90. DOI:10.1080/07303084.1993.10606684.

11. **Holloszy JO.** Biochemical Adaptations in Muscle // *J Biol Chem.* 1967. Vol.242, №9. P. 2278-2282.
12. **Oliveira AN, Hood DA.** Exercise is Mitochondrial Medicine for Muscle // *Sports Medicine and Health Science.* 2019. №1(1). P. 11-18.
13. **Nielsen J, Gejl KD, Hey-Mogensen M, Holmberg HC, Suetta C, Krstrup P, Elemans CPH, Ørtenblad N.** Plasticity in mitochondrial cristae density allows metabolic capacity modulation in human skeletal muscle // *J Physiol.* 2017. Vol.595, № 9. P. 2839-2847. DOI:10.1113/JP273040
14. **Bartlett JD, Hwa Joo C, Jeong TS, Louhelainen J, Cochran AJ, Gibala MJ, Gregson W, Close GL, Drust B, Morton JP.** Matched work high-intensity interval and continuous running induce similar increases in PGC-1 mRNA, AMPK, p38, and p53 phosphorylation in human skeletal muscle // *J Appl Physiol.* 2012. Vol.112, №7. P. 1135-1143. DOI: 10.1152/jappphysiol.01040.2011.
15. **Gibala MJ, Little JP.** Physiological basis of brief vigorous exercise to improve health // *J Physiol.* 2019. P.1-22. DOI: 10.1113/JP276849.
16. **MacInnis MJ, Gibala MJ.** Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity // *J Physiol.* 2017. Vol.595, №9. P. 2915-2930. DOI: 10.1113/JP273196.
17. **Groennebaek T, Vissing K.** Impact of resistance training on skeletal muscle mitochondrial biogenesis, content, and function // *Front Physiol.* 2017. Vol.15, №8. P. 713. DOI: 10.3389/fphys.2017.00713.
18. **Bishop D, Jenkins DG, Mackinnon LT, McEniery M, Carey MF.** The effects of strength training on endurance performance and muscle characteristics // *Med Sci Sports Exerc.* 1999. Vol.31. P. 886-891. DOI: 10.1097/00005768-199906000-00018.
19. **Green H, Goreham C, Ouyang J, Ball-Burnett M, Ranney D.** Regulation of fiber size, oxidative potential, and capillarization in human muscle by resistance exercise // *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 1999. Vol.76. P. 591-R596. DOI: 10.1152/ajpregu.1999.276.2.R591.
20. **Tesch PA, Thorsson A, Essen-Gustavsson B.** Enzyme activities of FT and ST muscle fibers in heavy-resistance trained athletes // *J Appl Physiol.* 1989. Vol.67. P. 83-87. DOI: 10.1152/jappl.1989.67.1.83.
21. **Tesch PA, Thorsson A, Kaiser P.** Muscle capillary supply and fiber type characteristics in weight and power lifters // *J Appl Physiol.* 1984. Vol.56. P. 35-38. DOI: 10.1152/jappl.1984.56.1.35.
22. **Harber MP, Konopka AR, Udem MK, Hinkley JM, Minchev K, Kaminsky LA, Trappe TA, Trappe S.** Aerobic exercise training induces skeletal muscle hypertrophy and age-dependent adaptations in myofiber function in young and older men // *J Appl Physiol.* 2012. Vol.113. P. 1495-1504. DOI: 10.1152/jappphysiol.00786.2012.
23. **McPhee JS, Williams AG, Degens H, Jones DA.** Inter-individual variability in adaptation of the leg muscles following a standardised endurance training programme in young women // *Eur J Appl Physiol.* 2010. Vol.109. P. 1111-1118. DOI: 10.1007/s00421-010-1454-2.
24. **Farup J, Kjølhed T, Sørensen H, Dalgas U, Møller AB, Vestergaard PF, Ringgaard S, Bojsen-Møller J, Vissing K.** Muscle morphological and strength adaptations to endurance vs. resistance training // *J Strength Cond Res.* 2012. Vol.26. P.398-407. DOI: 10.1519/JSC.0b013e318225a26f
25. **Rønnestad BR, Hansen EA, Raastad T.** Effect of heavy strength training on thigh muscle cross-sectional area, performance determinants, and performance in well-trained cyclists // *Eur J Appl Physiol.* 2010. Vol.108. P.965-975. DOI: 10.1007/s00421-009-1307-z.
11. **Holloszy JO.** Biochemical Adaptations in Muscle. *J Biol Chem.* 1967;242(9):2278-2282.
12. **Oliveira AN, Hood DA.** Exercise is Mitochondrial Medicine for Muscle. *Sports Medicine and Health Science.* 2019;1(1): 11-18.
13. **Nielsen J, Gejl KD, Hey-Mogensen M, Holmberg HC, Suetta C, Krstrup P, Elemans CPH, Ørtenblad N.** Plasticity in mitochondrial cristae density allows metabolic capacity modulation in human skeletal muscle. *J Physiol.* 2017;595(9):2839-2847. DOI:10.1113/JP273040.
14. **Bartlett JD, Hwa Joo C, Jeong TS, Louhelainen J, Cochran AJ, Gibala MJ, Gregson W, Close GL, Drust B, Morton JP.** Matched work high-intensity interval and continuous running induce similar increases in PGC-1 mRNA, AMPK, p38, and p53 phosphorylation in human skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 2012;112(7):1135-1143. DOI: 10.1152/jappphysiol.01040.2011.
15. **Gibala MJ, Little JP.** Physiological basis of brief vigorous exercise to improve health. *J Physiol.* 2019:1-22. DOI: 10.1113/JP276849.
16. **MacInnis MJ, Gibala MJ.** Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity. *J Physiol.* 2017;595(9):2915-2930. DOI: 10.1113/JP273196.
17. **Groennebaek T, Vissing K.** Impact of resistance training on skeletal muscle mitochondrial biogenesis, content, and function. *Front Physiol.* 2017;15(8):713. DOI: 10.3389/fphys.2017.00713.
18. **Bishop D, Jenkins DG, Mackinnon LT, McEniery M, Carey MF.** The effects of strength training on endurance performance and muscle characteristics. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31(6):886-891. DOI: 10.1097/00005768-199906000-00018.
19. **Green H, Goreham C, Ouyang J, Ball-Burnett M, Ranney D.** Regulation of fiber size, oxidative potential, and capillarization in human muscle by resistance exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 1999;276:591-596. DOI: 10.1152/ajpregu.1999.276.2.R591.
20. **Tesch PA, Thorsson A, Essen-Gustavsson B.** Enzyme activities of FT and ST muscle fibers in heavy-resistance trained athletes. *J Appl Physiol.* 1989;67(1):83-87. DOI: 10.1152/jappl.1989.67.1.83.
21. **Tesch PA, Thorsson A, Kaiser P.** Muscle capillary supply and fiber type characteristics in weight and power lifters. *J Appl Physiol.* 1984;56(1):35-38. DOI: 10.1152/jappl.1984.56.1.35.
22. **Harber MP, Konopka AR, Udem MK, Hinkley JM, Minchev K, Kaminsky LA, Trappe TA, Trappe S.** Aerobic exercise training induces skeletal muscle hypertrophy and age-dependent adaptations in myofiber function in young and older men. *J Appl Physiol.* 2012;113(9):1495-1504. DOI: 10.1152/jappphysiol.00786.2012.
23. **McPhee JS, Williams AG, Degens H, Jones DA.** Inter-individual variability in adaptation of the leg muscles following a standardised endurance training programme in young women. *Eur J Appl Physiol.* 2010;109(6):1111-1118. DOI: 10.1007/s00421-010-1454-2.
24. **Farup J, Kjølhed T, Sørensen H, Dalgas U, Møller AB, Vestergaard PF, Ringgaard S, Bojsen-Møller J, Vissing K.** Muscle morphological and strength adaptations to endurance vs. resistance training. *J Strength Cond Res.* 2012;26:398-407. DOI: 10.1519/JSC.0b013e318225a26f.
25. **Rønnestad BR, Hansen EA, Raastad T.** Effect of heavy strength training on thigh muscle cross-sectional area, performance determinants, and performance in well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 2010;108(5):965-975. DOI: 10.1007/s00421-009-1307-z.

26. **Ema R, Wakahara T, Miyamoto N, Kanehisa H, Kawakami Y.** Inhomogeneous architectural changes of the quadriceps femoris induced by resistance training // *Eur J Appl Physiol.* 2013. Vol.113. P. 2691-2703. DOI: 10.1007/s00421-013-2700-1.

27. **Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Flück M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV.** Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle // *Acta Physiol.* 2014. Vol.210. P. 642-654. DOI: 10.1111/apha.12225.

28. **Roman WJ, Fleckenstein J, Stray-Gundersen J, Alway SE, Peshock R, Gonyea WJ.** Adaptations in the elbow flexors of elderly males after heavy-resistance training // *J Appl Physiol.* 1993. Vol.74. P. 750-754. DOI: 10.1152/jappl.1993.74.2.750.

29. **Narici MV, Roi GS, Landoni L, Minetti AE, Cerretelli P.** Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps // *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1989. Vol.59, №4. P. 310-319. DOI: 10.1007/BF02388334.

30. **Narici MV, Hoppeler H, Kayser B, Landoni L, Claassen H, Gavardi C, Conti M, Cerretelli P.** Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training // *Acta Physiol Scand.* 1996. Vol.157, №2. P. 175-186. DOI: 10.1046/j.1365-201X.1996.483230000.x.

31. **Hudelmaier M, Wirth W, Himmer M, Ring-Dimitriou S, Sänger A, Eckstein F.** Effect of exercise intervention on thigh muscle volume and anatomical cross-sectional areas: quantitative assessment using MRI // *Magn Reson Med.* 2010. Vol.64, №2. P. 1713-1720. DOI: 10.1002/mrm.22550.

32. **Izquierdo M, Häkkinen K, Ibáñez J, Kraemer WJ, Gorostiaga EM.** Effects of combined resistance and cardiovascular training on strength, power, muscle cross-sectional area, and endurance markers in middle-aged men // *Eur J Appl Physiol.* 2005. Vol.94, №1. P. 70-75. DOI: 10.1007/s00421-004-1280-5.

33. **Steele J, Butler A, Comerford Z, Dyer J, Lloyd N, Ward J, Fisher J, Gentil P, Scott C, Ozaki H.** Similar acute physiological responses from effort and duration matched leg press and recumbent cycling tasks // *Peer J.* 2018. Vol.28, №6. P. 1-28. DOI: 10.7717/peerj.4403.

26. **Ema R, Wakahara T, Miyamoto N, Kanehisa H, Kawakami Y.** Inhomogeneous architectural changes of the quadriceps femoris induced by resistance training. *Eur J Appl Physiol.* 2013 Nov;113(11):2691-2703. DOI: 10.1007/s00421-013-2700-1.

27. **Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Flück M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV.** Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol.* 2014;210:642-654. DOI: 10.1111/apha.12225.

28. **Roman WJ, Fleckenstein J, Stray-Gundersen J, Alway SE, Peshock R, Gonyea WJ.** Adaptations in the elbow flexors of elderly males after heavy-resistance training. *J Appl Physiol.* 1993;74:750-754. DOI: 10.1152/jappl.1993.74.2.750.

29. **Narici MV, Roi GS, Landoni L, Minetti AE, Cerretelli P.** Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1989;59(4):310-319. DOI: 10.1007/BF02388334.

30. **Narici MV, Hoppeler H, Kayser B, Landoni L, Claassen H, Gavardi C, Conti M, Cerretelli P.** Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta Physiol Scand.* 1996;157(2):175-186. DOI: 10.1046/j.1365-201X.1996.483230000.x.

31. **Hudelmaier M, Wirth W, Himmer M, Ring-Dimitriou S, Sänger A, Eckstein F.** Effect of exercise intervention on thigh muscle volume and anatomical cross-sectional areas: quantitative assessment using MRI. *Magn Reson Med.* 2010;64(6):1713-1720. DOI: 10.1002/mrm.22550.

32. **Izquierdo M, Häkkinen K, Ibáñez J, Kraemer WJ, Gorostiaga EM.** Effects of combined resistance and cardiovascular training on strength, power, muscle cross-sectional area, and endurance markers in middle-aged men. *Eur J Appl Physiol.* 2005;94(1-2):70-5. DOI: 10.1007/s00421-004-1280-5.

33. **Steele J, Butler A, Comerford Z, Dyer J, Lloyd N, Ward J, Fisher J, Gentil P, Scott C, Ozaki H.** Similar acute physiological responses from effort and duration matched leg press and recumbent cycling tasks. *Peer J.* 2018;28(6):1-28. DOI: 10.7717/peerj.4403.

#### Информация об авторах:

**Мирошников Александр Борисович**, доцент кафедры спортивной медицины ФГБОУ ВО РГУФКСМиТ Минспорта России, к.б.н. ORCID ID: 0000-0002-4030-0302 (+7 (985) 125-12-23, benedikt116@mail.ru)

**Волков Василий Васильевич**, аспирант кафедры спортивной медицины ФГБОУ ВО РГУФКСМиТ Минспорта России. ORCID ID: 0000-0001-6055-6519

**Смоленский Андрей Вадимович**, заведующий кафедры спортивной медицины ФГБОУ ВО РГУФКСМиТ Минспорта России, проф., д.м.н. ORCID ID: 0000-0001-5663-9936

#### Information about the authors:

**Alexander B. Miroshnikov**, Ph.D. (Biology), Associate Professor of the Department of Sports Medicine of the Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism. ORCID ID: 0000-0002-4030-0302 (+7 (985) 125-12-23, benedikt116@mail.ru)

**Vasily V. Volkov**, Graduate student of the Department of Sports Medicine of the Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism. ORCID ID: 0000-0001-6055-6519

**Andrey V. Smolensky**, MD, D.Sc. (Medicine), Prof., Head of the Department of Sports Medicine of the Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism. ORCID ID: 0000-0001-5663-9936

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

Поступила в редакцию: 23.09.2019

Принята к публикации: 28.11.2019

Received: 23 September 2019

Accepted: 28 November 2019