

Возможности изменения композиции мышечных волокон

у спортсменов под влиянием тренировки

Самсонова Алла Владимировна¹, доктор педагогических наук, профессор

Самсонов Глеб Александрович², кандидат педагогических наук

¹*Национальный государственный Университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург*

²*ООО «Издательство Кинетика»*

Аннотация. Возможность трансформации типов мышечных волокон под влиянием тренировки является одной из актуальных проблем спортивной науки.

Цель исследования – аналитический обзор данных документальных источников о возможности изменения композиции скелетных мышц спортсменов под влиянием тренировки.

Методы исследования: анализ научных публикаций в базах данных PubMed, Medline и Google Scholar.

Результаты исследования и выводы. Классификация мышечных волокон на основе оценки активности АТФ-азы миозина свидетельствует о том, что силовая тренировка не меняет соотношение мышечных волокон типа I и II, но увеличивает процент волокон типа IIa. Анализ одиночных волокон с использованием SDS-PAGE не дает чёткого ответа на вопрос о трансформации мышечных волокон при силовых тренировках. Исследования влияния тренировки на выносливость и композицию волокон, основанные на оценке активности АТФ-азы миозина, противоречивы. Одни данные подтверждают генетическую предрасположенность соотношения волокон типа I и II, другие – возможность изменений. Анализ одиночных волокон с использованием SDS-PAGE показывает, что их композиция может изменяться в сторону увеличения процента медленных волокон типа МНС1 за счет гибридных мышечных волокон.

Ключевые слова: силовая тренировка, тренировка на выносливость, композиция мышечных волокон, состав мышечных волокон

Potential for fiber-type composition adaptation in athletes in response to training

Samsonova Alla Vladimirovna¹, doctor of pedagogical sciences, professor

Samsonov Gleb Aleksandrovich², candidate of pedagogical sciences

¹*Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health, St. Petersburg*

²*LLC "Kinetika Publishing"*

Abstract. The potential for fiber-type composition adaptation in athletes in response to training represents one of the most pressing issues in sports science.

The purpose of the study is an analytical review of documentary sources on the potential for changes in skeletal muscle fiber-type composition in athletes in response to training.

Research methods: analysis of scientific publications in the PubMed, Medline, and Google Scholar databases.

Research results and conclusions. The classification of muscle fibers based on the assessment of myosin ATPase activity indicates that strength training does not change the ratio of type I to type II muscle fibers, but it increases the percentage of type IIa fibers. Analysis of single fibers using SDS-PAGE does not provide a clear answer regarding fiber-type transformation in response to resistance training. Studies on the effects of training on endurance and fiber-type composition, based on the assessment of myosin ATPase activity, are contradictory. Some data support a genetic predisposition in the ratio of type I to type II fibers, while others suggest the possibility of changes. Analysis of single fibers via SDS-PAGE reveals that fiber-type composition may shift toward an increased proportion of slow-twitch MHCI fibers, primarily through a reduction in hybrid muscle fibers.

Keywords: strength training, endurance training, fiber-type composition, muscle fiber profile

Введение. В начале XX века было установлено, что скелетные мышцы человека состоят из двух типов мышечных волокон – быстрых и медленных [1]. Медленные волокна отличаются низкой скоростью и силой сокращения, но высокой устойчивостью к утомлению, тогда как быстрые развивают большую скорость и усилие, но быстро утом-

ляются. В дальнейшем началось активное изучение факторов, влияющих на соотношение типов волокон в мышцах (композицию мышечных волокон), включая тренировку [2]. Ключевым стал вопрос о возможности изменения композиции мышечных волокон под влиянием тренировки или её генетической обусловленности.

Следует отметить, что ответ на этот вопрос зависит от используемой классификации мышечных волокон. В XX веке наиболее распространенной была классификация по активности АТФ-азы миозина [3], основанная на изменении окраски волокон в кислой и щелочной среде. В рамках этой классификации выделяли три типа волокон: медленные (тип I), промежуточные (тип IIА) и быстрые (тип IIВ) [4].

С конца XX века применяется типизация мышечных волокон на основе изоформ тяжелых цепей миозина (Myosin Heavy Chain isoform, МНС), основанная на электрофоретическом разделении белков по массе методом SDS-PAGE по Лэммли [5, 6]. Электрофорез может проводиться на пучке волокон или на одиночном мышечном волокне [7], при этом последний вариант считается «золотым стандартом» [8].

Волокна, содержащие только одну изоформу тяжелых цепей миозина, называют «чистыми». Их обозначают: МНСI – медленные, МНСIIА – промежуточные и МНСIIВ – быстрые. Волокна с двумя (МНС I/IIА, МНСIIА/IIВ) [9, 10] или тремя (МНС I/IIА/IIВ) [11] изоформами тяжелых цепей миозина называют «гибридными».

Цель исследования – аналитический обзор данных документальных источников о возможности изменения композиции скелетных мышц спортсменов под влиянием тренировки.

Методы и организация исследования. Анализ научных публикаций в базах данных PubMed, Medline, Google Scholar и других поисковых системах проводился с использованием ключевых слов: «композиция мышечных волокон», «типы мышечных волокон», «силовая тренировка», «тренировка на выносливость» за период с начала XX века до настоящего времени. Для поиска связанных статей также применялись Connected Papers и ChatGPT.

Результаты исследования. Поскольку вопрос о возможности изменения композиции мышечных волокон под влиянием тренировки актуален для тренеров и спортсменов, далее рассматриваются данные, полученные в рамках двух классификаций: на основе оценки активности АТФ-азы миозина и на основе оценки тяжелых цепей миозина (МНС).

Направленность тренировочного процесса на силу и композиция мышечных волокон

Классификация мышечных волокон на основе оценки активности АТФ-азы миозина. К концу XX века установили, что силовая тренировка не влияет на процентное соотношение волокон типа I и типа II в скелетных мышцах человека [12, 13, 14, 15, 16]. Но выявили, что длительная силовая тренировка уменьшает количество мышечных волокон типа IIВ и увеличивает процент мышечных волокон типа IIА [14, 17].

Классификация мышечных волокон на основе оценки тяжелых цепей миозина (МНС), анализ одиночных мышечных волокон

Ответ на вопрос о трансформации медленных волокон в быстрые под воздействием силовой тренировки стал возможен благодаря использованию SDS-PAGE анализа одиночных волокон. Однако исследования в этой области противоречивы.

В исследовании J. L. Andersen, H. Klitgaard, B. Saltin [18] шесть спринтеров проходили интенсивную силовую тренировку в течение трех месяцев. После тренировки в латеральной широкой мышце бедра было зафиксировано достоверное ($p < 0,05$) снижение процента медленных волокон типа МНСІ (с 52% до 41,2%) и гибридных волокон типа МНСІІ/ІІІ (с 12,9% до 5,1%), а процент волокон типа МНСІІ увеличился (с 34,7% до 52,3%). Это свидетельствовало о возможности трансформации МНСІ в МНСІІ под воздействием тренировки. Авторы указали, что среди 1000 изученных мышечных волокон только одно соответствовало изоформе МНСІІх.

Исследование Williamson D.L. et al. [11], в котором изучалось воздействие силовой тренировки на композицию волокон широчайшей мышцы бедра у молодых мужчин и женщин (22-25 лет), показало следующее. Установлено, что после 12 недель тренировки достоверно ($p < 0,05$) возрос процент волокон типа МНСІІ (с 32,2% до 59,4% у мужчин и с 28,9% до 52,7% у женщин), достоверно ($p < 0,05$) уменьшилась пропорция гибридных волокон (на 19% у мужчин и на 30% у женщин), процент волокон типа МНСІ не изменился.

Несколько иные результаты получены Malisoux L. et al. [19], где восемь недель скоростно-силовой тренировки мужчин (22-24 года) не привели к изменению процента волокон типа МНСІ (30,0% до, 29,2% после), но достоверно ($p < 0,05$) увеличился процент гибридных волокон МНСІІ/ІІ (с 1,9% до 5,0). Пропорция волокон типа МНСІІ возросла с 33,4% до 40,6%, но изменение недостоверно ($p > 0,05$). Это может быть связано с недостаточной длительностью эксперимента и характером упражнений, которые не были направлены на развитие максимальной силы.

Исследование Macheck S.B. et al. [20] показало, что у элитного пауэрлифтера с более чем 30-летним стажем силовых тренировок в латеральной широкой мышце бедра было обнаружено очень низкое содержание волокон типа МНСІ (9%), очень высокий процент волокон типа МНСІІ (79%) и полное отсутствие волокон типа МНСІІх. По-видимому, такой состав волокон может быть результатом не только генотипа, но и длительных силовых тренировок. Подобные результаты были получены у тяжелоатлетки мирового уровня в исследовании Serrano et al. [21], где композиция волокон в латеральной широкой мышце бедра была следующей: МНСІ – 9%, МНСІІ/ІІ – 2%, МНСІІ – 89%. Согласно Plotkin D. et al. [7], высокий процент волокон МНСІІ у элитных атлетов может быть связан с уменьшением гибридных волокон МНСІІ/ІІх. Вопрос о возможности трансформации волокон МНСІ в МНСІІ после силовых тренировок остаётся открытым, поскольку мнения исследователей по этому поводу разделяются.

Направленность тренировочного процесса на выносливость и композиция мышечных волокон

Классификация мышечных волокон на основе АТФ-азы миозина. К концу XX века ряд российских ученых пришли к выводу, что тренировки на выносливость не изменяют процентное соотношение медленных (типа I) и быстрых (типа II) волокон в скелетных мышцах. Однако они заметили, что тренировки могут изменять соотношение между волокнами типов ІА и ІІВ [2, 22]. Эти выводы были частично опровергнуты другими исследованиями. Например, H. Howald et al. [23] показали, что шестинедельные тренировки на выносливость у нетренированных мужчин и

женщин приводят к увеличению количества мышечных волокон типа I на 12% и уменьшению волокон типа II на 24%.

Аналогичные результаты были получены в исследовании Gehlert S. et al. [24], в котором участвовали велосипедисты разной квалификации. После трех месяцев тренировок на выносливость у испытуемых в латеральной широкой мышце бедра процент волокон типа I увеличился с 55,6% до 60,4%, тогда как процент волокон типа II снизился с 31,9% до 26,2%. Процент волокон типа II практически не изменился (до – 11,4%, после – 11,8%).

Классификация мышечных волокон на основе оценки МНС (анализ одиночного мышечного волокна). Использование новых методов классификации мышечных волокон подтвердило, что тренировка на выносливость может приводить к увеличению процента медленных мышечных волокон типа МНСI.

Исследования Trappe S. et al. [25] показали, что после 13 недель подготовки к марафону у начинающих бегунов (4 мужчины и 3 женщины) в икроножной мышце процент волокон типа МНСI увеличился с 48% до 56%, а гибридных волокон типа МНСI/IIa уменьшился – с 7% до 2%. Также были зафиксированы достоверные изменения в снижении количества гибридных волокон в целом (с 24% до 13%).

Результаты исследования Luden N. et al. [26], проведенного с аналогичной программой тренировки, также подтвердили данные о повышении процента медленных волокон МНСI в латеральной широкой мышце бедра и камбаловидной мышце после 13 недель тренировок. В латеральной широкой мышце испытуемых, участвовавших в исследовании, процент волокон типа МНСI увеличился с 42,6% до 48,6%, а гибридных волокон МНСI/IIa – с 5,1% до 8,2%. Количество волокон типа МНСIIa уменьшилось (с 40,1% до 35,8%), также снизился процент гибридных волокон типа МНСIIa/IIx (с 11,9% до 6,4%). В камбаловидной мышце, состоящей преимущественно из волокон типа МНСI, были получены аналогичные, но менее выраженные сдвиги. Авторы сделали вывод, что увеличение процента волокон типа МНСI под воздействием тренировки на выносливость возможно (например, за счет гибридных мышечных волокон).

Еще более наглядным является исследование Bathgate et al. [27], в котором изучалась композиция мышечных волокон у двух монозиготных близнецов в возрасте 52 лет. Один из них вёл малоподвижный образ жизни, а другой более 30 лет тренировался в беге на длинные дистанции и триатлоне. У тренированного близнеца процент волокон типа МНСI в латеральной широкой мышце бедра составил 95%, тогда как у нетренированного – только 40%. Это свидетельствует о том, что длительная тренировка на выносливость может значительно увеличить процент медленных волокон типа МНСI, причем этот процесс, по всей вероятности, происходит за счет гибридных волокон.

Причины, приводящие к этому изменению, пока достоверно не установлены, однако такими причинами могут быть:

- уменьшение количества мышечных волокон типа МНСIIa в силу саркопении;
- существенная длительность занятий спортом, направленным на развитие общей выносливости.

Выводы

1. Силовые тренировки не изменяют соотношение типов волокон I и II в скелетных мышцах, но приводят к увеличению процента мышечных волокон типа IIА и уменьшению процента волокон типа IIВ (при оценке соотношения волокон на основе активности АТФ-азы миозина).
2. Результаты анализа одиночных мышечных волокон на основе оценки тяжелых цепей миозина (МНС) не дают прямого ответа о возможности трансформации типа мышечных волокон под влиянием силовой тренировки.
3. Результаты исследований влияния тренировки на выносливость на композицию мышечных волокон, основанные на оценке активности АТФ-азы миозина, противоречивы. Ряд исследований свидетельствуют о том, что соотношение мышечных волокон типа I и типа II в скелетных мышцах генетически детерминировано, другие – что изменения возможны. Под воздействием тренировки на выносливость мышечные волокна типа IIВ приобретают свойства мышечных волокон типа IIА. Ряд исследований свидетельствует о том, что тренировка на выносливость мужчин и женщин приводит к достоверному увеличению процента медленных мышечных волокон типа I.
4. Результаты анализа одиночных мышечных волокон на основе оценки МНС говорят о том, что увеличение процента волокон типа МНСІ в результате тренировки на выносливость возможно (например, за счет гибридных волокон).

Список источников

1. Denny-Brown D. E. The Histological Features of Striped Muscle in Relation to its Functional Activity // Proceedings of the Royal Society of London. 1929. Vol. 104. P. 371–411.
2. Язвиков В. В. Анализ состава скелетно-мышечных волокон в мышцах гребцов // Теория и практика физической культуры. 1988. № 12. С. 38–39.
3. Padykula H. A., Herman E. The specificity of the histochemical method of adenosine triphosphatase // Journal of Histochemistry & Cytochemistry. 1955. Vol. 3. P. 170–195.
4. Brooke M. H., Kaiser K. K. Three “myosin ATPase” systems: the nature of their pH lability and sulphydryl dependence // Journal of Histochemistry & Cytochemistry. 1970. Vol. 18. P. 670–672.
5. Laemmli U. K. Cleavage of Structural Proteins during the Assembly of the Head of Bacteriophage T4 // Nature. 1970. Vol. 227. P. 680–685.
6. Perrie W. T., Bumford S. J. Electrophoretic separation of myosin isoenzymes. Implications for the histochemical demonstration of fibre types in biopsy specimens of human skeletal muscle // Journal of the Neurological Sciences. 1986. Vol. 73. P. 89–96.
7. Muscle Fiber Type Transitions with Exercise Training: Shifting Perspectives / Plotkin D. L., Roberts M. D., Haun C. T., Schoenfeld B. J. DOI 10.3390/sports9090127 // Sports. 2021. Vol. 127, No 9. P. 1–11. EDN: ZEAINB.
8. A rationale for SDS-PAGE of MHC isoforms as a gold standard for determining contractile phenotype / Pandorf C. E., Caiozzo V. J., Haddad F., Baldwin K. J. // Journal of Applied Physiology. 2010. Vol. 108. P. 222–225.
9. Scott W., Stevens J., Binder-Macleod S. A. Human Skeletal Muscle Fiber Type Classifications // Physiology Review. 2001. Vol. 81. P. 1810–1816.
10. Skeletal muscle hypertrophy and structure and function of skeletal muscle fibres in male body builders / D’Antona G., Lanfranconi F., Pellegrino M. A. [et al.] // Journal of Physiology. 2006. Vol. 570, No 3. P. 611–627.
11. Reduction in hybrid single muscle fiber proportions with resistance training in humans / Williamson D. L., Gallagher P. M., Carroll C. C. [et al.] // Journal of Applied Physiology. 2001. Vol. 91. P. 1955–1961.
12. Structural changes in skeletal muscle tissue with heavy-resistance exercise / Lüthi J. M., Howald H., Claassen H. [et al.] // International Journal of Sports Medicine. 1986. Vol. 7, No. 3. P. 123–127.
13. Muscle hypertrophy and fast fiber type conversions in heavy resistance-trained women / Staron R. S., Malicky E. S., Leonardi M. J. [et al.]. DOI 10.1007/bf00572189 // European Journal of Applied Physiology. 1990. Vol. 60, No 1. P. 71–79. EDN: IOXTHH.
14. Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training / Hather B. M., Tesch P. A., Buchanan P., Dudley G. A. // Acta Physiologica Scandinavica. 1991. Vol. 143. P. 177–185.

15. Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations / Kraemer W. J., Patton J. F., Harman S. E. G. [et al.] // Journal of Applied Physiology. 1995. Vol. 78. P. 976–989.
16. Effect of High-Intensity Resistance Training on Untrained Older Men. II. Muscle Fiber Characteristics and Nucleo-cytoplasmic Relationships / Hikkida R. S., Staron R. S., Hagerman F. C. [et al.] // Journal of Gerontology. 2000. Vol. 55, No 7. P. 347–354.
17. Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women / Staron R. S., Karapondo D. L., Kramer W. J. [et al.] // Journal of Applied Physiology. 1994. Vol. 76, No 3. P. 1247–1255.
18. Andersen J. L., Klitgaard H., Saltin B. Myosin heavy chain isoforms in single fibres from m. vastus lateralis of sprinters: influence of training // Acta Physiologica Scandinavica. 1994. Vol. 151. P. 135–142.
19. Stretch-shortening cycle exercises: An effective training paradigm to enhance power output of human single muscle fibers / Malisoux L., Francaux M., Nielens H. Theisen D. DOI 10.1152/japplphysiol.01027.2005 // Journal of Applied Physiology. 2006. Vol. 100. P. 771–779. EDN: MEZRRRT.
20. Skeletal Muscle Fiber Type and Morphology in a Middle-Aged Elite Male Powerlifter Using Anabolic Steroids / Machek S. B., Lorenz K. A., Kern M. [et al.] // Journal of Science in Sport and Exercise. 2019. Vol. 3. P. 404–411.
21. Extraordinary fast-twitch fiber abundance in elite weightlifters / Serrano N., Colenso-Semple L. M., Lazauskas K. K. [et al.] // PLoS ONE. 2019. Vol. 14. No. 3: e0207975.
22. Язвиков В. В. Петрухин В. Г. Состав мышечных волокон смешанных скелетных мышц как фактор конституции человека // Теория и практика физической культуры. 1991. № 1. С. 38–40.
23. Influences of Endurance Training on the Ultrastructural Composition of the Different Muscle Fiber Types in Humans / Howald H., Hoppeler H., Claassen H. [et al.]. DOI 10.1007/bf00589248 // Pflügers Archiv. 1985. Vol. 403. P. 369–376. EDN: KRJFGG.
24. Cycling exercise-induced myofiber transitions in skeletal muscle depend on basal fiber type distribution / Gehlert S., Weber S., Weidmann B. [et al.]. DOI 10.1007/s00421-011-2209-4 // European Journal of Applied Physiology. 2012. Vol. 112. P. 2393–2402. EDN: DEGIDM.
25. Single Muscle Fiber Adaptations with Marathon Training / Trappe S., Harber M., Creer A. [et al.]. DOI 10.1152/japplphysiol.01595.2005 // Journal of Applied Physiology. 2006. Vol. 101. P. 721–727. EDN: LWUNQR.
26. Skeletal Muscle Plasticity with Marathon Training in Novice Runners / Luden N., Hayes E., Minchev K. [et al.] // Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2012. Vol. 22. P. 662–670.
27. Muscle health and performance in monozygotic twins with 30 years of discordant exercise habits / Bathgate K.E., Bagley J.R., Jo E. [et al.]. DOI 10.1007/s00421-018-3943-7 // European Journal of Applied Physiology. 2018. Vol. 118. P. 2097–2110. EDN: JKIWZT.

References

1. Denny-Brown D. E. (1929), “The Histological Features of Striped Muscle in Relation to its Functional Activity”, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 104, pp. 371–411.
2. Yazvikov V. V. (1988), “Analysis of the composition of musculoskeletal fibers in the muscles of rowers”, *Theory and practice of physical culture*, No. 12, pp. 38–39.
3. Padykula H. A., Herman E. (1955), “The specificity of the histochemical method of adenosine triphosphatase”, *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, Vol. 3, pp. 170–195.
4. Brooke M. H., Kaiser K. K. (1970), “Three “myosin ATPase” systems: the nature of their pH lability and sulphydryl dependence”, *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, Vol. 18, pp. 670–672.
5. Laemmli U. K. (1970). “Cleavage of Structural Proteins during the Assembly of the Head of Bacteriophage T4”, *Nature*, Vol. 227, pp. 680–685.
6. Perrie W. T., Bumford S. J. (1986), “Electrophoretic separation of myosin isoenzymes. Implications for the histochemical demonstration of fibre types in biopsy specimens of human skeletal muscle”, *Journal of the Neurological Sciences*, Vol. 73, pp. 89–96.
7. Plotkin D. L., Roberts M. D., Haun C. T., Schoenfeld B. J. (2021), “Muscle Fiber Type Transitions with Exercise Training: Shifting Perspectives”, *Sports*, Vol. 127, No 9, pp. 1–11, DOI 10.3390/sports9090127.
8. Pandorf C. E., Caiozzo V. J., Haddad F., Baldwin K. J. (2010), “A rationale for SDS-PAGE of MHC isoforms as a gold standard for determining contractile phenotype”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 108, pp. 222–225.
9. Scott W., Stevens J. Binder-Macleod S. A. (2001), “Human Skeletal Muscle Fiber Type Classifications”, *Physiology Review*, Vol. 81, pp. 1810–1816.
10. D’Antona G., Lanfranconi F., Pellegrino M. A. [et al.] (2006), “Skeletal muscle hypertrophy and structure and function of skeletal muscle fibres in male body builders”, *Journal of Physiology*, Vol. 570, No 3, pp. 611–627.
11. Williamson D. L., Gallagher P. M., Carroll C. C. [et al.] (2001), “Reduction in hybrid single muscle fiber proportions with resistance training in humans”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 91, pp. 1955–1961.
12. Lüthi J. M., Howald H., Claassen H. [et al.] (1986), “Structural changes in skeletal muscle tissue with heavy-resistance exercise”, *International Journal of Sports Medicine*, Vol. 7, No. 3, pp. 123–127.

13. Staron R. S., Malicky E. S., Leonardi M. J. [et al.] (1990), “Muscle hypertrophy and fast fiber type conversions in heavy resistance-trained women”, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 60, No 1, pp. 71–79, DOI 10.1007/bf00572189.
14. Hather B. M., Tesch P. A., Buchanan P., Dudley G. A. (1991), “Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training”, *Acta Physiologica Scandinavica*, Vol. 143, pp. 177– 185.
15. Kraemer W. J., Patton J. F., Harman S. E. G. [et al.] (1995), “Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 78, pp. 976–989.
16. Hikkida R. S., Staron R. S., Hagerman F. C. [et al.] (2000), “Effect of High-Intensity Resistance Training on Untrained Older Men. II. Muscle Fiber Characteristics and Nucleo-cytoplasmic Relationships”, *Journal of Gerontology*, Vol. 55, No 7, pp. 347–354.
17. Staron R. S., Karapondo D. L., Kramer W. J. [et al.] (1994), “Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 76, No 3, pp. 1247–1255.
18. Andersen J. L., Klitgaard H., Saltin B. (1994), “Myosin heavy chain isoforms in single fibres from m. vastus lateralis of sprinters: influence of training”, *Acta Physiologica Scandinavica*, Vol. 151, pp. 135–142.
19. Malisoux L., Francaux M., Nielens H., Theisen D. (2006), “Stretch-shortening cycle exercises: An effective training paradigm to enhance power output of human single muscle fibers”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 100, pp. 771–779, DOI 10.1152/japplphysiol.01027.2005.
20. Machek S. B., Lorenz K. A., Kern M. [et al.] (2019), “Skeletal Muscle Fiber Type and Morphology in a Middle-Aged Elite Male Powerlifter Using Anabolic Steroids”, *Journal of Science in Sport and Exercise*, Vol. 3, pp. 404–411.
21. Serrano N., Colenso-Semple L. M., Lazauskas K. K. [et al.] (2019), “Extraordinary fast-twitch fiber abundance in elite weightlifters”, *PLoS ONE*, Vol. 14, No. 3, e0207975.
22. Yazvikov V. V. Petrukhin V. G. (1991), “The composition of muscle fibers of mixed skeletal muscles as a factor of human constitution”, *Theory and practice of physical culture*, No. 1, pp. 38–40.
23. Howald H., Hoppeler H., Claassen H. [et al.] (1985), “Influences of Endurance Training on the Ultrastructural Composition of the Different Muscle Fiber Types in Humans”, *Pflügers Archiv*, Vol. 403, pp. 369–376, DOI 10.1007/bf00589248.
24. Gehlert S., Weber S., Weidmann B. [et al.] (2012), “Cycling exercise-induced myofiber transitions in skeletal muscle depend on basal fiber type distribution”, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 112, pp. 2393–2402, DOI 10.1007/s00421-011-2209-4.
25. Trappe S., Harber M., Creer A. [et al.] (2006), “Single Muscle Fiber Adaptations with Marathon Training”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 101, pp. 721–727, DOI 10.1152/japplphysiol.01595.2005.
26. Luden N., Hayes E., Minchev K. [et al.] (2012), “Skeletal Muscle Plasticity with Marathon Training in Novice Runners”, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Vol. 22, pp. 662–670.
27. Bathgate K. E., Bagley J. R., Jo E. [et al.] (2018), “Muscle health and performance in monozygotic twins with 30 years of discordant exercise habits”, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 118, pp. 2097–2110, DOI 10.1007/s00421-018-3943-7.

Информация об авторах:

Самсонова А.В., заведующая кафедрой биомеханики, ORCID: 0000-0003-3599-8280, SPIN-код: 7384-2602.

Самсонов Г. А., генеральный директор, ORCID: 0009-0001-0008-9661, SPIN-код: 1224-2128.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.12.2025.

Принята к публикации 09.01.2026.