

Дата публикации: 01.06.2023
DOI: 10.24412/2782-6570-2023_02_02_3
УДК 796.015.527

Publication date: 01.06.2023
DOI: 10.24412/2782-6570-2023_02_02_3
UDC 796.015.527

МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ ТРЕНИРОВОК С ОГРАНИЧЕНИЕМ КРОВОТОКА НА ГИПЕРТРОФИЮ РАБОЧИХ МЫШЦ: ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Ф.А. Колосков, А.Б. Мирошников, А.В. Мештель

Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», г. Москва, Россия

Аннотация. Несмотря на то, что гипертрофические эффекты тренировок с отягощениями и ограничением кровотока продемонстрированы многочисленными исследованиями, основные механизмы, ответственные за такие эффекты, не выяснены. Цель: провести обзор предметного поля доступной литературы для анализа и обобщения механизмов, лежащих в основе мышечной гипертрофии при тренировках с ограничением кровотока. Систематический поиск публикаций в PubMed закончился 05.05.2023 года. Это исследование было проведено в соответствии с заявлением о предпочтительных отчетных показателях для систематических обзоров, мета-анализов и обзоров предметного поля PRISMA-ScR. Всего было выявлено 128 упоминаний. В результате отбора было проанализировано и включено в исследование 6 обзоров. Систематизируя данные, мы пришли к выводу, что повышенный уровень метаболического стресса является основным движущим механизмом мышечного роста при тренировках с ограничением кровотока.

Ключевые слова: окклюзионная тренировка, тренировка с ограничением кровотока, мышечная гипертрофия.

INFLUENCE MECHANISMS OF TRAINING WITH BLOOD FLOW RESTRICTION ON HYPERTROPHY OF WORKING MUSCLES: A SCOPING REVIEW

F.A. Koloskov, A.B. Miroshnikov, A.V. Meshtel

Russian State University of Physical Education, Sport, Youth and Tourism, Moscow, Russia

Annotation. Although the hypertrophic effects of resistance training and blood flow restriction have been demonstrated by numerous studies, the underlying mechanisms responsible for these effects have not been elucidated. Objective: to conduct a scoping review of the available literature to analyze and summarize the mechanisms underlying muscle hypertrophy during training with blood flow restriction. The systematic search of publications in PubMed ended on 05.05.2023. This study was conducted in accordance with the statement of Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR). A total of 128 references were identified. As a result of selection, 6 reviews were analyzed and included in the study. Systematizing the data, we came to the conclusion that the increased level of metabolic stress is the main driving mechanism of muscle growth during blood flow restriction training.

Keywords: occlusion training, blood flow restriction training, muscle hypertrophy.

Введение. Тренировка с ограничением кровотока (Blood flow restriction (BFR)) была первоначально разработана в Японии в конце 1970-х годов, где она называлась тренировкой КААТСУ [1]. Хотя долгосрочные преимущества упражнений с BFR, включая увеличение гипертрофии мышц, силы и улучшенной аэробной и анаэробной работоспособности, широко описаны в научной литературе, основные механизмы,

ответственные за эту адаптацию, до сих пор обсуждаются в научной периодике.

Что касается мышечной гипертрофии, то возникающие гипертрофические эффекты силовых тренировок с использованием BFR в первую очередь объясняются повышенным уровнем метаболического стресса (т.е. накоплением метаболитов в результате ишемической/гипоксической среды) [2], который, по теории, вызывает рост мышц,

воздействуя на другие факторы, включая рекрутирование высокопороговых двигательных единиц (ВПДЕ) [3-4], повышение уровня системных гормонов [5-6], отек клеток [7] и повышенное производство реактивных форм кислорода (reactive oxygen species (ROS)) [8].

В связи с тем, что многие исследователи по-разному объясняли возможные механизмы, лежащие в основе роста мышц после тренировок с BFR, и эти данные невозможно объединить ни в систематический, ни в зонтичный обзор, была поставлена цель исследования.

Цель исследования: провести обзор предметного поля доступной литературы для анализа и обобщения механизмов, лежащих в основе мышечной гипертрофии при тренировках с ограничением кровотока.

Методы и организация исследования. Исследование проходило на кафедре спортивной медицины Российского университета спорта «ГЦОЛИФК», г. Москва. Это исследование было проведено в соответствии с заявлением о предпочтительных отчетных показателях для систематических обзоров, мета-анализов и обзоров предметного поля PRISMA-ScR (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews) [9]. Протокол исследования был составлен до начала поиска и не менялся ни во время, ни после его окончания. До начала поиска было определено, что в обзор войдут только обзоры предметного поля, в которых изучаются механизмы, лежащие в основе мышечной гипертрофии при тренировках с ограничением кровотока.

Поиск литературы проводился в базе данных PubMed. Поиск производился по запросу “blood flow restriction training AND (muscle mass OR muscle strength OR skeletal muscle hypertrophy OR muscle protein synthesis OR muscle growth)”; “KAATSU AND (muscle mass OR muscle strength OR skeletal muscle hypertrophy OR muscle protein synthesis OR muscle growth)”; “occlusion training AND (muscle mass OR muscle strength OR skeletal muscle hypertrophy OR muscle protein synthesis OR muscle growth)”. Временные

рамки поиска не ставились, однако дата последнего поиска была 05.05.2023 года.

Чтобы исследование вошло в обзор, оно должно было соответствовать следующим критериям включения, основанным на системе PICOS [10]. P (Population) – активные и неактивные люди, спортсмены, элитные спортсмены (мужчины и женщины) старше 18 лет; I (Intervention) – тренировки с ограничением кровотока (силовые, тренировки с отягощениями); C (Comparison) – сравнение с контрольной группой или с началом вмешательства; O (Outcomes) – в исследованиях изучались механизмы влияния тренировок с ограничением кровотока на гипертрофию рабочих мышц; S (Study) – обзоры предметного поля, систематические обзоры и мета-анализы, в которых изучались механизмы влияния тренировок с ограничением кровотока на гипертрофию мышц.

Первоначально два автора обзора (Колосков Ф.А., Мирошников А.Б.) параллельно, независимо друг от друга проверяли заголовки статей, абстракты и, при необходимости, полные тексты из записей базы данных в соответствии с критериями приемлемости. Дубликаты и статьи, не соответствующие критериям, удалялись. Мы не ставили в исследовании языковой барьер. Поскольку в этом исследовании данные были представлены описательно, статистический анализ не проводился.

Результаты исследования и их обсуждение. Всего было выявлено 128 упоминаний. Затем эти данные были экспортированы и любые дубликаты или статьи, несоответствующие критериям включения, были удалены вручную. На рисунке изображена блок-схема процесса отбора исследований PRISMA для обзора. Критериям включения соответствовали только 6 обзоров [11-16].

Hwang и соавторы [11] выделяют следующие основные механизмы, с помощью которых тренировки с BFR стимулируют рост скелетных мышц:

1) метаболические накопления, которые могут стимулировать анаболические факторы роста;

2) увеличение синтеза мышечного белка через специфические внутриклеточные сигнальные пути;

3) повреждение мышц;

4) механотрансдукция;

5) паттерны рекрутирования ВПДЕ;

6) увеличенная активность сателлитных клеток;

7) продукция ROS;

8) повышение уровней анаболических

гормонов (тестостерона, гормона роста и инсулиноподобного фактора роста-1 (ИФР-1)).

Кроме того, авторы предполагают, что механическая нагрузка и метаболический стресс могут действовать синергетически, чтобы создать оптимальные условия для наибольшего гипертрофического потенциала.

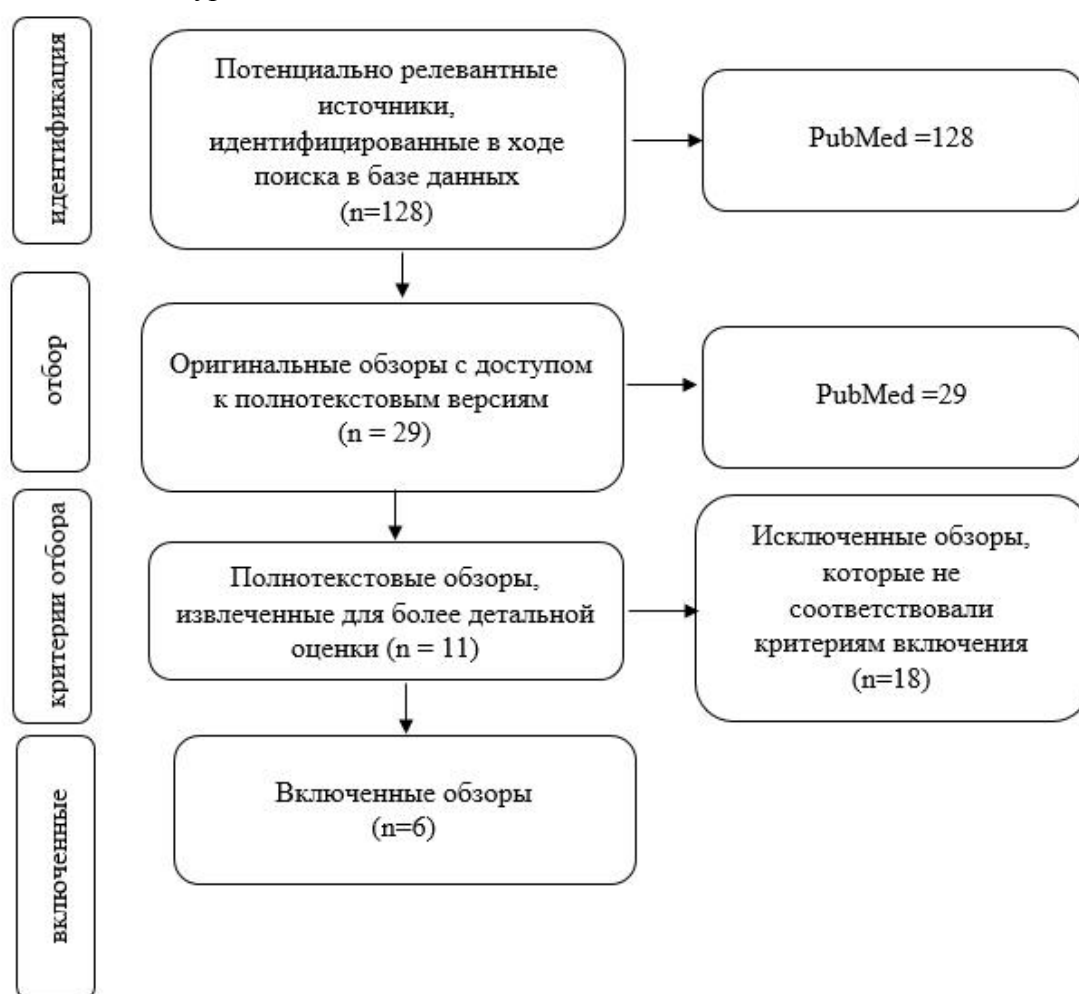


Рис. Блок-схема PRISMA

Loenneke и соавторы [12] в своем обзоре выделяют 4 фазы, при которых применяются тренировки с BFR:

1) постельный режим;

2) низкоинтенсивная ходьба;

3) тренировки с отягощениями с низкой нагрузкой;

4) низкая нагрузка в сочетании с силовой тренировкой с высокой нагрузкой.

При первой фазе преобладающие механизмы, участвующие в поддержании массы скелетных мышц с помощью BFR, в отсутствие физических упражнений включают отек мышечных клеток и усиление передачи сигналов через β 2-адренорецепторы. Преобладающими механизмами преимуществ, наблюдаемых при ходьбе с BFR при низкой интенсивности (II фаза),

может быть резкое увеличение объема мышечных клеток и увеличение сердечного выброса или объема крови. Преобладающими механизмами в III/IV фазах отмечают:

- 1) рекрутирование ВПДЕ;
- 2) дополнительная секреция анаболических гормонов.

Pearson и соавторы [13] в своем обзоре разделяют механизмы, с помощью которых тренировки с BFR стимулируют рост скелетных мышц на первичные и вторичные.

Основные (первичные) механизмы – это механическая нагрузка и метаболический стресс. При этом авторы считают, что первичные факторы будут воздействовать на ряд связанных вторичных механизмов индукции мышечного роста, такие как механотрансдукция, повреждение мышц, вызванное физическими упражнениями, повышенная секреция системных и локализованных гормонов, отек клеток, повышенная продукция реактивных форм кислорода (что может вызывать продукцию белков теплового шока) и оксида азота, а также рекрутирование ВПДЕ. Также авторы выделяют потенциальные аутокринные (т.е. стимуляция синтеза белка за счет увеличения анаболических и/или снижения катаболических сигнальных путей) и паракринные (т.е. повышенная активация, пролиферация и слияние сателлитных клеток) механизмы, участвующие в гипертрофии, вызванной BFR-тренировками с отягощениями.

Yuan и соавторы [14] в своем обзоре выделяют следующие основные механизмы, с помощью которых тренировки с BFR стимулируют рост скелетных мышц:

- 1) рекрутирование ВПДЕ;
- 2) активация сигнального пути синтеза белка;
- 3) метаболический стресс;
- 4) секреция анаболических гормонов;
- 5) отек клеток.

Freitas и его коллеги [15] в своем обзоре выделяют следующие основные механизмы, с помощью которых тренировки с BFR стимулируют рост скелетных мышц:

- 1) метаболический стресс;
- 2) рекрутирование ВПДЕ;
- 3) секреция анаболических гормонов;
- 4) увеличение синтеза белка за счет изменения биомолекулярных путей, включая мишень рапамицинового комплекса (mammalian target of rapamycin complex 1 (mTORC1)) и ингибирование таких атрогенов, как Muscle RING Finger1 (MuRF1) и atrogin-1, а также ингибирование пути миостатина.

Vopat и соавторы утверждают, что предлагаемые механизмы, с помощью которых тренировки с BFR стимулируют рост скелетных мышц, основаны на сочетании двух основных факторов: метаболического и механического стресса [16].

Эти факторы действуют синергетически, сигнализируя о ряде вторичных механизмов, включая тканевую гипоксию, накопление метаболитов и клеточный отек. Впоследствии это способствует аутокринным и паракринным сигнальным путям, которые приводят к синтезу белка, рекрутированию ВПДЕ, локальному и системному синтезу анаболических гормонов и стимуляции миогенных стволовых клеток.

Обобщая все механизмы (табл.), которые упоминаются в работах, вошедших в данный обзор предметного поля, можно сказать следующее: 83,3% – метаболический стресс, 33,3% – механическая нагрузка, 33,3% – механотрансдукция, 33,3% – повреждение мышц, вызванное тренировкой, 50% – увеличение синтеза белка за счет изменения mTORC1, 100% – рекрутирование ВПДЕ, 100% – повышение уровней анаболических гормонов, 33,3% – продукция ROS, 66,7% – отек мышечных клеток, 50% – увеличенная активность сателлитных клеток и 16,7% – ингибирование пути миостатина.

Таблица

Обобщение всех механизмов, с помощью которых тренировки с ограничением кровотока стимулируют рост скелетных мышц

Механизм	Ссылка
метаболический стресс	[11,13,14,15,16]
механическая нагрузка	[11,13]
механотрансдукция	[11,13]
повреждение мышц, вызванное тренировкой	[11,13]
увеличение синтеза белка за счет изменения mTORC1	[11,13,14]
рекрутирование ВПДЕ	[11,12,13,14,15,16]
повышение уровней анаболических гормонов	[11,12,13,14,15,16]
продукция ROS	[11,13]
отек мышечных клеток	[12,13,14,16]
увеличенная активность сателлитных клеток	[11,13,16]
ингибирование пути миостатина	[15]

Примечание: ВПДЕ – высокопороговые двигательные единицы; ROS (reactive oxygen species) – реактивные формы кислорода; mTORC1 (mammalian target of rapamycin complex 1) – мишень рапамицинового комплекса 1

Учитывая, что повышенный уровень системных гормонов вряд ли будет влиять на рост мышц [17-18], механическая нагрузка и метаболический стресс по-видимому будут основными механизмами мышечного роста в результате BFR-тренировок. Также метаболические накопления, которые возникают в результате метаболического стресса, возможно обеспечивают механизм дополнительного рекрутинга ВПДЕ [19], что помогает создать механическое напряжение в этих волокнах. В конечном счете, почти весь рост мышц, по-видимому, обусловлен механическим напряжением с небольшим воздействием метаболического стресса и, возможно, даже пагубным эффектом повреждения мышц [20].

Закключение. Хотя упражнения с отягощениями и BFR действительно популярны и эффективны, механизмы, лежащие в основе

гипертрофической адаптации, еще предстоит полностью определить. Систематизируя данные, мы пришли к выводу, что повышенный уровень метаболического стресса является основным движущим стимулом в этом процессе, который, как предполагается, активирует ряд других механизмов (например, системную выработку гормонов, увеличение рекрутирования ВПДЕ), все из которых, как считается, опосредуют рост мышц за счет аутокринного и/или паракринного действия. Однако степень, в которой эти механизмы активируются при метаболическом стрессе, неясна. Требуются дополнительные рандомизированные контролируемые исследования, которые позволят определить степень и вклад метаболического стресса в создании механического напряжения в высокопороговых двигательных единицах.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Участие авторов. Концепция, дизайн исследования и написание текста – Ф.А. Колосков; сбор материала – Ф.А. Колосков, А.Б. Мирошников; редактирование – А.В. Мештель.

Conflict of interest. The authors declare no clear or potential conflicts of interest associated with the publication.

Authors' contribution. Concept, design of the study, writing – F.A. Koloskov; data gathering – F.A. Koloskov, A.B. Miroshnikov; editing – A.V. Meshtel.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Slys, J. The efficacy of blood flow restricted exercise: A systematic review & meta-analysis / J. Slys, J. Stultz, J. F. Burr // *J Sci Med Sport* – 2016. – Vol. 19. – № 8. – pp. 669-675. DOI: 10.1016/j.jsams.2015.09.005.
2. Blood flow restriction: the metabolite/volume threshold theory / J. Loenneke, C. Fahs, J. Wilson, M. Bembien // *Med Hypotheses*. – 2011. – Vol. 77. – № 5. – pp. 748-752. DOI: 10.1016/j.mehy.2011.07.029.
3. Oxygen availability and motor unit activity in humans // Moritani T., Sherman W. M., Shibata M. [et al] // *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. – 1992. – Vol. 64. – № 6. – pp. 552-556. DOI: 10.1007/BF00843767.
4. Muscle activation during low-intensity muscle contractions with restricted blood flow / Yasuda T., Brechue W. F., Fujita T., [et al] // *J Sports Sci*. – 2009. – Vol. 27. – № 5. – pp. 479-489. DOI: 10.1080/02640410802626567.
5. Acute effects of low load resistance training with blood flow restriction on serum growth hormone, insulin-like growth factor-1, and testosterone in patients with mild to moderate unilateral knee osteoarthritis / Y. Chen, J. Wang, S. Li, Y. Li // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 14. – № 8. – P.10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11051.
6. Acute Hormonal Responses to Multi-Joint Resistance Exercises with Blood Flow Restriction / Vilaça-Alves J., Magalhães P. S., Rosa C. V. [et al] // *J Funct Morphol Kinesiol*. – 2022. – Vol. 8. – № 1. – P. 3. DOI: 10.3390/jfmk8010003.
7. Loenneke, J. P. The anabolic benefits of venous blood flow restriction training may be induced by muscle cell swelling / Loenneke J. P., Fahs C. A., Rossow L. M. [et al] // *Med Hypotheses*. 2012. – Vol. 78. – № 1. – pp. 151-154. DOI: 10.1016/j.mehy.2011.10.014.
8. Preobrazenski N. Molecular regulation of skeletal muscle mitochondrial biogenesis following blood flow-restricted aerobic exercise: a call to action / N. Preobrazenski, H. Islam, B. J. Gurd // *Eur J Appl Physiol*. – 2021. – Vol. 121. – № 7. – pp. 1835-1847. DOI: 10.1007/s00421-021-04669-6.
9. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation / Tricco A. C., Lillie E., Zarin W. [et al] // *Ann Intern Med*. – 2018. – Vol. 169. – № 7. – pp. 467-473. DOI: 10.7326/M18-0850.
10. Samson D. Chapter 2: medical tests guidance (2) developing the topic and structuring systematic reviews of medical tests: utility of PICOTS, analytic frameworks, decision trees, and other frameworks / D. Samson, K. M. Schoelles // *J Gen Intern Med*. – 2012. – Vol. 27. DOI: 10.1007/s11606-012-2007-7.
11. Hwang P.S. Mechanisms Behind Blood Flow-Restricted Training and its Effect Toward Muscle Growth / P. S. Hwang, D. S. Willoughby // *J Strength Cond Res*. – 2019. – Vol. 33. – pp. 167-179. DOI: 10.1519/JSC.0000000000002384.
12. Blood flow restriction: an evidence based progressive model (Review) / Loenneke J. P., Abe T., Wilson J. M. [et al] // *Acta Physiol Hung*. 2012. – Vol. 99. – № 3. – pp. 235-250. DOI: 10.1556/APhysiol.99.2012.3.1.
13. Pearson S.J. A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy / S. J. Pearson, S. R. Hussain // *Sports Med*. – 2015. – Vol. 45. – № 2. – pp. 187-200. DOI: 10.1007/s40279-014-0264-9.
14. Application and progress of blood flow restriction training in improving muscle mass and strength in the elderly / Yuan J., Wu L., Xue Z. [et al] // *Front Physiol*. 2023. – № 14. DOI: 10.3389/fphys.2023.1155314.
15. Freitas, E. D. S. The Evolution of Blood Flow Restricted Exercise / E. D. S. Freitas, M. Karabulut, M. G. Bembien // *Front Physiol*. – 2021. – № 12. DOI: 10.3389/fphys.2021.747759.
16. Blood Flow Restriction Therapy: Where We Are and Where We Are Going / B. Vopat, L. Vopat, M. Bechtold, K. Hodge // *J Am Acad Orthop Surg*. 2020. – Vol. 28. – № 12. – pp. 493-500. DOI: 10.5435/JAAOS-D-19-00347.
17. Fink J. The role of hormones in muscle hypertrophy / J. Fink, B. J. Schoenfeld, K. Nakazato // *Phys Sportsmed*. – 2018. – Vol. 46. – № 1. – pp. 129-134. DOI: 10.1080/00913847.2018.1406778.
18. Morton, R.W. Muscle Androgen Receptor Content but Not Systemic Hormones Is Associated With Resistance Training-Induced Skeletal Muscle Hypertrophy in Healthy, Young Men / R.W. Morton, K. Sato, M. P. B. Gallagher // *Front Physiol*. – 2018. – № 9. – P. 1373. DOI: 10.3389/fphys.2018.01373.
19. Do metabolites that are produced during resistance exercise enhance muscle hypertrophy? / Dankel S. J., Mattocks K. T., Jessee M. B. [et al] // *Eur J Appl Physiol*. – 2017. – Vol. 117. – № 11. – pp. 2125-2135. DOI: 10.1007/s00421-017-3690-1.
20. Blood Flow Restriction Does Not Attenuate Short-Term Detraining-Induced Muscle Size and Strength Losses After Resistance Training With Blood Flow Restriction / Teixeira E. L., de Salles Painelli V., Silva-Batista C. [et al] // *J Strength Cond Res*. – 2021. – Vol. 35. – № 8. – pp. 2082-2088. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003148.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филипп Александрович Колосков – аспирант кафедры спортивной медицины, Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», Москва, e-mail: 79057830665@ya.ru.

Александр Борисович Мирошников – доктор биологических наук, профессор кафедры спортивной медицины, Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», Москва, e-mail: benedikt116@mail.ru.

Александр Виталиевич Мештель – магистрант кафедры спортивной медицины, Российский университет спорта «ГЦОЛИФК», Москва, e-mail: meshtel.author@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Filipp Aleksandrovich Koloskov – Post-Graduate Student of the Department of Sports Medicine, Russian State University of Physical Education, Sport, Youth and Tourism, Moscow, e-mail: 79057830665@ya.ru

Aleksandr Borisovich Miroshnikov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Sports Medicine, Russian State University of Physical Education, Sport, Youth and Tourism, Moscow, e-mail: benedikt116@mail.ru.

Aleksandr Vital'evich Meshtel – Master's Student of the Department of Sports Medicine, Russian State University of Physical Education, Sport, Youth and Tourism, Moscow, e-mail: meshtel.author@yandex.ru.

Для цитирования: Колосков, Ф. А. Механизмы влияния тренировок с ограничением кровотока на гипертрофию рабочих мышц: обзор предметного поля / Ф. А. Колосков, А. Б. Мирошников, А. В. Мештель // Российский журнал спортивной науки: медицина, физиология, тренировка. – 2023. – Т. 2. – № 2. DOI: 10.24412/2782-6570-2023_02_02_3

For citation: Koloskov F.A., Miroshnikov A.B., Meshtel A.V. Influence mechanisms of training with blood flow restriction on hypertrophy of working muscles: a scoping review. *Russian Journal of Sports Science: Medicine, Physiology, Training*, 2023, vol. 2, no. 2. DOI: 10.24412/2782-6570-2023_02_02_3