



Влияние тренировок с ограничением кровотока на инсулинорезистентность мужчин с метаболическим синдромом: рандомизированное контролируемое исследование

Сверхков В.В.*, Быков Е.В.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет физической культуры», Челябинск, Россия

РЕЗЮМЕ

ВВЕДЕНИЕ. Метаболический синдром определяется, как патологическое состояние, характеризующееся абдоминальным ожирением, гипертонией, дислипидемией, нарушением толерантности к глюкозе. Предположительно, резистентность к инсулину лежит в основе метаболического синдрома. Современные исследования, в том числе с Менделевской рандомизацией, продемонстрировали, что мышечная сила и мышечная масса могут играть важную роль в механизмах резистентности к инсулину.

ЦЕЛЬ. Установить связь между относительной мышечной силой верхних конечностей и индексом триглицериды/глюкоза, а также оценить влияние различных режимов упражнений с отягощениями на альтернативные показатели инсулинорезистентности у мужчин с метаболическим синдромом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. На первом этапе исследования было обследовано 216 мужчин в возрасте от 25 до 50 лет. Были оценены относительная мышечная сила верхних конечностей в упражнении «Жим штанги лежа» и индекс триглицериды/глюкоза. На втором этапе было проведено рандомизированное контролируемое исследование, для которого было отобрано 60 мужчин, которые соответствовали критериям метаболического синдрома. Мужчины с метаболическим синдромом были разделены на три группы: низкоинтенсивная силовая тренировка с ограничением кровотока ($n = 20$), высокоинтенсивная силовая тренировка ($n = 20$), низкоинтенсивная силовая тренировка без ограничения кровотока ($n = 20$). Тренировки проводились 2 раза в неделю на протяжении 12 недель. До и после исследования оценивались индекс триглицериды/глюкоза, соотношение триглицеридов к липопротеинам высокой плотности, комбинация индекса триглицериды/глюкоза с индексом массы тела.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Было обнаружено, что относительная сила мышц верхних конечностей обратно пропорциональна индексу триглицериды/глюкоза ($r = -0,52$; $p < 0,05$) у обследованных мужчин. После 12 недель тренировок с отягощениями было обнаружено статистически значимое снижение индекса триглицериды/глюкоза, соотношения триглицеридов к липопротеинам высокой плотности и комбинации индекса триглицериды/глюкоза с индексом массы тела для групп низкоинтенсивной силовой тренировки с ограничением кровотока и высокоинтенсивной силовой тренировки (обе, $p < 0,01$). Изменение состава тела, увеличение доли мышечных волокон I и IIa и уменьшение доли мышечных волокон IIx, увеличение активности транспортировщиков глюкозы, снижение системного воспаления являются основными потенциальными механизмами положительного влияния тренировок с отягощениями, в том числе в сочетании с ограничением кровотока на резистентность к инсулину у мужчин с метаболическим синдромом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Существует обратно пропорциональная связь между мышечной силой и индексом триглицериды/глюкоза; тренировки с отягощениями являются эффективным и безопасным инструментом для снижения альтернативных показателей инсулинорезистентности и могут быть включены в комплексные программы коррекции для мужчин с метаболическим синдромом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: резистентность к инсулину, метаболический синдром, силовые тренировки, силовые тренировки с ограничением кровотока, мышечная сила, упражнения с отягощениями

Для цитирования / For citation: Сверхков В.В., Быков Е.В. Влияние тренировок с ограничением кровотока на инсулинорезистентность мужчин с метаболическим синдромом: рандомизированное контролируемое исследование. Вестник восстановительной медицины. 2024; 23(5):11-21. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2024-23-5-11-21> [Sverchkov V.V., Bykov E.V. Effect of Blood Flow Restriction Training on Insulin Resistance in Men with Metabolic Syndrome: a Randomized Controlled Trial. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2024; 23(5):11-21. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2024-23-5-11-21> (In Russ.).]

* **Для корреспонденции:** Сверхков Вадим Владимирович, E-mail: vadim.sverchkov@yandex.ru, bykov@uralgufk.ru

Статья получена: 12.12.2023

Статья принята к печати: 19.02.2024

Статья опубликована: 16.10.2024

Effect of Blood Flow Restriction Training on Insulin Resistance in Men with Metabolic Syndrome: a Randomized Controlled Trial

 Vadim V. Sverchkov*,  Evgeny V. Bykov

Ural State University of Physical Culture, Chelyabinsk, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. Metabolic syndrome is defined as a pathological condition characterized by abdominal obesity, hypertension, dyslipidemia, and impaired glucose tolerance. Insulin resistance is hypothesized to underlie metabolic syndrome. Modern studies, including Mendelian randomization, have demonstrated that muscle strength and muscle mass may play an important role in the mechanisms of insulin resistance.

AIM. To establish the relationship between relative upper limb muscle strength and triglyceride/glucose index, and to evaluate the effects of different resistance exercise regimens on alternative measures of insulin resistance in men with metabolic syndrome.

MATERIALS AND METHODS. At the first stage of the study, 216 men aged from 25 to 50 years were examined. The relative muscle strength of the upper limbs in the bench press exercise and the triglyceride/glucose index were assessed. At the second stage, a randomized controlled trial was conducted, for which 60 men who met the criteria for metabolic syndrome. Men with metabolic syndrome were divided into three groups: low-intensity strength training with blood flow restriction ($n = 20$), high-intensity strength training ($n = 20$), low-intensity strength training without blood flow restriction ($n = 20$). Training was carried out 2 times a week for 12 weeks. Before and after the study, the triglycerides/glucose index, the ratio of triglycerides to high-density lipoproteins, and the combination of the triglycerides/glucose index with body mass index were assessed.

RESULTS AND DISCUSSION. It was found that the relative muscle strength of the upper limbs was inversely proportional to the triglycerides/glucose index ($r = -0.52$; $p < 0.05$) in the examined men. After 12 weeks of resistance training, statistically significant reductions in triglyceride/glucose index, triglyceride/high-density lipoprotein ratio, and triglyceride/glucose index/body mass index combination were found for the low-intensity resistance training with blood flow restriction and high-intensity resistance training groups (both, $p < 0.01$). Changes in body composition, an increase in the proportion of muscle fibers I and IIa and a decrease in the proportion of muscle fibers IIx, an increase in the activity of glucose transporters, and a decrease in systemic inflammation are the main potential mechanisms for the beneficial effects of resistance training, including in combination with blood flow restriction, on insulin resistance in men with metabolic syndrome.

CONCLUSION. There is an inverse relationship between muscle strength and triglycerides/glucose index; resistance training is an effective and safe tool for reducing alternative indicators of insulin resistance and can be included in comprehensive correction programs for men with metabolic syndrome.

KEYWORDS: insulin resistance, metabolic syndrome, resistance training, blood flow restriction resistance training, muscle strength, resistance exercise

For citation: Sverchkov V.V., Bykov E.V. Effect of Blood Flow Restriction Training on Insulin Resistance in Men with Metabolic Syndrome: a Randomized Controlled Trial. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2024; 23(5):11-21. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2024-23-5-11-21> (In Russ.).

* **For correspondence:** Vadim V. Sverchkov, E-mail: vadim.sverchkov@yandex.ru, bykov@uralgufk.ru

Received: 12.12.2023

Accepted: 19.02.2024

Published: 16.10.2024

ВВЕДЕНИЕ

Метаболический синдром (МС) в настоящее время признан глобальной эпидемией [1]. МС представляет собой совокупность различных метаболических нарушений, включая чрезмерное накопление жира в брюшной полости, гиперлипидемию, артериальную гипертензию и нарушение толерантности к глюкозе. Учитывая, что инсулинорезистентность является одним из потенциальных механизмов и центральных звеньев патогенеза МС [2], альтернативные показатели резистентности к инсулину, такие как индекс триглицериды/глюкоза (индекс TyG), соотношение триглицеридов к холестерину липопротеинов высокой плотности (ТГ/ЛПВП) и комбинации индекса триглицериды/глюкоза к индексу массы тела (TyG-ИМТ), могут быть полезны при прогнозировании и коррекции МС [3]. Результаты нескольких исследований продемонстрировали, что показатели индекса TyG,

соотношение ТГ/ЛПВП и комбинация TyG-ИМТ в значительной степени связаны с резистентностью к инсулину и сахарным диабетом 2-го типа (СД2) [4–8]. Систематические обзоры и метаанализы показали, что индекс TyG, соотношение ТГ/ЛПВП и комбинация TyG-ИМТ были независимо связаны с риском сердечно-сосудистых заболеваний, инсультов и смертностью [9–12].

По данным Американской диабетической ассоциации и Американского колледжа спортивной медицины физические упражнения играют первостепенную роль в профилактике и контроле инсулинорезистентности, предиабета, гестационного сахарного диабета, СД2 и его осложнений [13]. Традиционной формой упражнений, рекомендуемой пациентам с метаболическими заболеваниями, являются аэробные упражнения [14]. Однако недавние исследования подтвердили необходимость интеграции упражнений с отягощениями у лиц

с инсулинорезистентностью, СД2, ожирением и МС [15–18]. Мышечная сила [19] и мышечная масса [20] обратно пропорционально связаны с критериями МС, а участие в тренировках с отягощениями с различными режимами эффективно снижают уровень глюкозы, ТГ, обхват талии (ОТ), систолическое артериальное давление (САД), z-показатель тяжести МС (тМС), а также повышает ЛПВП у лиц с МС [21]. Более того, исследование с Менделевской рандомизацией продемонстрировало, что генетически обусловленное снижение силы хвата и аппендикулярной массы мышц было обратно пропорционально связано с СД2, гипертензией, неалкогольной жировой болезнью печени, ишемической болезнью сердца, инфарктом миокарда и болезнью Альцгеймера через механизм резистентности к инсулину [22]. К сожалению, на данный момент отсутствует информация о связи между относительной мышечной силой и индексом TuG , а также о влиянии упражнений с отягощениями на альтернативные показатели резистентности к инсулину у лиц с МС.

ЦЕЛЬ

Установить связь между относительной силой мышц верхних конечностей и индексом TuG , а также оценить влияние различных режимов упражнений с отягощениями на альтернативные показатели инсулинорезистентности у мужчин с МС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проходило на базе научно-исследовательского института олимпийского спорта при Уральском государственном университете физической культуры, сети фитнес-клубов «Территория спорта» г. Челябинск и медицинской клиники «Источник» г. Челябинск с сентября 2020 г. по апрель 2022 г. Исследование проходило в два этапа. Основной целью первого этапа было определение связи между относительной силой мышц верхних конечностей и индексом TuG . На первом этапе исследования было отобрано 224 мужчины в возрасте от 25 до 50 лет, которые впервые пришли в фитнес-центр. В процессе отбора были исключены мужчины, имеющие артериальную гипертензию (артериальное давление выше 140/90) ($n = 3$), лица с заболеваниями опорно-двигательного аппарата ($n = 2$), а также лица, отказавшиеся от проведения исследования по иным причинам ($n = 3$). Таким образом, в окончательный анализ включены результаты обследования 216 мужчин. У обследуемых мужчин была оценена мышечная сила в упражнении «Жим штанги лежа» (рис. 1), а также определен индекс TuG .

Современные данные некоторых эпидемиологических исследований демонстрируют обратно пропорциональную связь между мышечной силой/мышечной массой и резистентностью к инсулину/риском развития СД2 [22], хотя другие исследования не обнаруживают такой связи [23]. В этой связи целью второго этапа было провести рандомизированное контролируемое исследование, оценивающее влияние различных протоколов тренировок с отягощениями, которые применяются для повышения мышечной силы и мышечной массы, на показатели TuG , ТГ/ЛПВП и TuG -ИМТ у мужчин с МС. Поэтому на втором этапе из 216 мужчин были ото-



Рис. 1. Упражнение «Жим штанги лежа» (фотография предоставлена автором)

Fig. 1. Bench press exercise (the photo provided by the author)

браны 69, у которых был диагностирован МС согласно критериям Международной диабетической федерации (IDF), Национального института сердца, легких и крови (NHLBI), Американской кардиологической ассоциации (AHA), Всемирной кардиологической федерации (WHF), Международного общества атеросклероза (IAS) и Международной ассоциации по изучению ожирения (IASO) 2009 г. [24], где для постановки диагноза необходимо наличие минимум трех из пяти нижеперечисленных критериев: 1) увеличенная окружность талии: окружность талии ≥ 94 см у мужчин; 2) повышенное артериальное давление: артериальное давление $\geq 130/85$ мм рт. ст. или медикаментозное лечение ранее диагностированной гипертензии; 3) снижение уровня холестерина ЛПВП: < 40 мг/дл у мужчин; 4) повышенный уровень ТГ: уровень ТГ ≥ 150 мг/дл или медикаментозное лечение повышенного уровня ТГ; 5) повышенный уровень глюкозы натощак: уровень глюкозы натощак ≥ 100 мг/л или медикаментозное лечение повышенного уровня глюкозы или ранее диагностированного СД2. Три человека ($n = 3$) перед проведением второго этапа отказались от дальнейшего проведения исследования. Для рандомизации 66 участников исследования на втором этапе использовалась электронная таблица генерации случайных чисел. Каждому участнику исследования внешний наблюдатель вручал запечатанный конверт с порядковым номером внутри от 1 до 66. После этого при помощи компьютерной программы генерации случайных чисел испытуемые были распределены на три группы:

низкоинтенсивные упражнения с отягощениями в сочетании с ограничением кровотока (НИОК; $n = 22$); высокоинтенсивные упражнения с отягощениями без ограничения кровотока (ВИ; $n = 22$); низкоинтенсивные упражнения с отягощениями без ограничения кровотока (НИ; $n = 22$). Так как в группе НИОК ($n = 2$) и в группе ВИ ($n = 1$) в процессе проведения второго этапа испытуемые выполнили менее 70 % тренировочных нагрузок (посетили менее 16 тренировочных сессий), они были исключены из окончательного анализа. Двое мужчин были исключены из группы НИ ($n = 2$), а также один мужчина исключен из группы ВИ ($n = 1$), чтобы предотвратить погрешность. Таким образом, в окончательный анализ на втором этапе вошли результаты исследования 60 мужчин. Исследование было выполнено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации, у всех участников было получено письменное информированное согласие. На проведение настоящего исследования получено одобрение этического комитета ФБГОУ ВО «Уральский государственный университет физической культуры», выписка из заседания от 24.09.2019 № 1.

Критерии включения/невключения

Критерии включения на первом этапе: нетренированные мужчины в возрасте от 25 до 50 лет, у которых либо отсутствуют, либо имеются 1 критерий МС и более. Критерии включения на втором этапе: нетренированные мужчины, у которых имеется 3 и более критериев МС.

Критерии неключения для обоих этапов: острые хронические инфекционные или соматические заболевания, артериальная гипертензия (выше 140/90), СД2, тромбоз глубоких вен конечностей, заболевания опорно-двигательного аппарата и другие противопоказания к выполнению силовой нагрузки.

Критерии метаболического синдрома

У всех участников была собрана утренняя венозная кровь после 8–12-часового голодания для определения уровня глюкозы, ТГ, ЛПВП в плазме. После 5-минутного отдыха в положении сидя оценивали САД и диастолическое артериальное давление (ДАД). ОТ измеряли с помощью сантиметровой ленты на уровне верхнего гребня подвздошной кости.

Тяжесть метаболического синдрома

Z-показатель тМС оценивали по формуле:

$$\text{тМС} = -5,4473 + 0,0125 \times \text{ОТ} - 0,0251 \times \text{ЛПВП} + 0,0047 \times \text{САД} + 0,8244 \times \ln(\text{ТГ}) + 0,0106 \times \text{глюкоза},$$

где ОТ — обхват талии в сантиметрах, ЛПВП — липопротеиды высокой плотности в мг/дл, САД — систолическое артериальное давление в мм рт. ст., $\ln(\text{ТГ})$ — натуральный логарифм триглицеридов натощак в мг/дл, глюкоза натощак в мг/дл [25]. Более высокий показатель характеризует менее благоприятный метаболический статус.

Альтернативные показатели инсулинорезистентности

Индекс TyG рассчитывали по формуле:

$$\text{TyG} = \ln [\text{триглицериды (мг/дл)} \times \text{глюкоза плазмы (мг/дл)} / 2],$$

где $\ln$ — натуральный логарифм. ТГ (ммоль/л) делили на ЛПВП (ммоль/л) для оценки соотношения ТГ/ЛПВП. TyG-ИМТ рассчитывали, как произведение TyG на ИМТ.

Антропометрия и биоимпедансометрия

Длину тела и массу тела определяли для расчета ИМТ по формуле:

$$\text{ИМТ} = \frac{\text{вес (кг)}}{\text{рост (м)}^2}.$$

Мышечно-скелетную массу оценивали с помощью анализатора InBody 720.

Оценка мышечной силы

Мышечная сила у участников была определена в упражнении «Жим штанги лежа» (ЖШЛ). Тестирование проходило под контролем квалифицированного тренера по физической подготовке. Перед началом тестирования была проведена разминка на беговой дорожке в течение 5 минут до достижения пульсовой зоны 100–120 ударов в минуту. Далее участники исследования выполнили 1–2 разминочных подхода в упражнении ЖШЛ с паузой отдыха 3 минуты между подходами. Для определения повторного максимума (1 ПМ) в упражнении ЖШЛ данному контингенту испытуемых предлагался вариант, состоящий из 10 повторений в подходе до концентрического волевого отказа. Если испытуемый мог выполнить более 10 повторений, то подход останавливался. Далее по шкале Repetitions-in-Reserve (RIR) [26] оценивалась близость к концентрическому отказу. Если она составляла менее 2 повторений в запасе, то фиксировался текущий вес отягощения, если более 2 повторений, то тестирование продолжалось. Далее после 5-минутной паузы отдыха добавлялся вес отягощения (шаг 5 кг) и повторялся подход. Такой ступенчатый вариант продолжался до тех пор, пока испытуемый мог выполнить только 5–10 повторов до концентрического волевого отказа. Затем по следующей формуле рассчитывался повторный максимум:

$$1 \text{ ПМ} = w(1 + \frac{r}{30}),$$

где w — вес отягощения, r — максимальное количество повторений [27]. После этого рассчитывалась относительная мышечная сила (отн. сила) по формуле:

$$\text{отн. сила} = \left(\frac{1 \text{ ПМ}}{\text{МСМ}} \right) \times 100,$$

где 1 ПМ — 1 повторный максимум; МСМ — мышечно-скелетная масса. После этого, согласно полученным результатам, участники были распределены по квартилям относительной мышечной силы от самого высокого (Q1) до самого низкого (Q4).

Протокол и режимы тренировок с отягощениями

Участники с МС были случайным образом распределены на три группы. Первая группа (НИОК) выполняла протокол низкоинтенсивных упражнений с отягощениями в сочетании с ограничением кровотока (интенсивность — 30 % от 1 ПМ; 4 подхода в каждом упражнении; 30–15–15–15 повторов в подходе с паузой отдыха 30 сек – 1 минута между подходами и 2 минуты между упражнениями). Вторая группа (ВИ) выполняла высокоинтенсивные упражнения с отягощениями без ограничения кровотока (интенсивность — 70 % от 1 ПМ; 4 подхода в каждом упражнении; 10 повторов в каждом подходе с паузой отдыха 2 минуты между подходами и упражнениями). Третья группа (НИ) выполняла низкоинтенсивные упражнения с отягощениями без ограничения кровотока (интенсивность — 30 % от 1 ПМ; 4 подхода в каждом упражнении; 30–15–15–15 повторов в подходе с паузой отдыха 30 сек – 1 минута между подходами и 2 минуты между упражнениями). Подробный

протокол упражнений с отягощениями представлен в нашей публикации [28]. Испытуемые провели в общей сложности 24 тренировочных занятия по 2 раза в неделю на протяжении 12 недель.

Ограничение кровотока

Для создания ограничения кровотока использовалась эластичная манжета, обернутая вокруг проксимальной части плеча или бедра. Обхват эластичной ленты был уменьшен на 25 % относительно обхвата верхних и на 30 % относительно обхвата нижних конечностей [29]. Использовался прерывистый вариант ограничения кровотока (в течение подхода ограничивали кровотоки, во время паузы отдыха кровотоки восстанавливали, снимая эластичную ленту) [30].

Статистическая обработка результатов

Полученные результаты обработаны с помощью статистического пакета анализа данных Microsoft Excel. Проверку на нормальность распределения признаков проводили с использованием критериев Колмогорова — Смирнова. Для оценки корреляционной связи между признаками использовали коэффициент корреляции Пирсона r . Для выявления значимых изменений между квартилями и исследуемыми группами был использован однофакторный дисперсионный анализ. После выявления значимого влияния факторов применялся апостериорный анализ попарных сравнений с помощью критерия Тьюки. Определение статистической значимости различий зависимых выборок до и после исследования проводили с помощью t -критерия Стьюдента. Значения переменных представлены в виде $M \pm SD$, где M — среднее арифметическое, SD — стандартное (среднее квадратичное) отклонение. Выбирался уровень статистической значимости 0,05 или 0,01. Результаты считались статистически достоверными при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика участников 1-го этапа исследования, а также распределение по квартилям относительной силы мышц верхних конечностей представлена в таблице 1. Было обнаружено, что относительная сила мышц верхних конечностей обратно пропорциональна индексу TyG ($r = -0,52$; $p < 0,05$) у обследованных мужчин. Были выявлены статистически значимые различия ($p < 0,05$) по показателям TyG между Q1 и Q4, Q1 и Q3, Q2 и Q4. Также наблюдались статистически значимые различия ($p < 0,001$) по показателям: ИМТ, ОТ, САД, ТГ, глюкозы плазмы, ЛПВП, z -показателя tMC , MC между Q1 и Q4.

Перед началом второго этапа исследования не наблюдалось статистически значимой разницы между группами по всем показателям ($p > 0,05$). После 12-недельного курса упражнений с отягощениями для групп НИОК и ВИ было обнаружено статистически значимое снижение индекса TyG (НИОК, $p = 0,001$; ВИ, $p = 0,000$), ТГ/ЛПВП (НИОК, $p = 0,004$; ВИ, $p = 0,015$), комбинации TyG -ИМТ (НИОК, $p = 0,000$; ВИ, $p = 0,023$) (табл. 2). В группе НИ наблюдалась тенденция к снижению индекса TyG ($p = 0,996$), ТГ/ЛПВП ($p = 0,182$) и комбинации TyG -ИМТ ($p = 0,121$), но эти изменения не достигли статистически значимых различий (табл. 2). Апостериорный анализ попарных сравнений между группами после

исследования установил статистически значимые различия между группами НИОК и НИ по показателям TyG ($p = 0,029$), ТГ/ЛПВП ($p = 0,041$), но не для показателя TyG /ИМТ ($p = 0,614$). При этом не было обнаружено статистически значимых различий между группами НИОК и ВИ после исследования по показателям TyG ($p = 0,982$), ТГ/ЛПВП ($p = 0,983$) и TyG /ИМТ ($p = 0,994$).

В нашем исследовании были получены следующие результаты. Нами впервые была обнаружена обратная пропорциональная связь между показателем относительной силы мышц верхних конечностей и индексом TyG . Точный механизм, с помощью которого мышечная сила обратно пропорционально связана с индексом TyG , неизвестен, хотя мы предполагаем, что резистентность к инсулину и хроническое воспаление могут быть основными потенциальными связями между снижением мышечной силы и повышением индекса TyG . Считается, что индекс TyG отражает резистентность к инсулину, поскольку он рассчитывается на основе двух метаболических параметров: триглицеридов и глюкозы плазмы натощак. Известно, что индекс TyG был связан с tMC [31], а tMC была обратно пропорционально связана с относительной мышечной силой [32]. Также известно, что внутримышечное (эктопическое) накопление жира приводит к инсулинорезистентности [33], что в свою очередь связано с увеличением провоспалительных цитокинов, подавлением экспрессии транспортеров глюкозы и рецепторов к инсулину [34]. Резистентность к инсулину приводит к снижению антикатаболического действия инсулина и может привести к саркопении. К тому же повышенная активация ядерного фактора κB , вызванная провоспалительными каскадами, вызывает убиквитинирование мышечных белков и диссоциацию актиновых и миозиновых филаментов, что также может приводить к снижению мышечной силы [35].

По результатам нашего исследования было выявлено положительное влияние тренировок с отягощениями на альтернативные показатели инсулинорезистентности у лиц с МС. Как низкоинтенсивная силовая тренировка с ограничением кровотока, так и традиционная высокоинтенсивная тренировка приводили к снижению показателей индекса TyG , ТГ/ЛПВП и TyG -ИМТ у мужчин с МС.

На данный момент в научной литературе нет однозначного мнения о том, какой тип нагрузки наиболее эффективен для снижения резистентности к инсулину. Некоторые систематические обзоры продемонстрировали более эффективное воздействие комбинированного (аэробные плюс силовые тренировки) влияния на снижение инсулинорезистентности [36, 37]. К сожалению, на практике использование комбинированных тренировок порой невозможно из-за значительных временных затрат. Таким образом, поиск эффективных тренировочных протоколов, оптимизирующих недельный объем тренировок, является актуальной задачей для коррекции метаболических состояний. Несколько систематических обзоров и мета-анализов продемонстрировали, что тренировки с отягощениями эффективны для снижения резистентности к инсулину у пожилых лиц [38] и у лиц с ожирением/избыточным весом [39]. Сравнительные анализы аэробных и силовых тренировок пришли к неоднозначным выводам.

Таблица 1. Характеристика участников первого этапа исследования по квартилям относительной силы мышц верхних конечностей (M ± SD)
Table 1. Characteristics of participants of the first stage of the study by quartiles of relative upper limb muscle strength (M ± SD)

Параметры / Parameters	Общий показатель / General indicator (n = 216)	Q1 (n = 54)	Q2 (n = 54)	Q3 (n = 54)	Q4 (n = 54)	p-value
Отн. сила, кг/кг / Relative strength kg/kg	161,85 ± 18,01	179,52 ± 9,13	164,37 ± 10,21	155,94 ± 8,11	147,58 ± 11,87	0,000
Возраст, лет / Age, years	35,12 ± 9,97	34,81 ± 5,75	35,09 ± 6,12	34,01 ± 6,19	36,45 ± 7,11	0,343
Масса тела, кг / Body mass, kg	86,06 ± 10,67	74,82 ± 6,06	81,09 ± 5,34	84,72 ± 7,43	92,36 ± 8,54	0,000
Длина тела, см / Height, cm	179,82 ± 4,56	178,72 ± 5,79	179,97 ± 4,13	178,63 ± 4,34	180,18 ± 5,32	0,529
Индекс массы тела, кг/м² / Body mass index, kg/m²	26,63 ± 3,33	23,44 ± 1,84	25,03 ± 1,88	26,61 ± 2,78	28,42 ± 1,91	0,000
Обхват талии, см / Waist circumference, cm	94,76 ± 8,43	85,45 ± 4,96	90,82 ± 6,41	96,36 ± 6,29	101,09 ± 6,81	0,000
Систолическое артериальное давление, мм рт. ст. / Systolic blood pressure, mmHg	129,36 ± 9,37	120,18 ± 5,09	125,91 ± 7,89	131,01 ± 7,87	136,11 ± 5,21	0,000
Триглицериды, мг/дл / Triglycerides, mg/dl	110,91 ± 26,59	85,82 ± 12,82	104,18 ± 21,63	115,21 ± 25,85	126,09 ± 25,06	0,000
Глюкоза плазмы, мг/дл / Plasma glucose, mg/dl	98,01 ± 6,69	92,18 ± 6,05	96,27 ± 4,86	98,91 ± 4,61	101,54 ± 4,25	0,000
Липопротеиды высокой плотности, мг/дл / High density lipoproteins, mg/dl	47,21 ± 8,24	54,91 ± 5,17	51,09 ± 7,99	45,27 ± 6,08	42,27 ± 5,18	0,000
Мышечно-скелетная масса, кг / Musculoskeletal mass, kg	38,32 ± 3,83	33,54 ± 2,72	37,71 ± 1,93	40,41 ± 3,69	41,85 ± 3,15	0,000
Z-показатель тМС, балл / severity Z-score MS, score	-0,05 ± 0,57	-0,53 ± 0,31	-0,17 ± 0,51	0,18 ± 0,44	0,47 ± 0,37	0,000
Индекс триглицериды/ глюкоза / Triglycerides/glucose index	8,53 ± 0,31	8,27 ± 0,19	8,49 ± 0,25	8,62 ± 0,26	8,74 ± 0,23	0,000

Примечание: p-value — статистические различия показателей между Q1 и Q4 (апостериорный анализ проведен с помощью критерия Тьюки).
Note: p-value — statistical differences between Q1 and Q4 (post hoc analysis was carried out using Tukey's test).

Таблица 2. Динамика альтернативных индексов инсулинорезистентности у мужчин с МС на втором этапе исследования (M ± SD)**Table 2.** Dynamics of alternative insulin resistance indices in men with MS at the second stage of the study (M ± SD)

Показатель / Index		Группа исследования / Study group		
		НИОК / LIBFR (n = 20)	ВИ / HI (n = 20)	НИ / LI (n = 20)
Индекс триглицериды/глюкоза / Triglycerides/glucose index	До / Before	8,94 ± 0,11	8,93 ± 0,11	8,93 ± 0,09
	После / After	8,72 ± 0,13	8,71 ± 0,12	8,85 ± 0,12
	p-value	0,001	0,000	0,996
Триглицериды/липопротеидам высокой плотности / Triglycerides/high density lipoproteins	До / Before	1,49 ± 0,21	1,46 ± 0,21	1,47 ± 0,22
	После / After	1,04 ± 0,13	1,03 ± 0,12	1,23 ± 0,15
	p-value	0,004	0,015	0,182
Индекс триглицериды/глюкоза/индекс массы тела / Triglycerides index/glucose/body mass index	До / Before	266,72 ± 23,91	264,21 ± 21,89	263,37 ± 24,06
	После / After	244,95 ± 24,53	243,89 ± 23,04	253,21 ± 23,58
	p-value	0,000	0,023	0,121

Примечание: p-value — статистические различия между показателями до и после курса тренировок (анализ различий проведен по t-критерию Стьюдента).

Note: p-value — statistical differences between the indicators before and after the training course (differences were analyzed by Student's t-test).

Так, в сетевом метаанализе Huang L. et al. [40] было продемонстрировано, что аэробные тренировки более эффективно снижали резистентность к инсулину у лиц с преддиабетом по сравнению с силовыми тренировками. При этом в систематическом обзоре и метаанализе Bennasar-Veny M. et al. [41] только тренировки с отягощениями, но не аэробные тренировки приводили к статистически значимому снижению уровней глюкозы в плазме натощак и гликированного гемоглобина у лиц с преддиабетом. К сожалению, на данный момент в научной литературе недостаточно информация о влиянии тренировок с отягощениями для снижения резистентности к инсулину у мужчин с МС, а также отсутствует информация о применении низкоинтенсивных тренировок с отягощениями в сочетании с ограничением кровотока у этой категории населения. Наше исследование впервые демонстрирует, что низкоинтенсивные силовые тренировки в сочетании с ограничением кровотока, а также высокоинтенсивные тренировки с отягощениями эффективно снижают резистентность к инсулину у мужчин с МС.

Существует несколько возможных механизмов, почему тренировки с отягощениями способствуют снижению резистентности к инсулину. Во-первых, изменение состава тела, а именно, увеличение мышечной массы и снижение подкожного и висцерального ожирения может способствовать повышению чувствительности к инсулину и снижению риска возникновения МС [42]. При этом недавний систематический обзор и метаанализ установил, что тренировки с отягощениями эффективно снижают общий и висцеральный жир, а также увеличивают мышечную массу у людей с избыточным весом и ожирением [43]. Brooks N. et al. [44] обнаружили, что снижение резистентности к инсулину

после тренировок с отягощениями коррелирует с площадью поперечного сечения мышечных волокон I типа, что связано с сосудистыми и окислительными характеристиками этого типа волокон [45]. В нашем исследовании мы наблюдали тенденцию к большему снижению показателей ТГ/ЛПВП и комбинации ТyG-ИМТ, но не индекса ТyG в группе НИОК по сравнению с группой ВИ, хотя эти изменения не достигли статистической значимости. Объяснением этому может быть недавно проведенный систематический обзор и метаанализ, продемонстрировавший, что низкоинтенсивные силовые тренировки с ограничением кровотока могут избирательно воздействовать именно на I тип волокон, в то время как высокоинтенсивные силовые тренировки в большей степени направлены на волокна II типа [46]. Во-вторых, качественное улучшение скелетных мышц после тренировок с отягощениями способствуют снижению инсулинорезистентности. Новые данные свидетельствуют о том, что, как аэробные тренировки, так и тренировки с отягощениями оказывают влияние на адаптацию митохондрий в скелетных мышцах, что положительно связано с повышением чувствительности к инсулину [47]. Также известно, что силовые тренировки повышают содержание транспортировщиков глюкозы GLUT 4, рецепторов к инсулину, гликогенсинтазы в скелетных мышцах, что, как известно, приводит к повышению чувствительности к инсулину. Существуют и другие возможные механизмы, с помощью которых тренировки с отягощениями вызывают повышенную чувствительность к инсулину, такие как изменения в цитокинах, адипокинах или других биомаркерах иммунной системы, но на сегодняшний день недостаточно исследований, подтверждающих эти гипотезы.

Ограничения исследования

Экспериментальный дизайн не включал в себя диету с ограничением калорий, которая могла повлиять на окончательный результат. Также мы не имели возможности оценить уровень двигательной активности, калорийность рациона, употребление алкоголя, режим сна, что тоже могло повлиять на результаты исследования.

В исследование были включены только мужчины, поэтому результаты могут быть не применимы к женщинам.

Средний возраст испытуемых в нашем исследовании составлял $35,12 \pm 9,97$, и наши результаты могут быть не применимы к более возрастным группам населения.

В исследовании отсутствовала контрольная группа, которая не подвергалась тренировочному воздействию, группа, которая бы выполняла аэробные тренировки высокой/умеренной интенсивности, а также группа комбинированного воздействия. Данный дизайн с множеством групп позволил бы выявить наиболее благоприятный тип/интенсивность упражнений, а также оптимальное соотношение аэробных и силовых тренировок для снижения резистентности к инсулину у мужчин с МС.

Также в нашем исследовании решался вопрос безопасности тренировок с отягощениями. Назначенные комплексы упражнений с отягощениями хорошо переносились мужчинами с МС. О нежелательных явлениях за время проведения исследования не сообщалось, за исключением редких случаев онемения конечностей, незначительных подкожных кровоизлияниях, запаздывающей мышечной боли в группе НИОК и головокружения, низкой переносимости нагрузки и также запаздывающей мышечной боли в группе ВИ. Наши результаты

согласуются с предыдущими отчетами, где применение тренировок с отягощениями, в том числе с ограничением кровотока, имели высокий профиль безопасности даже в более возрастных группах [48], а также у лиц с различными хроническими заболеваниями [49, 50]. Более того, на основании обзора данных рандомизированных контролируемых исследований с участием взрослых с ишемической болезнью сердца было продемонстрировано, что тренировки с отягощениями имеют более низкий уровень сердечно-сосудистых осложнений по сравнению с аэробными тренировками [51]. В этом обзоре в 23 исследованиях, сообщающих о нежелательных явлениях, было зарегистрировано 63 несмертельных сердечно-сосудистых события во время проведения аэробных тренировок и тестирования, в то время как только одно сердечно-сосудистое событие произошло при тренировках с отягощениями и тестированиях 1 ПМ [51].

Необходимы дальнейшие исследования для изучения долгосрочного влияния и поиска оптимального соотношения «доза-эффект» упражнений с отягощениями, а также рационального применения аэробных и силовых тренировок для снижения тяжести проявления метаболического синдрома как у мужчин, так и у женщин в разных возрастных группах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была установлена обратно пропорциональная связь между относительной мышечной силой и индексом TyG . Также было установлено, что тренировки с отягощениями являются эффективным и безопасным инструментом для снижения резистентности к инсулину и могут быть включены в комплексные программы коррекции для мужчин с МС.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Сверчков Вадим Владимирович, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт олимпийского спорта, аспирант кафедры спортивной медицины и физической реабилитации, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет физической культуры».

E-mail: vadim.sverchkov@yandex.ru, bykov@uralgufk.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3650-0624>

Быков Евгений Витальевич, доктор медицинских наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе, заведующий кафедрой спортивной медицины и физической реабилитации, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет физической культуры».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7506-8793>

Вклад авторов. Все авторы подтверждают свое авторство в соответствии с международными критериями ICMJE (все авторы внесли значительный вклад в концепцию, дизайн исследования и подготовку статьи, прочитали и одобрили окончательный вариант до публикации). Наибольший вклад распределен следующим образом: Сверчков В.В. — разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание текста статьи, проверка и утверждение текста статьи; Быков Е.В. — разработка концепции статьи, редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи, обоснование научной значимости.

Источники финансирования. Данное исследование не было поддержано никакими внешними источниками финансирования.

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

Этическое утверждение. Авторы заявляют, что все процедуры, использованные в данной статье, соответствуют этическим стандартам учреждений, проводивших исследование, и соответствуют Хельсинкской декларации в редакции 2013 г. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет физической культуры» (протокол № 1 от 24.09.2019).

Информированное согласие. Получено письменное информированное согласие пациентов и других участников исследования на использование данных и фотографий.

Благодарности. Авторы выражают свою признательность сети фитнес-клубов «Территория спорта» г. Челябинск (Россия) и лично фитнес-директору Наумову Евгению Дмитриевичу и управляющей Щелконоговой Екатерине Сергеевне за предоставление площадки для проведения исследования, а также персональным тренерам: Мосину Илье Николаевичу, Адаменко Ярославу Алексеевичу, Марушиной Анастасии Михайловне и Авхадиевой Гуле Абдулхаевне

за помощь в проведении тренировочных занятий у исследуемого контингента, а также помощь в проведении тестирования. Также выражаем благодарность обществу с ограниченной ответственностью «ПолиКлиника» г. Челябинск (Россия) за помощь в организации забора крови

и предоставление лаборатории для проведения биохимического анализа.

Доступ к данным. Данные, подтверждающие выводы этого исследования, можно получить по обоснованному запросу у корреспондирующего автора.

ADDITIONAL INFORMATION

Vadim V. Sverchkov, Junior Researcher, Research Institute of Olympic Sports, Postgraduate Student, Department of Sports Medicine and Physical Rehabilitation, Ural State University of Physical Culture.

E-mail: vadim.sverchkov@yandex.ru, bykov@uralgufk.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3650-0624>

Evgeny V. Bykov, D.Sc. (Med), Professor, Vice-Rector for Research, Head of the Department of Sports Medicine and Physical Rehabilitation, Ural State University of Physical Culture. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7506-8793>

Author Contributions. All authors confirm their authorship in accordance with the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the concept, study design and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The largest contribution is distributed as follows: Sverchkov V.V. — development of the concept of the article, obtaining and analyzing the actual data, writing the text of the article, checking and approving the text of the article; Bykov E.V. — development of the concept of the article, editing the text of the article, verification and approval of the text of the article, substantiation of scientific significance.

Funding. This study was not supported by any external funding sources.

Disclosure. The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Ethics Approval. The authors declare that all procedures used in this article are in accordance with the ethical standards of the institutions that conducted the study and are consistent with the 2013 Declaration of Helsinki. The study was approved by the Local Ethics Committee of the Ural State University of Physical Culture, Protocol No. 1 dated 09.09.2019.

Consent for Publication. The written informed consent of patients and other study participants for the use of data and photographs was obtained.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Territory of Sports fitness club network in Chelyabinsk (Russia) and personally to fitness director Evgeny D. Naumov and manager Ekaterina S. Shchelkonogova for providing a platform for conducting research, as well as to personal trainers: Ilya Nikolaevich Mosin, Yaroslav A. Adamenko, Anastasia M. Marushina and Gula A. Avkhadieva for assistance in conducting training sessions with the studied contingent, as well as assistance in conducting testing. We also express our gratitude to the Polyclinic Limited Liability Company in Chelyabinsk (Russia) for assistance in organizing blood collection and providing a laboratory for biochemical analysis.

Data Access Statement. The data that support the findings of this study are available on reasonable request from the corresponding author.

Список литературы / References

1. Saklayen M.G. The Global Epidemic of the Metabolic Syndrome. *Curr Hypertens Rep.* 2018; 20(2): 12–26. <https://doi.org/10.1007/s11906-018-0812-z>
2. Yarbeygi H., Farrokhi F., Butler A., et al. Insulin resistance: Review of the underlying molecular mechanisms. *J Cell Physiol.* 2019; 234(6): 8152–8161. <https://doi.org/10.1002/jcp.27603>
3. Nevárez-Sida A., Guerrero-Romero F. The Triglycerides and Glucose Index: A Cost-Effectiveness Analysis Compared with the Homeostatic Model Assessment for Insulin Resistance. *Value Health Reg Issues.* 2023; 37: 49–52. <https://doi.org/10.1016/j.vhri.2023.05.001>
4. Chamroonkiadtikun P., Ananchaisarp T., Wanichanon W. The triglyceride-glucose index, a predictor of type 2 diabetes development: A retrospective cohort study. *Prim Care Diabetes.* 2020; 14(2): 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.pcd.2019.08.004>
5. Ramdas Nayak V., Satheesh P., Shenoy M., et al. Triglyceride Glucose (TyG) Index: A surrogate biomarker of insulin resistance. *J Pak Med Assoc.* 2022; 72(5): 986–988. <https://doi.org/10.47391/JPMA.22-63>
6. Li H., Miao X., Li Y. The Triglyceride Glucose (TyG) Index as a Sensible Marker for Identifying Insulin Resistance and Predicting Diabetic Kidney Disease. *Med Sci Monit.* 2023; 29: 36–49. <https://doi.org/10.12659/MSM.939482>
7. Lim T., Lee H., Lee Y. Triglyceride to HDL-cholesterol ratio and the incidence risk of type 2 diabetes in community dwelling adults: A longitudinal 12-year analysis of the Korean Genome and Epidemiology Study. *Diabetes Res Clin Pract.* 2020; 163: 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2020.108150>
8. Song B., Zhao X., Yao T., et al. Triglyceride Glucose-Body Mass Index and Risk of Incident Type 2 Diabetes Mellitus in Japanese People with Normal Glycemic Level: A Population-Based Longitudinal Cohort Study. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2022; 13: 907–927. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.907973>
9. Liu X., Tan Z., Huang Y., et al. Relationship between the triglyceride-glucose index and risk of cardiovascular diseases and mortality in the general population: a systematic review and meta-analysis. *Cardiovasc Diabetol.* 2022; 21(1): 124–143. <https://doi.org/10.1186/s12933-022-01546-0>
10. Liao C., Xu H., Jin T., et al. Triglyceride-glucose index and the incidence of stroke: A meta-analysis of cohort studies. *Front Neurol.* 2023; 13: 103–123. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1033385>
11. Yi Q., Hu H., Zeng Q. Association of triglycerides to high density lipoprotein cholesterol ratio with hypertension in Chinese adults: a cross-sectional study. *Clin Exp Hypertens.* 2023; 45(1): 219–237. <https://doi.org/10.1080/10641963.2023.2195996>
12. Nikbakht H., Najafi F., Shakiba E., et al. Triglyceride glucose-body mass index and hypertension risk in iranian adults: a population-based study. *BMC Endocr Disord.* 2023; 23(1): 156–172. <https://doi.org/10.1186/s12902-023-01411-5>
13. Colberg S., Sigal R., Yardley J., et al. Physical Activity/Exercise and Diabetes: A Position Statement of the American Diabetes Association. *Diabetes Care.* 2016; 39(11): 2065–2079. <https://doi.org/10.2337/dc16-1728>

14. Slentz C., Bateman L., Willis L., et al. Effects of aerobic vs. resistance training on visceral and liver fat stores, liver enzymes, and insulin resistance by HOMA in overweight adults from STRRIDE AT/RT. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2011; 301(5): 1033–1039. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00291.2011>
15. Kobayashi Y., Long J., Dan S., et al. Strength training is more effective than aerobic exercise for improving glycaemic control and body composition in people with normal-weight type 2 diabetes: a randomised controlled trial. *Diabetologia.* 2023; 66(10): 1897–1907. <https://doi.org/10.1007/s00125-023-05958-9>
16. Wewege M., Desai I., Honey C., et al. The Effect of Resistance Training in Healthy Adults on Body Fat Percentage, Fat Mass and Visceral Fat: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* 2022; 52(2): 287–300. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01562-2>
17. Свечков В.В., Быков Е.В. Влияние силовых тренировок с ограничением кровотока на состав тела у лиц с метаболическим синдромом: рандомизированное контролируемое исследование. *Вестник восстановительной медицины.* 2023; 22(3): 59–65. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-3-59-65> [Sverchkov V.V., Bykov E.V. Effect of Blood Flow-Restricted Strength Training on Body Composition: a Randomized Controlled Study of Patients with Metabolic Syndrome. *Bulletin of Rehabilitation Medicine.* 2023; 22(3): 59–65. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-3-59-65> (In Russ.).]
18. Ihalainen J.K., Inglis A., Mäkinen T., et al. Strength Training Improves Metabolic Health Markers in Older Individual Regardless of Training Frequency. *Front Physiol.* 2019; 10: 32–49. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00032>
19. Lee J. Associations of Relative Handgrip Strength and Aerobic and Strength Exercises with Metabolic Syndrome Prevalence. *Int J Environ Res Public Health.* 2022; 19(22): 146–159. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214646>
20. Moon H., Lee T., Chung T. Association between Lower-to-Upper Ratio of Appendicular Skeletal Muscle and Metabolic Syndrome. *J Clin Med.* 2022; 11(21): 6309–6321. <https://doi.org/10.3390/jcm11216309>
21. Свечков В.В., Быков Е.В. Позитивное влияние низкоинтенсивных силовых тренировок с ограничением кровотока на показатели обмена веществ у мужчин с метаболическим синдромом. *Журнал медико-биологических исследований.* 2023; 11(3): 310–320. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z149> [Sverchkov V.V., Bykov E.V. Low-Intensity Resistance Training with Blood Flow Restriction Improves Metabolic Parameters in Men with Metabolic Syndrome. *Journal of Medical and Biological Research.* 2023; 11(3): 310–320. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z149> (In Russ.).]
22. Ye C., Kong L., Wang Y. et al. Causal associations of sarcopenia-related traits with cardiometabolic disease and Alzheimer's disease and the mediating role of insulin resistance: A Mendelian randomization study. *Aging Cell.* 2023; 22(9): 139–152. <https://doi.org/10.1111/accel.13923>
23. Farmer R., Mathur R., Schmidt A., et al. Associations Between Measures of Sarcopenic Obesity and Risk of Cardiovascular Disease and Mortality: A Cohort Study and Mendelian Randomization Analysis Using the UK Biobank. *J Am Heart Assoc.* 2019; 8(13): 011638. <https://doi.org/10.1161/JAHA.118.011638>
24. Alberti K., Eckel R., Grundy S., et al. Harmonizing the Metabolic Syndrome: A Joint Interim Statement of the International Diabetes Federation Task Force on Epidemiology and Prevention; National Heart, Lung, and Blood Institute; American Heart Association; World Heart Federation; International Atherosclerosis Society; and International Association for the Study of Obesity. *Circulation.* 2009; 120(16): 1640–1645. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.109.192644>
25. DeBoer M., Gurka M. Clinical utility of metabolic syndrome severity scores: considerations for practitioners. *Diabetes Metab Syndr Obes.* 2017; 10: 65–72. <https://doi.org/10.2147/DMSO.S101624>
26. Bastos V., Machado S., Teixeira D. Feasibility and Usefulness of Repetitions-In-Reserve Scales for Selecting Exercise Intensity: A Scoping Review. *Percept Mot Skills.* 2024 Jun; 131(3): 940–970. <https://doi.org/10.1177/00315125241241785>
27. LeSuer D.A., McCormick J.H., Mayhew J., et al. The Accuracy of Prediction Equations for Estimating 1-RM Performance in the Bench Press, Squat, and Deadlift. *Journal of Strength and Conditioning Research.* 1997; 11(4): 211–213. <https://doi.org/10.1519/00124278-199711000-00001>
28. Свечков В.В., Быков Е.В. Влияние низкоинтенсивных силовых тренировок с ограничением кровотока на динамику силовых способностей лиц с метаболическим синдромом. Проблемы подготовки научных и научно-педагогических кадров: опыт и перспективы: сборник научных трудов молодых ученых, посвященный 50-летию УралГУФК. 2022: 177–184. [Sverchkov V.V., Bykov E.V. The influence of low-intensity strength training with blood flow restriction on the dynamics of strength abilities in persons with metabolic syndrome. *Problems of training scientific and scientific-pedagogical personnel: experience and prospects: a collection of scientific works of young scientists dedicated to the 50th anniversary of UralGUFC.* 2022; 177–184 (In Russ.).]
29. Aniceto R.R., da Silva Leandro L. Practical Blood Flow Restriction Training: New Methodological Directions for Practice and Research. *Sports Med Open.* 2022; 8(1): 87. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00475-2>
30. Freitas E., Miller R., Heishman A., et al. Acute Physiological Responses to Resistance Exercise with Continuous Versus Intermittent Blood Flow Restriction: A Randomized Controlled Trial. *Front Physiol.* 2020; 11: 132–144. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00132>
31. Couto A., Pohl H., Bauer M., et al. Accuracy of the triglyceride-glucose index as a surrogate marker for identifying metabolic syndrome in non-diabetic individuals. *Nutrition.* 2023; 109: 111–128. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2023.111978>
32. Свечков В.В., Быков Е.В. Мышечная сила и тяжесть метаболического синдрома. Олимпийский спорт и спорт для всех: Материалы XXVI Международного научного Конгресса, Казань, 08–11 сентября 2021 года. Под общей редакцией Р.Т. Бурганова. Казань: Поволжская государственная академия физической культуры, спорта и туризма. 2021: 409–411. [Sverchkov V.V., Bykov E.V. Muscle strength and severity of metabolic syndrome. *Olympic sport and sport for all: Proceedings of the XXVI International Scientific Congress, Kazan, September 08–11, 2021.* Under the general editorship of R.T. Burganova. Kazan: Volga Region State Academy of Physical Culture, Sports and Tourism. 2021; 409–411 (In Russ.).]
33. Al Saedi A., Debruin D., Hayes A., et al. Lipid metabolism in sarcopenia. *Bone.* 2022; 164: 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2022.116539>
34. Li H., Meng Y., He S., et al. Macrophages, Chronic Inflammation, and Insulin Resistance. *Cells.* 2022; 11(19): 300–318. <https://doi.org/10.3390/cells11193001>
35. Mikó A., Pótó L., Mátrai P., et al. Gender difference in the effects of interleukin-6 on grip strength — a systematic review and meta-analysis. *BMC Geriatr.* 2018; 18(1): 107–124. <https://doi.org/10.1186/s12877-018-0798-z>
36. Liang M., Pan Y., Zhong T., et al. Effects of aerobic, resistance, and combined exercise on metabolic syndrome parameters and cardiovascular risk factors: a systematic review and network meta-analysis. *Rev Cardiovasc Med.* 2021; 22(4): 1523–1533. <https://doi.org/10.31083/j.rcm2204156>
37. Sun Y., Lu B., Su W., et al. Comprehensive assessment of the effects of concurrent strength and endurance training on lipid profile, glycemic control, and insulin resistance in type 2 diabetes: A meta-analysis. *Medicine (Baltimore).* 2024; 103(12): 37494. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000037494>
38. Jiahao L., Jiajin L., Yifan L. Effects of resistance training on insulin sensitivity in the elderly: A meta-analysis of randomized controlled trials. *J Exerc Sci Fit.* 2021 Oct; 19(4): 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2021.08.002>
39. Boyer W., Toth L., Brenton M., et al. The role of resistance training in influencing insulin resistance among adults living with obesity/overweight without diabetes: A systematic review and meta-analysis. *Obes Res Clin Pract.* 2023; 17(4): 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.orcp.2023.06.002>

40. Huang L, Fang Y, Tang L. Comparisons of different exercise interventions on glycemic control and insulin resistance in prediabetes: a network meta-analysis. *BMC Endocr Disord.* 2021; 21(1): 181. <https://doi.org/10.1186/s12902-021-00846-y>
41. Bennasar-Veny M, Malih N, Galmes-Panades A, et al. Effect of physical activity and different exercise modalities on glycemic control in people with prediabetes: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2023; 14: 1233312. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1233312>
42. Lee M, Kim E, Bae S, et al. Protective role of skeletal muscle mass against progression from metabolically healthy to unhealthy phenotype. *Clin Endocrinol (Oxf).* 2019; 90(1):102–113. <https://doi.org/10.1111/cen.13874>
43. Lopez P, Taafe D, Galvão D, et al. Resistance training effectiveness on body composition and body weight outcomes in individuals with overweight and obesity across the lifespan: A systematic review and meta-analysis. *Obes Rev.* 2022; 23(5): 134–149. <https://doi.org/10.1111/obr.13428>
44. Brooks N, Layne J, Gordon P, et al. Strength training improves muscle quality and insulin sensitivity in Hispanic older adults with type 2 diabetes. *Int J Med Sci.* 2006; 4(1): 19–27. <https://doi.org/10.7150/ijms.4.19>
45. Fisher G, Windham S, Griffin P, et al. Associations of human skeletal muscle fiber type and insulin sensitivity, blood lipids, and vascular hemodynamics in a cohort of premenopausal women. *Eur J Appl Physiol.* 2017; 117(7): 1413–1422. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3634-9>
46. Schoenfeld B, Ogborn D, Piñero A, et al. Fiber-Type-Specific Hypertrophy with the Use of Low-Load Blood Flow Restriction Resistance Training: A Systematic Review. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2023; 8(2): 51–67. <https://doi.org/10.3390/jfmk8020051>
47. Zhao Y, Wu Y. Resistance Training Improves Hypertrophic and Mitochondrial Adaptation in Skeletal Muscle. *Int J Sports Med.* 2023; 44(9): 625–633. <https://doi.org/10.1055/a-2059-9175>
48. De Queiros V, Dantas M, Neto G, et al. Application and side effects of blood flow restriction technique: A cross-sectional questionnaire survey of professionals. *Medicine (Baltimore).* 2021; 100(18): 25794. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000025794>
49. Ogawa H, Nakajima T, Shibasaki I, et al. Low-Intensity Resistance Training with Moderate Blood Flow Restriction Appears Safe and Increases Skeletal Muscle Strength and Size in Cardiovascular Surgery Patients: A Pilot Study. *J Clin Med.* 2021; 10(3): 547. <https://doi.org/10.3390/jcm10030547>
50. Paluch A, Boyer W, Franklin B, et al. On behalf the American Heart Association Council on Lifestyle and Cardiometabolic Health; Council on Arteriosclerosis, Thrombosis and Vascular Biology; Council on Clinical Cardiology; Council on Cardiovascular and Stroke Nursing; Council on Epidemiology and Prevention; and Council on Peripheral Vascular Disease. Resistance Exercise Training in Individuals with and Without Cardiovascular Disease: 2023 Update: A Scientific Statement from the American Heart Association. *Circulation.* 2024; 149(3): 217–231. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000001189>
51. Hollings M, Mavros Y, Freeston J, et al. The effect of progressive resistance training on aerobic fitness and strength in adults with coronary heart disease: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Eur J Prev Cardiol.* 2017; 24(12): 1242–1259. <https://doi.org/10.1177/2047487317713329>