

ЛИПОВАЯ КИСЛОТА В ПОДДЕРЖАНИИ АНТИОКСИДАНТНОЙ СИСТЕМЫ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПОРТСМЕНОВ

А.С. Розенфельд¹, letchik45@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2041-0045>

К.А. Рямова^{1,2}, ks.1608@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6755-4698>

Ж.И. Терюшкова^{3,4}, danil-porov97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6460-2962>

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

³ Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск, Россия

⁴ Городская клиническая больница № 8, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель: определить эффективность действия липоевой кислоты на работоспособность и функционирование антиоксидантной системы спортсменов, проходящих спортивно-оздоровительный сбор на подготовительном этапе годового тренировочного цикла. **Материалы и методы.** В исследовании участвовало 13 юношей: специализация – футбол, квалификация – 1-й разряд, возраст – 18–21 год. Экспериментальная группа – 7 человек – принимала per os раз в сутки 600 мг α -липоевой кислоты в течение двух недель. Для выявления воздействия α -липоевой кислоты на процессы перекисного окисления липидов и работоспособность испытуемым было предложено выполнить ряд функциональных тестов, при выполнении которых производился забор крови для исследования ряда биохимических показателей: pH капиллярной крови; уровень лактата, пирувата, витаминов Е, малонового диальдегида и диеновых конъюгатов. **Результаты.** Прием спортсменами α -липоевой кислоты способствовал: снижению уровня малонового диальдегида – токсичного продукта перекисного окисления липидов; улучшению работоспособности на 12 %; уменьшению проявлений метаболического ацидоза; некоторому уменьшению концентрации α -токоферола в плазме крови, что не снижает эффективности α -липоевой кислоты в поддержании антиоксидантной системы. **Заключение.** Положительный эффект приёма спортсменами α -липоевой кислоты скорее всего связан с расширением возможностей функционирования антиоксидантной системы за счет купирования свободно-радикальных форм, тем самым обеспечивая поддержание целостности клеточных структур, pH крови и активности ферментов, ответственных за поставку пирувата в цикл Кребса и транспорт восстановительных эквивалентов в дыхательную цепь митохондрий.

Ключевые слова: работоспособность, малоновый диальдегид, ацидоз, PWC-170, гликолиз, адаптация, пируватдегидрогеназа

Для цитирования: Розенфельд А.С., Рямова К.А., Терюшкова Ж.И. Липоевая кислота в поддержании антиоксидантной системы и работоспособности спортсменов // Человек. Спорт. Медицина. 2025. Т. 25, № 3. С. 7–17. DOI: 10.14529/hsm250301

THE ROLE OF LIPOIC ACID IN MAINTAINING THE ANTIOXIDANT SYSTEM AND ATHLETIC PERFORMANCE

A.S. Rosenfeld¹, letchik45@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2041-0045>

K.A. Ryamova^{1,2}, ks.1608@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6755-4698>

Zh.I. Teryushkova^{3,4}, daniel-popov97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6460-2962>

¹ Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

² Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia

³ South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia

⁴ City Clinical Hospital No. 8, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Aim: to evaluate the efficacy of lipoic acid in enhancing athletic performance and modulating the antioxidant system in athletes undergoing a preparatory training camp within their annual training cycle. **Materials and methods.** The study involved 13 male football players (1st category, aged 18–21). The experimental group (n = 7) received 600 mg of α -lipoic acid orally once daily for two weeks. To assess the effects of α -lipoic acid on lipid peroxidation and physical performance, participants performed a series of functional tests, with blood samples collected for biochemical analysis (capillary blood pH, lactate and pyruvate levels, vitamin E, malondialdehyde, and diene conjugates). **Results.** Supplementation with α -lipoic acid resulted in a reduction in malondialdehyde levels (a toxic byproduct of lipid peroxidation); a 12% improvement in physical performance; attenuation of metabolic acidosis; a slight decrease in plasma α -tocopherol concentration, which did not compromise the efficacy of α -lipoic acid in supporting the antioxidant system. **Conclusion.** The beneficial effects of α -lipoic acid supplementation in athletes are likely attributed to enhanced antioxidant capacity via neutralization of free radicals, thereby preserving cellular integrity, blood pH, and enzymatic activity responsible for pyruvate delivery to the Krebs cycle and electron transfer to the mitochondrial respiratory chain.

Keywords: athletic performance, malondialdehyde, acidosis, PWC-170, glycolysis, adaptation, pyruvate dehydrogenase

For citation: Rosenfeld A.S., Ryamova K.A., Teryushkova Zh.I. The role of lipoic acid in maintaining the antioxidant system and athletic performance. *Human. Sport. Medicine*. 2025;25(3):7–17. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm250301

Введение. Многими исследователями экспериментально доказано: спортивная нагрузка неизбежно приводит к активации обменных процессов, сопровождаемых наработкой различных метаболитов и гормонов, в том числе и биомаркеров окислительного стресса. Уровень биомаркеров во многом зависит от объема и интенсивности физической нагрузки, от сформированности адаптационных механизмов атлета, а также от ряда генетически детерминированных факторов [14, 17].

Окислительный стресс – это состояние, при котором нарушается баланс прооксидантной и антиоксидантной систем. То есть уровень наработки свободных радикалов (СР) превышает адаптивные возможности антиоксидантной системы. В результате равновесное состояние смещается в сторону образования свободных радикалов [2]. Существует множество видов свободных радикалов. Это и атомы

водорода, и ионы переходных металлов, и радикалы с центром в углероде, в сере. Наиболее важным классом радикалов, образующихся при физической нагрузке, являются радикалы, образованные из молекулярного кислорода, именно их называют активными формами кислорода (АФК). К таким относятся: супероксидный радикал – ($O_2^{\cdot-}$); синглетный кислород – (1O_2); гидроксильный радикал (HO^{\cdot}); оксид азота (NO^{\cdot}) [12]. Вступая во взаимодействие с белками, липидами, РНК, ДНК, клеточными и митохондриальными мембранами, они нарушают их структурно-функциональную целостность, что приводит к изменению экспрессии генов, тем самым способствуя апоптозу здоровых клеточных структур и системному воспалению [14]. Все это нарушает нормальное течение целого ряда метаболических реакций, что в конечном итоге может приводить к тяжелым системным заболеваниям.

Однако за последние два десятилетия было выявлено, что активные формы кислорода играют в жизни человека не только повреждающую функцию, но и эволюционно значимую. Важно знать, по какому пути развития пойдет клетка и ее структурные компоненты после активного взаимодействия со свободно-радикальными комплексами. А именно: смогут ли её структурные компоненты и ферментативные системы восстановиться и подготовиться (адаптироваться) к последующей агрессивной атаке или пойдут по пути запрограммированной «смерти» (апоптоза) или некроза [16].

В.П. Скулачев считает, что апоптоз играет значимую роль в формировании системных адаптационно-приспособительных механизмов, противодействующих острому окислительному стрессу. По его мнению, апоптоз способствует смене популяции «устаревших» – малоадаптивных – клеточных структур на новые клеточные формации с новыми – более выраженными – адаптационными ресурсами [6]. По нашему мнению, АФК, продуцируемые в процессе физических нагрузок, выполняют важнейшую роль в формировании новых – адаптированных – клеточных популяций, способных переносить окислительный стресс со всеми его агрессивными проявлениями. В этой ситуации тренер должен придерживаться золотого правила: физическая нагрузка не должна быть запредельной и не способствовать формированию грубых структурных повреждений, приводящих клетки к некрозу. В процессе эволюционного развития у всех аэробных организмов, в том числе и у человека, сформировалась адаптационно-функциональная система (антиоксидантная система), способная предохранять жизненно важные клеточные структуры от агрессивного воздействия активных форм кислорода. Антиоксидантная система обеспечивает паритетное равновесие окислительно-восстановительных реакций и рН водных сред организма.

Напрямую измерить уровень активности прооксидантной системы (система, участвующая в наработке АФК) – довольно сложная процедура, так как скорость реакции синглетного кислорода или гидроксильного радикала равна 10^{-5} – 10^{-9} секунд. В связи с этим исследователи измеряют продукты окислительных реакций, получаемые при взаимодействии АФК и с биомолекулами. В частности, при

взаимодействии АФК с липидами биомембран измеряют малоновый альдегид в качестве маркера, указывающего на распад фосфолипидного слоя биомембран.

Таким образом, по уровню метаболитов, появившихся при взаимодействии АФК с белками, нуклеиновыми кислотами и другими сложными молекулярными соединениями, можно судить о превалировании прооксидантной системы над антиоксидантной.

Структура антиоксидантной системы состоит из эндогенных и экзогенных соединений. К эндогенным соединениям относятся: билирубин, мочевая кислота, супероксиддисмутаза, каталаза, глутатион, глутатионпероксидаза и др. К экзогенным – аскорбат, флавоноиды каротиноиды, токоферолы и др., которые поступают в организм с полноценным питанием [7].

В практике окислительно-восстановительный потенциал обычно оценивают по соотношению восстановленного и окисленного глутатиона или тиоловых и дисульфидных соединений, в некоторых случаях – по уровню содержания витамина Е и аскорбата. От уровня содержания этих витаминов зависит целостность липидного слоя клеточных мембран, так как именно они выполняют основную защитную функцию от разрушительного действия перекисного окисления [10].

Витамин Е первым вступает в реакцию с пероксильным радикалом, при этом он (витамин Е) приобретает свойства радикала. Нейтрализация радикальной формы витамина Е происходит при взаимодействии с восстановленной формой витамина С (аскорбата). Последний, в свою очередь, приобретает свойства радикала – окисленная форма витамина С. При взаимодействии с глутатионом витамин С восстанавливается и теряет свойства радикала, а глутатион приобретает свойства окислителя.

Таким образом, триплетная цепная реакция, в которую входят витамин Е, \rightarrow витамин С, \rightarrow глутатион, выполняет базовую защитную функцию клеточных мембран от разрушительного действия перекисного окисления. И от того, каков накопительный пул этих элементов в организме, будет зависеть эффективность борьбы антиоксидантной системы с перекисным окислением.

В этой ситуации следует признать, что существует ряд других витаминов и микроэлементов, играющих важную роль в поддержании антиоксидантных функций организма. Это

витамины А, К, В2, В5, В6; микроэлементы Fe, Cu, Zn, Se, S, Co, Mn, Mg; жирные кислоты – омега-3, омега-6, коэнзим Q10.

В последнее десятилетие в медицинской практике (при диабете, ожирении печени, нейропатии и невропатии) стали назначаться препараты липоевой кислоты, эффективно корректирующие хрупкий баланс между прооксидантной и антиоксидантной системами [3, 4].

В спортивной практике тоже имеется ряд работ, указывающих на продуктивность использования α -липоевой кислоты (синоним – тиоктовая кислота, содержащая в себе сероорганическое соединение, являющееся важным коферментом для многих ферментативных комплексов) для поддержания антиоксидантной системы [13].

Цель работы: на основании анализа научной литературы и собственных исследований определить эффективность действия α -липоевой кислоты на работоспособность и функционирование антиоксидантной системы спортсменов, проходящих спортивно-оздоровительный сбор на подготовительном этапе годового тренировочного цикла.

Материалы и методы. В исследовании принимали участие 13 юношей: квалификация – первый разряд; специализация – футбол; возраст – 18–21 год. Все спортсмены находились на двухнедельных (15 дней) спортивно-оздоровительных сборах. Питание и тренировки в обеих группах были идентичны.

Экспериментальная группа (7 человек) в течение двух недель раз в сутки за полчаса до завтрака принимала (per os) 600 мг α -липоевой кислоты. Контрольная группа (6 человек) в это же время суток принимала плацебо.

Обе группы выполняли три функциональных теста: Тест № 1 – PWC-170 (по В.Л. Карпману) выполнялся в начале и в конце спортивно-оздоровительного сбора для выяснения влияния α -липоевой кислоты на общую работоспособность и МПК спортсменов. Тест № 2 – велоэргометрическая проба мощностью 300 Вт и длительностью 3 мин выполнялась в конце спортивно-оздоровительного сбора для выяснения влияния α -липоевой кислоты на процессы перекисного окисления липидов в ответ на физическую нагрузку с выраженным гликолитическим метаболизмом. Тест № 3 – ступенчатая велоэргометрическая нагрузка «до отказа» (тест выполнялся в конце спортивно-оздоровительного сбора). Начиналась нагрузка с 50 Вт, и каждые две минуты мощность

работы увеличивалась на 50 Вт, после ступеньки 250 Вт нагрузка не увеличивалась, окончание работы фиксировалось по времени отказа от мышечной деятельности.

После выполнения тестов № 2 и 3 у спортсменов делался забор крови для исследования ряда биохимических показателей, отражающих уровень активации гликолиза и перекисного окисления липидов.

Уровень активации гликолиза оценивался по сдвигам pH крови в кислую сторону – микрометод Р. Astrand и накопления лактата (МК) и пирувата (ПВК) – метод Н.У. Bermeyer [8].

Активность перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали по содержанию диеновых конъюгатов (ДК) и уровню малонового диальдегида (МДА) – метод Л.И. Андреевой [1].

Уровень витамина Е оценивался по содержанию α -токоферола в плазме крови, мкмоль/л – метод М.К. Castle, W.J. Cook [9].

Статистическую обработку материалов осуществляли с использованием непараметрических критериев Манна – Уитни и Вилкоксона. Достоверность различий исследуемых параметров считалась при значимости $p < 0,05$.

Результаты исследования. Для выяснения влияния α -липоевой кислоты на общую работоспособность и аэробные возможности футболистов (на подготовительном этапе их функциональной подготовки) использовался тест PWC-170. На констатирующем этапе исследования показатели PWC-170 и МПК в контрольной и экспериментальной группе практически не отличались, что указывает на однородность групп. Показатели (PWC-170) и МПК соответствовали среднему уровню функциональной подготовленности спортсменов (табл. 1).

На формирующем этапе исследования (через 14 дней тренировок) уровень PWC-170 в контрольной группе улучшается на 12,9 %, а уровень МПК – на 7 % (зарегистрированные изменения статистически недостоверны). В экспериментальной группе спортсменов (принимавших α -липоевую кислоту 600 мг) показатели PWC-170 относительно констатирующего исследования достоверно возрастают – почти на 43,3 % ($p < 0,02$), а уровень МПК – на 18,3 % ($p < 0,05$).

Результаты, полученные посредством функционального тестирования (PWC-170), позволяют предположить, что увеличение

Таблица 1
Table 1

Показатели работоспособности (тест PWC-170) и МПК футболистов,
принимавших в течение двух недель ежедневно по 600 мг α-липоевой кислоты
в условиях тренировочного сбора
Performance indicators (PWC-170) and VO₂max in football players
following two-week supplementation with α-lipoic acid (600 mg) during a training camp

Условия исследований Research conditions	Исходное состояние (PWC-170, кгм/мин/кг) Baseline (PWC-170, kgm/min/kg)	14 дней тренировок (PWC-170, кгм/мин/кг) After 14-day training (PWC-170, kgm/min/kg)	МПК, мл/мин кг Исходное состояние Baseline VO ₂ max, ml/min kg	МПК, мл/мин кг 14 дней тренировок After 14-day training VO ₂ max, ml/min kg
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Контрольная группа (n = 6) Control group (n = 6)	16,3 ± 2,1	18,4 ± 2,4 на 12,9 %	39,2 ± 4,1	41,1 ± 3,1 на 7 %
Группа эксперимента (n = 7) Experimental group (n = 7)	15,9 ± 2,3	¹ 22,8 ± 3,2* на 43,3 %	40,4 ± 2,9	³ 47,8 ± 3,4* на 18,3 %

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3 цифровой индекс при среднем значении указывает номер группы, с которой проводится сравнение; звездочка (*) при среднеквадратичном отклонении указывает на достоверность различий ($p < 0,05$).

Note. Here in the table 2, 3 the numerical index following the mean value indicates the group number being compared; an asterisk (*) preceding the standard deviation denotes statistically significant differences ($p < 0.05$).

работоспособности спортсменов, принимавших ежедневно по 600 мг α-липоевой кислоты в течение 14 дней, было вызвано процессами, способствующими расширению вклада аэробных механизмов в энергообеспечение мышечной деятельности (что проявилось в увеличении показателей МПК).

Вполне возможно, что при выполнении мышечной работы (PWC-170) положительный эффект α-липоевой кислоты связан с синхронизацией работы мембрано-транспортных челноков, ответственных за транспорт субстратов (пирувата) в цикл трикарбоновых кислот и восстановительных эквивалентов в дыхательную цепь митохондрий.

Данному виду спортивной деятельности (футбол) свойственны мышечные нагрузки, когда умеренная по мощности работа в долю секунды сменяется нагрузкой большой мощности, где доминирующее место в энергообеспечении занимает гликолиз (анаэробное окисление глюкозы), который сопровождается значительным накоплением лактата, пирувата, интермедиатов цикла Кребса и снижением pH жидкостных сред организма. Согласно данным М.Д. Джексона, количество образующихся активных форм кислорода коррелирует с мощностью выполненной работы [11]. В нашем случае такая работа должна вызывать

более глубокие изменения в энергетическом метаболизме, нежели тест PWC-170, что, возможно, вызовет активацию перекисного окисления липидов, что проявится в накоплении диеновых конъюгатов и малонового диальдегида.

В связи с этим спортсменам в конце спортивно-оздоровительного сбора было предложено выполнить велоэргометрическую нагрузку высокой мощности (300 Вт в течение 3 мин) и ступенчатую велоэргометрическую нагрузку «до отказа» с целью выявления действия α-липоевой кислоты на работоспособность и функционирование антиоксидантной системы спортсменов.

Данные (табл. 2) наглядно показывают, что в ответ на стандартную ВЭ нагрузку мощностью 300 Вт у всех спортсменов как в контрольной, так и в экспериментальной группе развиваются явные метаболические сдвиги, характерные для молочнокислого ацидоза, сопряженного с активацией гликолиза. Об этом свидетельствует достоверное снижение pH крови, резкий прирост молочной и пирувиноградной кислот в сыворотке, что сопровождается увеличением отношения МК / ПВК. Достоверность данных показателей относительно референсных значений колеблется от $p < 0,01$ до $p < 0,001$.

Таблица 2
Table 2

Уровень концентрации лактата, пирувата и pH крови спортсменов в ответ на два вида эргометрических нагрузок после двухнедельного приема α -липоевой кислоты (per os)
Blood lactate, pyruvate, and blood pH levels in athletes in response to two types of ergometric exercise following two-week oral administration of α -lipoic acid

№	Условия исследований Research conditions	pH ист blood pH	Лактат Мм Lactate mM	Пируват мМ Pyruvate mM	Отношение МК/ПБК мМ Lactate / pyruvate ratio mM	Объем работы Exercise intensity
1	Группа контроля Покой (n = 6) Control Group Resting state (n = 6)	7,39 \pm 0,010	1,02 \pm 0,14	0,11 \pm 0,01	9,2 \pm 0,11	—
2	Группа эксперимента Покой (n = 7) Experimental Group Resting state (n = 7)	7,40 \pm 0,012	1,06 \pm 0,17	0,12 \pm 0,02	8,34 \pm 0,14	—
3	Контрольная группа (n = 6) ВЭ нагрузка (300 Вт 3 мин) Control group (n = 6) Bicycle ergometer test high intensity (300 W 3 min)	¹ 7,21 \pm 0,012*	¹ 8,84 \pm 0,31*	¹ 0,30 \pm 0,02*	¹ 30,9 \pm 0,31*	—
4	Экспериментальная группа (n = 7) ВЭ нагрузка (300 Вт 3 мин + липоевая кислота Experimental group (n = 7) Bicycle ergometer test high intensity (300 W 3 min + lipoic acid)	³ 7,28 \pm 0,013*	³ 7,09 \pm 0,29*	³ 0,31 \pm 0,03	³ 22,8 \pm 0,22 *	—
5	Контрольная группа (n = 6). Ступенчатая ВЭ нагрузка до отказа Control group (n = 6) Incremental bicycle ergometer test to exhaustion	¹ 7,18 \pm 0,015*	¹ 9,16 \pm 0,36*	¹ 0,28 \pm 0,04*	¹ 32,3 \pm 0,36*	11833 \pm 297 кг/м
6	Экспериментальная группа (n = 7). Ступенчатая ВЭ нагрузка до отказа + липоевая кислота Experimental group (n = 7) Incremental bicycle ergometer test to exhaustion + lipoic acid	² 7,16 \pm 0,016*	² 9,08 \pm 0,48*	^{2,5} 0,36 \pm 0,06**	^{2,5} 25,2 \pm 0,34**	⁵ 13280 \pm 387 кг/м* 12,2 %

При сравнении показателей, приведенных в табл. 2 (строка 3 и 4), видно, что у спортсменов экспериментальной группы после стандартной ВЭ нагрузки (300 Вт – 3 мин + α -липоевая кислота) уровень сдвигов pH в кислую сторону, а также накопление МК и соотношение МК/ПБК в крови стали достоверно меньше, чем в контрольной группе ($p < 0,01$). Вне сомнений выявленные улучшения связаны с активацией аэробных функций, что и было зафиксировано посредством предварительного проведения теста – PWC-170 (см.

табл. 1). Однако оставался вопрос: какие механизмы задействованы в улучшении аэробных функций спортсменов и в какой степени они могут повлиять на работоспособность спортсменов. Анализ научной литературы показал, что в процессе физической нагрузки вырабатывается значительное количество АФК, которые могут повреждать цитоплазматические мембраны, нарушая транспорт субстратов (в частности ПБК) и восстановительных эквивалентов (НАД•Н) в дыхательную цепь митохондрий, тем самым дестаби-

Таблица 3
Table 3

Влияние двухнедельного приема α -липовой кислоты
на показатели перекисного окисления липидов (в плазме крови) футболистов,
выполнявших велоэргометрическую нагрузку мощностью 300 Вт длительностью 3 мин
Effects of two-week α -lipoic acid supplementation on lipid peroxidation markers (blood plasma)
in football players performing a 3-minute 300-watt bicycle ergometer test

№	Условия исследований Research conditions	ДК, мкмоль/л diene conjugates, umol/l	МДА, мкмоль/л Malondialdehyde, umol/l	α -токоферол, мкмоль/л α -tocopherol, umol/l
1	Исходное состояние (n = 6) группа контроля Baseline (n = 6) control group	2,85 \pm 0,29	1,21 \pm 0,15	11,18 \pm 0,92
2	Исходное состояние группа эксперимента (n = 7) Baseline (n = 7) experimental group	2,75 \pm 0,27	1,28 \pm 0,13	10,43 \pm 0,88
3	Группа контроля нагрузка 300 Вт 3 мин Control group 300 W bicycle ergometer test 3 min	¹ 6,52 \pm 0,51*	¹ 3,16 \pm 0,34*	¹ 9,24 \pm 0,67*
4	Группа эксперимента нагрузка 300 Вт 3 мин + липоевая Experimental group 300 W bicycle ergometer test 3 min + lipoic acid	² 7,71 \pm 0,60*	³ 1,65 \pm 0,37*	² 9,15 \pm 0,77

лизируя выработку и поступление АТФ к работающим органам.

В этой ситуации согласно данным литературы α -липовая кислота может стать одним из факторов, поддерживающих функцию антиоксидантной защиты фосфолипидного мембранного слоя клеток от повреждающего действия АФК.

Соответственно данной гипотезе мы в период эргометрических исследований делали забор крови у спортсменов на предмет изучения действия α -липовой кислоты на активность перекисного окисления липидов. В качестве маркеров, отражающих активность перекисного окисления липидов (ПОЛ), мы в плазме крови определяли содержание первичных продуктов перекисного окисления липидов – диеновых конъюгатов (ДК) и конечного продукта (ПОЛ) – малонового диальдегида (МДА). В качестве одного из базовых компонентов антиоксидантной системы исследовалось содержание α -токоферола в плазме крови спортсменов.

Анализируя результаты табл. 3, отмечаем, что у спортсменов контрольной группы после стандартной ВЭ нагрузки 300 Вт уровень диеновых конъюгатов увеличился в 2,3 раза ($p < 0,01$), а малонового диальдегида – в 2,6 раза ($p < 0,01$), что указывает на активизацию перекисного окисления липидов. При этом уровень α -токоферола несколько снижается ($p < 0,05$).

В группе эксперимента уровень диеновых

конъюгатов в ответ на стандартную ВЭ нагрузку 300 Вт был практически такой же, как и в группе контроля. Однако концентрация малонового диальдегида чуть ли ни в два раза меньше, чем в контрольной группе. Концентрация α -токоферола имеет тенденцию к снижению ($p > 0,05$).

Результаты табл. 3 позволяют заключить, что данная физическая нагрузка в группе контроля вызвала значительную активацию процессов перекисного окисления липидов, что проявилось в накоплении как диеновых конъюгатов, так и малонового диальдегида: последний является наиболее токсичным продуктом свободнорадикальных реакций, который косвенно может указывать на значительные изменения структурной целостности мембран.

В группе эксперимента, несмотря на значительное накопление ДК (покой = 2,75 \pm 0,27; нагрузка = 7,71 \pm 0,60, $p < 0,01$), уровень МДА относительно покоя почти не изменился, что указывает на благотворное действие липоевой кислоты. Скорее всего, α -липовая кислота, эффективно взаимодействуя с антиоксидантной системой, тормозит вторичную фазу перекисного окисления липидов, не давая сформироваться малоновому диальдегиду.

При исследовании влияния α -липовой кислоты на максимально возможную ступенчатую велоэргометрическую нагрузку обнаружено: у всех спортсменов, в отличие от трех-

минутной ВЭ нагрузки мощностью 300 Вт, несколько возрос ацидотический сдвиг pH, повысился уровень молочной кислоты, увеличилось соотношение МК/ПВК. При этом в группе эксперимента соотношение МК/ПВК относительно контрольной группы было достоверно меньше, а работоспособность возросла более чем на 12 %.

Заключение. В процессе физической нагрузки, где энергообеспечение мышечной деятельности во многом определяется активностью гликолиза, в плазме крови обнаруживается значительное количество продуктов перекисного окисления липидов, что указывает на активное взаимодействие реактивных форм кислорода с фосфолипидными структурами клеточных органелл.

Используя α -липоевую кислоту в качестве «пищевой добавки», было выявлено: у спортсменов (группа эксперимента) после физической нагрузки наблюдается значительное увеличение диеновых конъюгатов (в 2,8 раза). При этом уровень малонового диальдегида оставался в пределах нормы. В группе контроля помимо значительного повышения ДК (в 2,3 раза) уровень МДА возрос в 2,6 раза. Данный результат наглядно показывает на эффективность действия α -липоевой кислоты в поддержании антиоксидантной системы спортсменов.

Являясь хорошим антиоксидантом, о чем свидетельствуют многочисленные исследования, α -липоевая кислота принимает активное участие в регуляции энергетического метаболизма в качестве непосредственного участника полиферментного пируватдегидрогеназного комплекса (ПДК), структурно встроенного в матрикс митохондрий [5]. В пируватдегидрогеназном комплексе происходит декарбоксилирование пирувата с последующим образованием ацетил-КоА, что обеспечивает связь с циклом Кребса и реакциями окислительного фосфорилирования. При этом происходит восстановление НАД в НАДН. От «функционального» состояния пируватдегидрогеназного комплекса зависит перераспределение анаэробных/аэробных энергетических потоков [15].

В ситуации интенсивной физической нагрузки, которая сопряжена со стрессом и гипоксией, активность мультиферментного ПДК сужается, при этом сама структура комплекса подвержена деструктивным воздействиям различных цитопротекторов, в том числе и активных форм кислорода [15]. В этой ситуа-

ции наше исследование показало: внедрение в учебно-тренировочный процесс в качестве пищевой добавки α -липоевой кислоты (ежедневный прием 600 мг в течение 14 дней) способствовало улучшению работоспособности спортсменов (на 12 %), повышению МПК (на 18 %). При этом снизилось количество активных форм кислорода (это подтверждено данными (см. табл. 2), где соотношение МК/ПВК существенно уменьшается), что согласуется с результатами научных источников, в которых отношение МК/ПВК тесно коррелирует с уровнем АФК [15]. В меньшей степени проявляется метаболический ацидоз, а количество малонового диальдегида остается в пределах нормативных величин (см. табл. 3). А незначительное снижение α -токоферола в крови спортсменов может свидетельствовать об адекватности функционирования антиоксидантной системы в целом.

Полученный положительный эффект использования α -липоевой кислоты в учебно-тренировочном процессе спортсменов можно охарактеризовать как фактор, способствующий расширению адаптационных механизмов посредством: 1) защиты структурно-функциональных элементов клетки от активных форм кислорода; 2) оптимизации работы пируватдегидрогеназного комплекса с целью перераспределения анаэробных/аэробных энергетических потоков в сторону аэробной энергетики.

Выводы. Энергообеспечение интенсивной мышечной деятельности спортсменов во многом определяется активностью гликолиза, о чем свидетельствуют ацидотический сдвиг pH крови, увеличение концентрации МК и ПВК. Ацидотический сдвиг сопровождается значительным накоплением продуктов перекисного окисления липидов (диеновых конъюгатов и малонового диальдегида), что указывает на активное взаимодействие реактивных форм кислорода с фосфолипидными структурами клеточных органелл.

Ежедневный прием α -липоевой кислоты (600 мг) в течение 14 дней способствовал улучшению работоспособности спортсменов (на 12 %), повышению МПК (на 18 %), снижалось соотношение МК/ПВК, которое тесно коррелирует с уровнем АФК. В меньшей степени проявляется метаболический ацидоз, а количество малонового диальдегида в отличие от контроля остается в пределах нормативных величин.

Список литературы

1. Андреева, Л.И. Модификация метода определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой / Л.И. Андреева, А.А. Кожемякина, А.А. Кишкун // *Лабораторное дело*. – 1988. – № 11. – С. 41–43.
2. Городничева, Е.А. Окислительный стресс, активные формы кислорода. Антиоксидантная система клеток / Е.А. Городничева, А.А. Крылова // *Вестник науки*. – 2024. – Т. 2, № 1 (70). – С. 840–845.
3. Данилов, А.И. Альфа-липоевая кислота как компонент патогенетической терапии в современной клинике / А.И. Данилов, Т.А. Осипенкова, В.А. Милягин // *Трудный пациент*. – 2020. – Т. 18, № 5. – С. 36–39.
4. Коденцова, В.М. α -Липоевая кислота как ингредиент специализированных пищевых продуктов и БАД / В.М. Коденцова, Д.В. Рисник // *Мед. алфавит*. – 2023. – № 29. – С. 48–54.
5. Роль пируватдегидрогеназного комплекса в развитии ишемически-реперфузионного синдрома / К.А. Попов, Я.Е. Денисова, И.М. Быков и др. // *Кубан. науч. мед. вестник*. – 2022. – № 29 (4). – С. 75–93.
6. Age-Dependent Changes in the Production of Mitochondrial Reactive Oxygen Species in Human Skeletal Muscle / M.Yu. Vyssokikh, M.A. Vigovskiy, V.V. Philippov et al. // *Biochemistry (Moscow)*. – 2024. – Vol. 89, No. 2. – P. 299–312. DOI: 10.1134/S0006297924020093
7. Antioxidant restriction and oxidative stress in short-duration exhaustive exercise / T.A. Watson, R. Callister, R.D. Taylor et al. // *Med Sci Sports Exerc*. – 2005. – Vol. 37 (1). – P. 63–71. DOI: 10.1249/01.mss.0000150016.46508.a1
8. Bergmeyer, H.U. *Methods of Enzymatic Analysis* / H.U. Bergmeyer // Third edition. Weinheim. – 1987. – Vol. 6–7.
9. Castle, M.K. Measurement of vitamin E levels in serum and plasma by high-performance liquid chromatography with electrochemical detection / M.K. Castle, W.J. Cook // *Ther Drug Monit*. – 1985. – Vol. 7 (3). – P. 364–368. DOI: 10.1097/00007691-198507030-00024
10. Droge, W. Free radicals in the physiological control of cell function / W. Droge // *Physiol Rev*. – 2002. – Vol. 82 (1). – P. 47–95. DOI: 10.1152/physrev.00018.2001
11. Exercise and oxygen radical production by muscle. In *Handbook of oxidants and antioxidants in exercise* / M.J. Jackson; Edited by C.K. Sen, L. Packer, O. Hanninen // Amsterdam: Elsevier Science. – 2000. – P. 57–68.
12. Halliwell, B. Oxygen-derived species: their relation to human disease and environmental stress / B. Halliwell, C.E. Cross // *Environ Health Perspect*. – 1994. – Vol. 102 (Suppl 10). – P. 5–12. DOI: 10.1289/ehp.94102s105
13. Isenmann, E. The effects of alpha lipoic acid on muscle strength recovery after a single and a short-term chronic supplementation: a study in healthy well-trained individuals after intensive resistance and endurance training / E. Isenmann, L. Trittel, P. Diel // *J Int Soc Sports Nutr*. – 2020. – Vol. 17 (1). – P. 61. DOI: 10.1186/s12970-020-00389-y
14. Molecular inflammation: Underpinnings of aging and age-related diseases / H.Y. Chung, M. Cesari, S. Anton et al. // *Ageing Res Rev*. – 2009. – Vol. 8 (1). – P. 18–30. DOI: 10.1016/j.arr.2008.07.002
15. Pyruvate dehydrogenase complex in cerebral ischemia-reperfusion injury / A. Thibodeau, X. Geng, L.E. Previch, Y. Ding // *Brain. Circ*. – 2016. – Vol. 2 (2). – P. 61–66. DOI: 10.4103/2394-8108.186256
16. Six Functions of Respiration: Isn't It Time to Take Control over ROS Production in Mitochondria, and Aging Along with It? / V.P. Skulachev, M.Yu. Vyssokikh, B.V. Chernyak et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24, No. 16. – P. 12540. DOI: 10.3390/ijms241612540
17. Vollaard, N.B. Exercise-induced oxidative stress: myths, realities and physiological relevance / N.B. Vollaard, J.P. Shearman, C.E. Cooper // *Sports Med*. – 2005. – Vol. 35 (12). – P. 1045–1062. DOI: 10.2165/00007256-200535120-00004

References

1. Andreeva L.I., Kozhemyakina A.A., Kishkun A.A. [Modification of the Method for the Determination of Lipid Peroxides in a Test with Thiobarbituric Acid]. *Laboratornoe delo* [Laboratory Business], 1988, no. 11, pp. 41–43. (in Russ.)
2. Gorodnicheva E.A., Krylova A.A. [Oxidative Stress, Reactive Oxygen Species. The Antioxidant System of Cells]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science], 2024, vol. 2, no. 1 (70), pp. 840–845. (in Russ.)
3. Danilov A.I., Osipenkova T.A., Milyagin V.A. [Alpha-lipoic Acid as a Component of Pathogenetic Therapy in a Modern Clinic]. *Trudnyy pacient* [Difficult Patient], 2020, vol. 18, no. 5, pp. 36–39. (in Russ.) DOI: 10.24411/2074-1995-2020-10037
4. Kodentsova V.M., Risnik D.V. [α -Lipoic Acid as an Ingredient in Specialized Food Products and Dietary Supplements]. *Medicinskiy alfavit* [Medical Alphabet], 2023, no. 29, pp. 48–54. (in Russ.) DOI: 10.33667/2078-5631-2023-29-48-54
5. Popov K.A., Denisova Ya.E., Bykov I.M. et al. [The Role of the Pyruvate Dehydrogenase Complex in the Development of Ischemic Reperfusion Syndrome]. *Kubanskiy nauchnyy medicinskiy vestnik* [Kuban Scientific Medical Bulletin], 2022, no. 29 (4), pp. 75–93. (in Russ.) DOI: 10.25207/1608-6228-2022-29-4-75-93
6. Vyssokikh M.Yu., Vigovskiy M.A., Philippov V.V. et al. Age-Dependent Changes in the Production of Mitochondrial Reactive Oxygen Species in Human Skeletal Muscle. *Biochemistry* (Moscow), 2024, vol. 89, no. 2, pp. 299–312. DOI: 10.1134/S0006297924020093
7. Watson T.A., Callister R., Taylor R.D. et al. Antioxidant Restriction and Oxidative Stress in Short-duration Exhaustive Exercise. *Medicine Science Sports Exerc*, 2005, vol. 37 (1), pp. 63–71. DOI: 10.1249/01.mss.0000150016.46508.a1
8. Bergmeyer H.U. *Methods of Enzymatic Analysis*. Third edition. Weinheim, 1987. Vol. 6–7.
9. Castle M.K., Cook W.J. Measurement of Vitamin E Levels in Serum and Plasma by High-performance Liquid Chromatography with Electrochemical Detection. *Ther Drug Monit*, 1985, vol. 7 (3), pp. 364–368. DOI: 10.1097/00007691-198507030-00024
10. Droge W. Free Radicals in the Physiological Control of Cell Function. *Physiology Rev*, 2002, vol. 82 (1), pp. 47–95. DOI: 10.1152/physrev.00018.2001
11. Jackson M.J. Exercise and Oxygen Radical Production by Muscle. In *Handbook of Oxidants and Antioxidants in Exercise*. Edited by C.K. Sen, L. Packer, O. Hanninen. *Amsterdam: Elsevier Science*, 2000, pp. 57–68.
12. Halliwell B., Cross C.E. Oxygen-derived Species: Their Relation to Human Disease and Environmental Stress. *Environ Health Perspect*, 1994, vol. 102, suppl. 10, pp. 5–12. DOI: 10.1289/ehp.94102s105
13. Isenmann E., Trittel L., Diel P. The Effects of Alpha Lipoic Acid on Muscle Strength Recovery After a Single and a Short-term Chronic Supplementation: – a Study in Healthy Well-trained Individuals After Intensive Resistance and Endurance Training. *Journal International Society Sports Nutr*, 2020, vol. 17 (1), p. 61. DOI: 10.1186/s12970-020-00389-y
14. Chung H.Y., Cesari M., Anton S. et al. Molecular Inflammation: Underpinnings of Aging and Age-related Diseases. *Ageing Res Rev*, 2009, vol. 8 (1), pp. 18–30. DOI: 10.1016/j.arr.2008.07.002
15. Thibodeau A., Geng X., Previch L.E., Ding Y. Pyruvate Dehydrogenase Complex in Cerebral Ischemia-reperfusion Injury. *Brain. Circ*, 2016, vol. 2 (2), pp. 61–66. DOI: 10.4103/2394-8108.186256
16. Skulachev V.P., Vyssokikh M.Yu., Chernyak B.V. Six Functions of Respiration: Isn't It Time to Take Control over ROS Production in Mitochondria, and Aging Along with It? *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24, no. 16, p. 12540. DOI: 10.3390/ijms241612540
17. Vollaard N.B., Shearman J.P., Cooper C.E. Exercise-induced Oxidative Stress: Myths, Realities and Physiological Relevance. *Sports Medicine*, 2005, vol. 35 (12), pp. 1045–1062. DOI: 10.2165/00007256-200535120-00004

Информация об авторах

Розенфельд Александр Семенович, доктор биологических наук, профессор, кафедры физического воспитания, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия.

Рямова Ксения Александровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физического воспитания, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия; доцент кафедры физической культуры, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия.

Терюшкова Жанна Ивановна, доктор медицинских наук, профессор кафедры онкологии, лучевой диагностики и лучевой терапии, Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск, Россия; заведующий центром колопроктологии, Городская клиническая больница № 8, Челябинск, Россия.

Information about the authors

Alexander S. Rosenfeld, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Physical Education, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia.

Ksenia A. Ryamova, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Education, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia; Associate Professor of the Department of Physical Education, Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia.

Zhanna I. Teryushkova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Department of Oncology, Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia; Head of the Proctology Center, City Clinical Hospital No. 8, Chelyabinsk, 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 interests.

Статья поступила в редакцию 21.03.2025

The article was submitted 21.03.2025