

БАЙЕСОВСКИЙ СЕТЕВОЙ МЕТААНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТРЕНИРОВОЧНЫХ ПРОГРАММ НА МЕТАБОЛИЗМ ЖИРОВОЙ ТКАНИ У МЫШЕЙ С ДИАБЕТОМ 2-го ТИПА

Юнь Юйфэн, q1378986064@mail.com, <http://orcid.org/0009-0005-8495-207X>
Е.Ю. Дьякова, adyakova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7653-2386>
Цюй Сяньбо, gushao@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-0237-7915>
Чжан Тунянь, 91378986064@mail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2957-3087>

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

Аннотация. Цель: сравнить влияние различных тренировочных программ на экспрессию ключевых генов метаболизма жировой ткани у мышей с диабетом 2-го типа. **Материалы и методы.** Проведен систематический поиск в международных базах данных, включая Web of Science. Байесовский сетевой метаанализ выполнен с использованием Stata 16.0. Оценивались уровни экспрессии UCP-1, PGC-1 α , PRDM-16, CIDEA и индекс HOMA-IR. **Результаты.** В анализ включено 24 исследования с участием 526 мышей. Физические нагрузки способствовали активации термогенных и метаболических генов. Длительные регулярные аэробные тренировки приводили к наиболее выраженному увеличению UCP-1 и PGC-1 α , что отражает усиление митохондриальной активности. Плавание демонстрировало максимальный эффект на повышение PRDM-16 и снижение HOMA-IR, а высокоинтенсивные интервальные тренировки в большей степени влияли на массу тела. **Заключение.** Полученные данные подтверждают, что длительные аэробные тренировки, плавание и высокоинтенсивные интервальные нагрузки являются эффективными стратегиями модуляции метаболизма жировой ткани и показателей инсулинорезистентности у мышей с диабетом 2-го типа. Результаты могут служить основой для дальнейших экспериментальных исследований, направленных на уточнение механизмов адаптации жировой ткани к физической нагрузке.

Ключевые слова: физические упражнения, диабет 2-го типа, липидный метаболизм, сетевой метаанализ, инсулинорезистентность

Для цитирования: Байесовский сетевой метаанализ эффектов различных тренировочных программ на метаболизм жировой ткани у мышей с диабетом 2-го типа / Юйфэн Юнь, Е.Ю. Дьякова, Цюй Сяньбо, Чжан Тунянь // Человек. Спорт. Медицина. 2026. Т. 26, № 3. С. 24–31. DOI: 10.14529/hsm260303

Original article
DOI: 10.14529/hsm260303

BAYESIAN NETWORK META-ANALYSIS OF THE EFFECTS OF DIFFERENT EXERCISE REGIMENS ON ADIPOSE TISSUE METABOLISM IN TYPE 2 DIABETIC MICE

Yun Yuufen, q1378986064@mail.com, <http://orcid.org/0009-0005-8495-207X>
E.Yu. Dyakova, adyakova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7653-2386>
Qu Xianbo, gushao@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-0237-7915>
Zhang Tongyan, 91378986064@mail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2957-3087>

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract. Aim. The aim of this study was to compare the effects of various exercise regimens on the expression of key genes involved in adipose tissue metabolism in mice with type 2 diabetes. **Materials and methods.** A systematic search was conducted across international databases, including Web of Science. A Bayesian network meta-analysis was performed using Stata 16.0. The evaluated outcomes included expression levels of UCP-1, PGC-1 α , PRDM-16, CIDEA, and the HOMA-IR index. **Results.** Twenty-four

studies involving 526 mice were included. Physical exercise consistently enhanced the expression of thermogenic and metabolic genes. Long-term regular aerobic training produced the most pronounced increases in UCP-1 and PGC-1 α , indicating enhanced mitochondrial activity. Swimming demonstrated the greatest effect on elevating PRDM-16 expression and reducing HOMA-IR, while high-intensity interval training had a greater impact on body weight. **Conclusion.** These findings confirm that long-term aerobic training, swimming, and high-intensity interval training serve as effective strategies for modulating adipose tissue metabolism and insulin resistance in mouse models of type 2 diabetes. The results contribute to a more profound understanding of exercise-induced adaptations in adipose tissue and provide a foundation for future preclinical research.

Keywords: physical exercise, type 2 diabetes, lipid metabolism, network meta-analysis, insulin resistance

For citation: Yuyfen Yun, Dyakova E.Yu., Qu Xianbo, Zhang Tongyan. Bayesian network meta-analysis of the effects of different exercise regimens on adipose tissue metabolism in type 2 diabetic mice. *Human. Sport. Medicine*. 2026;26(3):24–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm260303

Введение. Диабет является все более серьезной глобальной проблемой здоровья. Основная патофизиология сахарного диабета 2-го типа включает снижение секреции инсулина, повышение инсулинорезистентности, увеличение секреции глюкозы в печени и механизмы, связанные с жировыми клетками [1]. Жировая ткань подразделяется на белую и бурую в зависимости от функции и морфологии. Избыточное накопление энергии, связанное с ожирением, в основном происходит в белой жировой ткани, тогда как бурая жировая ткань представляет собой термогенную ткань, ответственную за сжигание энергии путем теплопродукции. Эта ткань содержит множество небольших липидных капель [2]. PGC-1 α является важным посредником в процессе бурого жиroadобразования, регулируя различные механизмы митохондриального метаболизма. Дефицит PGC-1 α значительно снижает индукцию термогенных генов [3], таких как UCP-1 и FGF21 [4], которые влияют на регуляцию энергетического метаболизма [5]. Белок UCP1 является центральным элементом термогенеза в бурой жировой ткани и системного энергетического гомеостаза, его считают мощным регулятором общего энергетического метаболизма у грызунов и людей [6]. Бурый жир состоит из пористых липидных капель небольшой площади, а прогениторные клетки бурой жировой ткани в процессе развития инициируют экспрессию гена PRDM16, что приводит к их превращению в зрелые бурые адипоциты [7]. Недавно было предложено использовать методы, направленные на индукцию бурого фенотипа в белой жировой ткани и повышение активности бурой жировой ткани в качестве терапии метаболических заболеваний, таких как диабет 2-го типа [8].

Физические упражнения имеют важное значение для комплексного управления патогенезом диабета 2-го типа. Различные виды упражнений, включая аэробные тренировки, силовые тренировки, комбинированные тренировки и высокоинтенсивные интервальные тренировки (НИТ) [9], могут улучшить здоровье и контроль уровня сахара в крови у пациентов с диабетом 2-го типа, постпрандиальную гипергликемию. Режим физических упражнений является важным фактором, влияющим на эффективность лечения, однако вопрос о том, какие упражнения оказывают наилучшее влияние на липидный обмен у больных сахарным диабетом, остается спорным. Сетевой мета-анализ был проведен для оценки влияния различных программ физических упражнений на липидный обмен у животных с диабетом 2-го типа, что может послужить основой для дальнейших исследований, направленных на разработку возможных стратегий физической активности в рамках будущих интервенционных исследований.

Материалы и методы. Критерии включения:

- Тип исследования: рандомизированные контролируемые испытания.
- Объект исследования: мышцы.
- Вид физической нагрузки: разделение на группы было осуществлено по типам физических упражнений: регулярные аэробные упражнения (AE), силовые упражнения (RE), высокоинтенсивные интервальные тренировки (НИТ), плавание (SE), умеренные выносливые упражнения (END), интервальные тренировки средней интенсивности (MIT), свободный бег с аэробными упражнениями (VOL AE).
- Показатели: масса тела, уровень экспрессии ключевых генов, связанных с липид-

ным метаболизмом (UCP-1, PRDM-16, PGC-1 α , CIDEA), индекс инсулинорезистентности (HOMA-IR).

Стратегия поиска: исследователи выполняли поиск в соответствии с планом. Базы данных для поиска включали PubMed, Scopus, EBSCO, Web of Science, CNKI, охватывая период от создания баз до апреля 2025 года. Поисковые термины включали «type 2 diabetes», «Type 2 Diabet», «Exercises», «Tissue Brown Adipose», «brown-like fat».

Статистические методы: данные, извлеченные из исследований, предварительно обрабатывались с помощью программного обеспечения Excel 2016 и преобразовывались в форму средней разницы и стандартного отклонения между показателями до и после вмешательства. Определение наилучшего вида тренировок осуществлялось путем построения графика площади под кривой ранжирования. Наличие эффекта малого размера выборки или публикационной предвзятости оценивалось с помощью скорректированной воронкообразной диаграммы.

Результаты. Включено всего 24 статьи, все на английском языке, включая 526 экспериментальных животных. В итоговую группу входили исследования с беговой до-

рожкой, аэробные упражнения (AE), силовые упражнения (RE), высокоинтенсивные интервальные тренировки (HIIT), плавание (SE), умеренные аэробные тренировки (END), тренировки средней интенсивности (MIT) и свободный бег (VOL AE). Ключевые характеристики включенных исследований представлены на рис. 1.

Сетевой граф (рис. 2) показывает, что количество образцов для аэробных упражнений (AE) и высокоинтенсивных интервальных тренировок (HIIT) было наибольшим. В двух исследованиях проводилось прямое сравнение аэробных упражнений (AE), силовых упражнений (RE) и высокоинтенсивных интервальных тренировок (HIIT).

В отношении увеличения уровня экспрессии CIDEA свободный бег был эффективнее, чем отсутствие нагрузки, разница была статистически значимой ($P < 0,05$).

Длительные регулярные беговые тренировки (AE) имели самые высокие значения SUCRA для UCP-1 и PGC-1 α – соответственно 75,5 и 92,7 %, а для увеличения экспрессии PRDM-16 и снижения индекса инсулинорезистентности (HOMA-IR) плавание (SE) имело самые высокие значения SUCRA – 84 %. Подробные данные представлены на рис. 3.

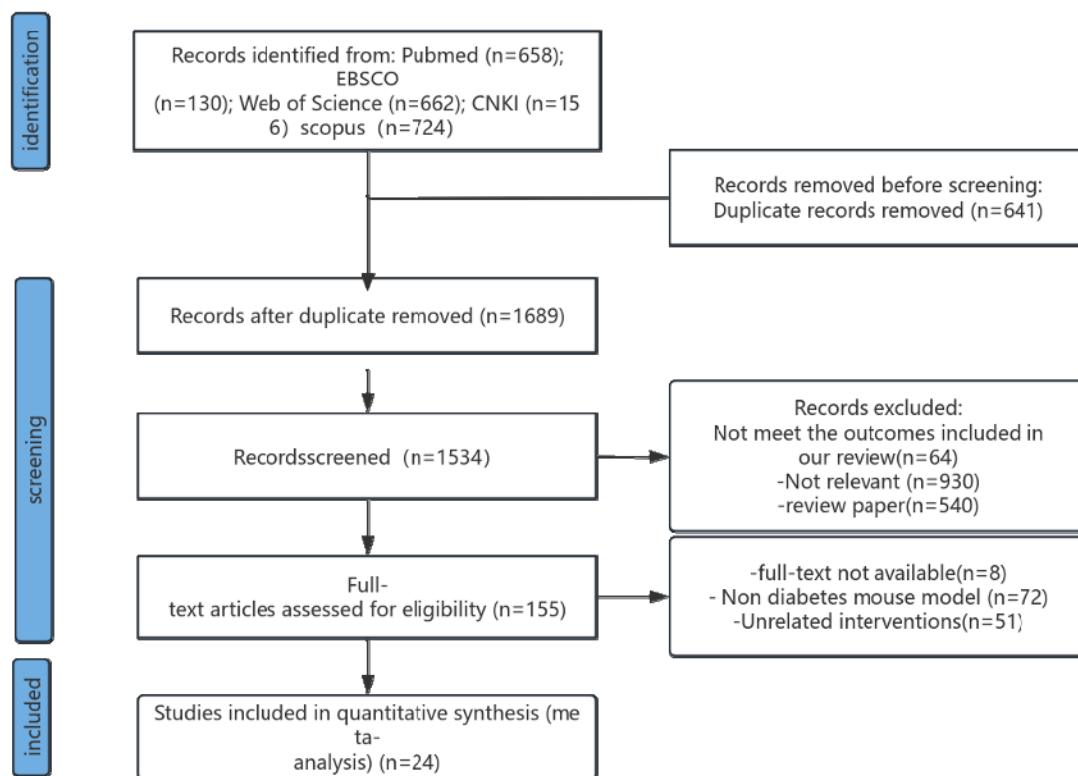


Рис. 1. Этапы поиска и отбора литературы
Fig. 1. Literature search and selection stages

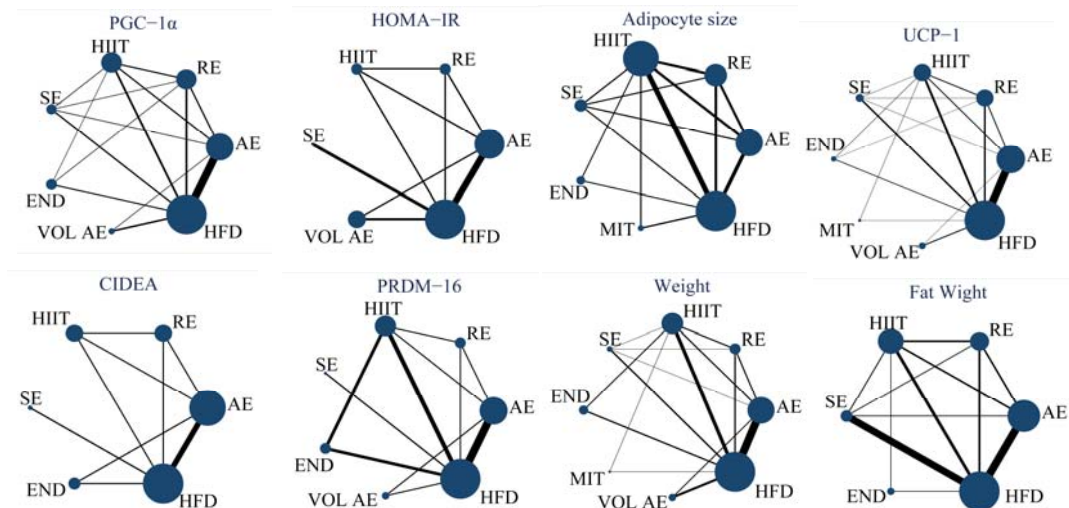


Рис. 2. Сетевая диаграмма взаимосвязей между типами тренировок и исследуемыми показателями
Fig. 2. Network diagram of the relationships between exercise types and evaluated indicators

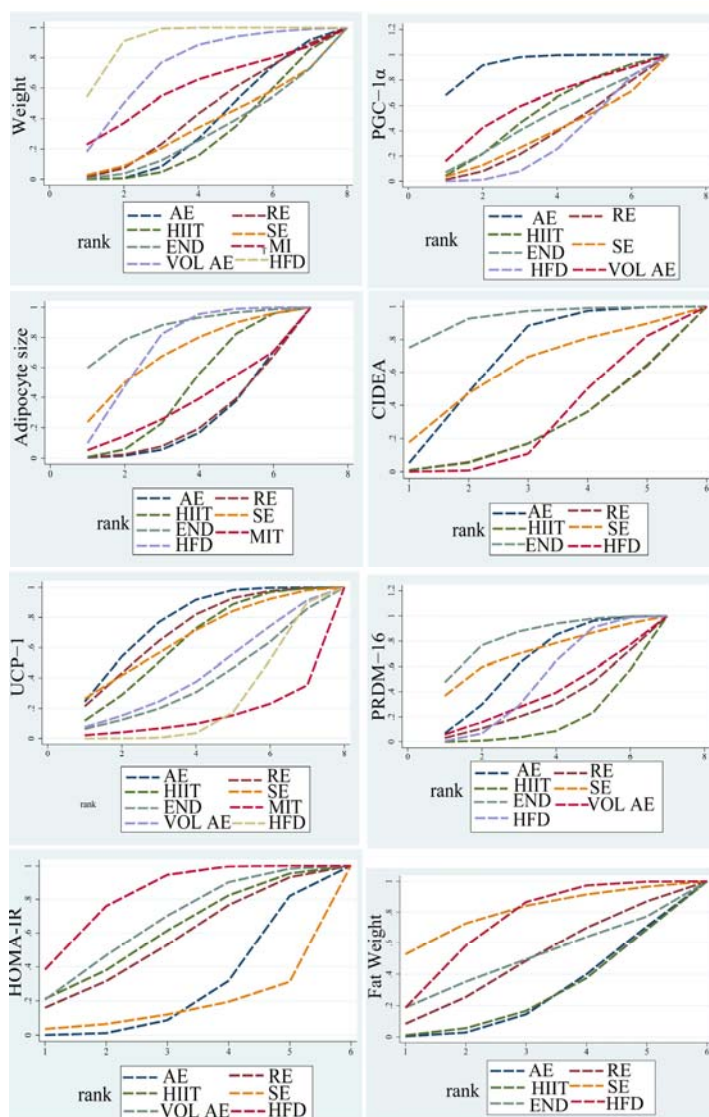


Рис. 3. Кумулятивные вероятности ранжирования эффективности
тренировочных программ (SUCRA)
Fig. 3. Cumulative ranking probabilities (SUCRA) for exercise effectiveness

Большинство точек находятся внутри границ воронкообразного графика, симметрия диаграммы сохраняется, существенного риска публикационного смещения не выявлено. Подробные данные представлены на рис. 4.

Аномалии жирового обмена являются основным фактором, способствующим развитию диабета 2-го типа. В экспериментах на людях и моделях грызунов с диабетом 2-го типа было

доказано, что физическая активность может оказывать положительное влияние на инсулинорезистентность и жировой обмен [10]. В данном исследовании путем сетевого мета-анализа сравнивались различные программы физических упражнений для улучшения состояния мышечной ткани с диабетом 2-го типа. Результаты показали, что длительные регулярные беговые тренировки (АЕ) значительно повы-

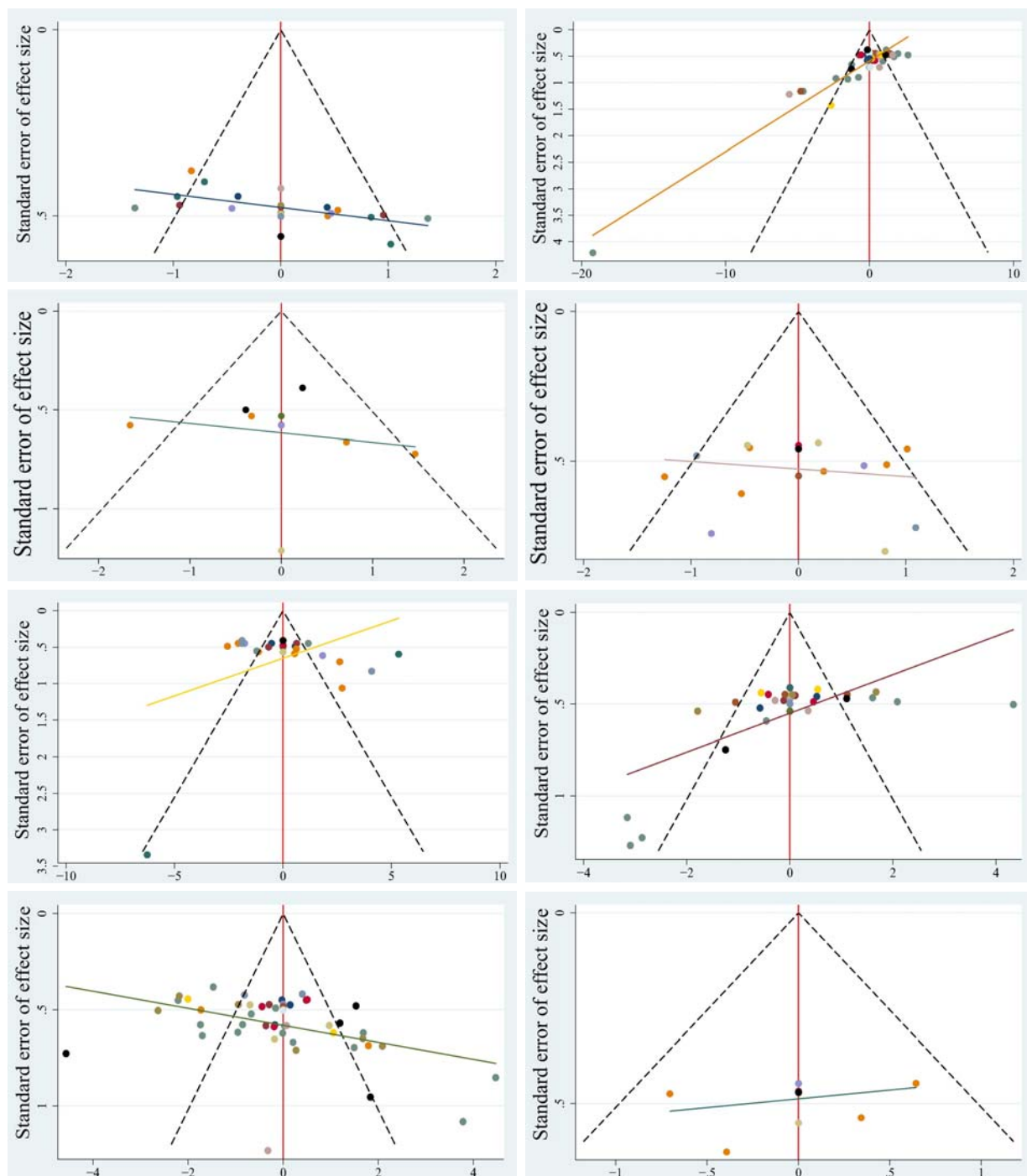


Рис. 4. Воронкообразная диаграмма оценки публикационного смещения
Fig. 4. Funnel plot for publication bias assessment

шают уровень экспрессии UCP-1 и PGC-1 α , и эти результаты превосходят другие виды упражнений. Плавание (SE) оказалось наиболее эффективным в повышении уровня экспрессии PRDM-16 и снижении индекса инсулинорезистентности (HOMA-IR), а высокоинтенсивные интервальные тренировки (НИТ) оказались наиболее эффективными для снижения массы тела.

Физические упражнения вызывают благоприятные адаптации в тканях, стимулируя секрецию факторов из белой жировой ткани, бурой жировой ткани и других тканей, что противодействует ожирению и метаболическим нарушениям [11, 12]. Однако некоторые исследования показывают, что высокожировая диета повышает термогенную активность межлопаточной и аортальной бурой жировой ткани у мышей, тогда как физическая нагрузка, напротив, подавляет её и снижает уровни экспрессии PGC-1 α и UCP-1 [13].

Польза физических упражнений для диабетиков, включая улучшение состояния мышц и жировой ткани, широко признана [14, 15]. В этом исследовании сравнивались эффекты различных видов упражнений на жировую ткань для определения оптимальной программы физических упражнений. Результаты показали, что длительные регулярные беговые тренировки наиболее эффективны для улучшения уровня UCP-1 у мышей с диабетом 2-го типа, что соответствует результатам исследования Yifan Guo и др. Результаты чистого метаанализа показали, что интервальные тренировки высокой интенсивности превосходят интервальные тренировки умеренной интенсивности. Также длительные регулярные беговые тренировки превосходят другие виды упражнений в увеличении экспрессии PGC-1 α . Это подтверждает, что для индукции экспрессии UCP-1 под влиянием упражнений необходим PGC-1 α , особенно при длительных тренировках [17], и что у мышей с гиперэкспрессией PGC-1 α уровень мРНК UCP-1 также значительно повышен [16]. Также имеются данные, показывающие, что, хотя НИТ и МІСТ улучшают поглощение глюкозы скелетными мышцами и подкожной белой жировой тканью, они не оказывают стимулирующего эффекта на бурую жировую ткань, а в некоторых случаях даже снижают её способность к утилизации глюкозы [17].

Плавание как основной вид нагрузочных

упражнений имеет преимущество в устранении ограничений, связанных с ожирением и сопутствующими проблемами. Плавание также доказало свою способность увеличивать чувствительность к инсулину у животных с диабетом [18] и снижать индекс инсулинорезистентности [19]. Наши результаты показали, что плавание (SE) наиболее эффективно снижает индекс инсулинорезистентности (HOMA-IR) по сравнению с регулярными аэробными упражнениями и другими видами тренировок. Выработка PRDM16 может способствовать увеличению энергозатрат, улучшению толерантности к глюкозе и чувствительности к инсулину [20]. Согласно проведенному анализу, плавание более эффективно увеличивает экспрессию PRDM-16, в то время как среди других упражнений высокоинтенсивные интервальные тренировки значительно эффективнее, чем умеренные аэробные тренировки, что согласуется с результатами других исследований, показывающих, что высокоинтенсивные интервальные тренировки более эффективны для контроля гликемии, снижения веса, метаболического и сердечно-сосудистого состояния у пациентов с диабетом 2-го типа по сравнению с умеренными упражнениями [21, 22]. Высокоинтенсивные интервальные тренировки оказывают более сильное стимулирующее воздействие на экспрессию UCP-1 в бурой жировой ткани у животных с ожирением по сравнению с умеренными упражнениями, также увеличивая мультицеллюлярный и митохондриальный объем жировой ткани, в то время как умеренные упражнения не показали такого эффекта [23].

Заключение. Согласно проведенному анализу, длительные регулярные беговые тренировки, плавание и высокоинтенсивные интервальные тренировки могут быть эффективными стратегиями для улучшения жирового обмена у мышей с диабетом 2-го типа. Наши данные показывают, что физические упражнения влияют не только на общее состояние метаболизма, но и на ключевые молекулярные механизмы, связанные с термогенезом и инсулиночувствительностью. Кроме того, при составлении программы упражнений помимо различных видов физической активности необходимо учитывать такие факторы, как интенсивность упражнений, количество подходов и повторений.

Список литературы / References

1. Boström P., Wu J., Jedrychowski M.P. et al. A PGC1- α -dependent Myokine that Drives Brown-fat-like Development of White Fat and Thermogenesis. *Nature*, 2012, vol. 481, no. 7382, pp. 463–468. DOI: 10.1038/nature10777
2. Cannon B., Nedergaard J. Brown Adipose Tissue: Function and Physiological Significance. *Physiological Reviews*, 2004, vol. 84, no. 1, pp. 277–359. DOI: 10.1152/physrev.00015.2003
3. Chen K.Y., Brychta R.J., Abdul Sater Z. et al. Opportunities and Challenges in the Therapeutic Activation of Human Energy Expenditure and Thermogenesis to Manage Obesity. *Journal of Biological Chemistry*, 2020, vol. 295, no. 7, pp. 1926–1942. DOI: 10.1074/jbc.REV119.007363
4. Chow L.S., Gerszten R.E., Taylor J.M. et al. Exerkines in Health, Resilience and Disease. *Nature Reviews Endocrinology*, 2022, vol. 18, no. 5, pp. 273–289. DOI: 10.1038/s41574-022-00641-2
5. De Matteis R., Lucertini F., Guescini M. et al. Exercise as a New Physiological Stimulus for Brown Adipose Tissue Activity. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 582–590. DOI: 10.1016/j.numecd.2012.01.013
6. Fisher F.M., Kleiner S., Douris N. et al. FGF21 Regulates PGC-1 α and Browning of White Adipose Tissues in Adaptive Thermogenesis. *Genes & Development*, 2012, vol. 26, no. 3, pp. 271–281. DOI: 10.1101/gad.177857.111
7. Ghiasi R., Naderi R., Sheervalilou R., Alipour M.R. Swimming Training by Affecting the Pancreatic Sirtuin1 (SIRT1) and Oxidative Stress, Improves Insulin Sensitivity in Diabetic Male Rats. *Hormone and Molecular Biology and Clinical Investigation*, 2019, vol. 40, no. 3. DOI: 10.1515/hmbci-2019-0011
8. Ikeda K., Yamada T. UCP1 Dependent and Independent Thermogenesis in Brown and Beige Adipocytes. *Frontiers in Endocrinology*, 2020, vol. 11, art. 498. DOI: 10.3389/fendo.2020.00498
9. Kanaley J.A., Colberg S.R., Corcoran M.H. et al. Exercise/Physical Activity in Individuals with Type 2 Diabetes: A Consensus Statement from the American College of Sports Medicine. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2022, vol. 54, no. 2, pp. 353–368. DOI: 10.1249/mss.0000000000002800
10. Liubaerjijin Y., Terada T., Fletcher K., Boulé N.G. Effect of Aerobic Exercise Intensity on Glycemic Control in Type 2 Diabetes: a Meta-analysis of Head-to-head Randomized Trials. *Acta Diabetologica*, 2016, vol. 53, no. 5, pp. 769–781. DOI: 10.1007/s00592-016-0870-0
11. Mirtajaddini-Goki M., Abbaspour M., Kordestani Z., Yeganeh-Hajahmadi M. Effects of Two Types of Exercises on MCT1 and GLUT4 Expression in Visceral White Adipose Tissue in Type I Diabetic Rats. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2024, vol. 62, no. 5. DOI: 10.56042/ijeb.v62i05.1477
12. Motiani P., Virtanen K.A., Motiani K.K. et al. Decreased Insulin-stimulated Brown Adipose Tissue Glucose Uptake After Short-term Exercise Training in Healthy Middle-aged Men. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 2017, vol. 19, no. 10, pp. 1379–1388. DOI: 10.1111/dom.12947
13. Pold R., Jensen L.S., Jessen N. et al. Long-term AICAR Administration and Exercise Prevents Diabetes in ZDF Rats. *Diabetes*, 2005, vol. 54, no. 4, pp. 928–934. DOI: 10.2337/diabetes.54.4.928
14. Rahman M.M., Kwon H.S., Kim M.J. et al. Melatonin Supplementation Plus Exercise Behavior Ameliorate Insulin Resistance, Hypertension and Fatigue in a Rat Model of Type 2 Diabetes Mellitus. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2017, vol. 92, pp. 606–614. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.05.035
15. Rajakumari S., Wu J., Ishibashi J. et al. EBF2 Determines and Maintains Brown Adipocyte Identity. *Cell Metabolism*, 2013, vol. 17, no. 4, pp. 562–574. DOI: 10.1016/j.cmet.2013.01.015
16. Ringholm S., Grunnet Knudsen J., Leick L. et al. PGC-1 α is Required for Exercise- and Exercise Training-induced UCP1 Up-regulation in Mouse White Adipose Tissue. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, no. 5, e64123. DOI: 10.1371/journal.pone.0064123
17. Samsudeen H., Shree Pavithra De Varaj, Kandasamy K. Unraveling the Therapeutic Potential of Muscle Strengthening Exercises for Reversing Diabetes Mellitus. *Current Diabetes Reviews*, 2024. DOI: 10.2174/0115733998275876240125064716
18. Schlein C., Talukdar S., Heine M. et al. FGF21 Lowers Plasma Triglycerides by Accelerating Lipoprotein Catabolism in White and Brown Adipose Tissues. *Cell Metabolism*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 441–453. DOI: 10.1016/j.cmet.2016.01.006

19. Seale P., Conroe H.M., Estall J. et al. Prdm16 Determines the Thermogenic Program of Subcutaneous White Adipose Tissue in Mice. *Journal of Clinical Investigation*, 2011, vol. 121, no. 1, pp. 96–105. DOI: 10.1172/jci44271
20. Teixeira de Lemos E., Pinto R., Oliveira J. et al. Differential Effects of Acute (Extenuating) and Chronic (Training) Exercise on Inflammation and Oxidative Stress Status in an Animal Model of Type 2 Diabetes Mellitus. *Mediators of Inflammation*, 2011, vol. 2011, art. 253061. DOI: 10.1155/2011/253061
21. Tjønnå A.E., Lee S.J., Rognmo Ø. et al. Aerobic Interval Training Versus Continuous Moderate Exercise as a Treatment for the Metabolic Syndrome: a Pilot Study. *Circulation*, 2008, vol. 118, no. 4, pp. 346–354. DOI: 10.1161/circulationaha.108.772822
22. Uldry M., Yang W., St-Pierre J. et al. Complementary Action of the PGC-1 Coactivators in Mitochondrial Biogenesis and Brown Fat Differentiation. *Cell Metabolism*, 2006, vol. 3, no. 5, pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.cmet.2006.04.002
23. Wang N., Liu Y., Ma Y., Wen D. High-intensity Interval Versus Moderate-intensity Continuous Training: Superior Metabolic Benefits in Diet-induced Obesity Mice. *Life Sciences*, 2017, vol. 191, pp. 122–131. DOI: 10.1016/j.lfs.2017.08.023

Информация об авторах

Юйфэнь Юнь, аспирант факультета физической культуры, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

Дьякова Елена Юрьевна, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры спортивно-оздоровительного туризма, спортивной физиологии и медицины факультета физической культуры, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

Цюй Сяньбо, аспирант факультета физической культуры, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

Чжан Тунянь, аспирант факультета физической культуры, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

Information about the authors

Yun Yuyfen, Postgraduate Student, Faculty of Physical Education, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Elena Yu. Dyakova, Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Sports and Health Tourism, Sports Physiology and Medicine, Faculty of Physical Education, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Qu Xianbo, Postgraduate Student, Faculty of Physical Education, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Zhang Tongyan, Postgraduate Student, Faculty of Physical Education, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026

The article was submitted 22.01.2026