

РАЗВИТИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО СТРЕССА ПРИ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ У СПОРТСМЕНОВ

Майорова Е.А.¹, Корнякова В.В.¹

¹ - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Автор, ответственный за переписку:

Корнякова Вера Валерьевна, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, медицины катастроф ФГБОУ ВО ОмГМУ Минздрава России, bbk_2007@inbox.ru.

Резюме. В данном литературном обзоре представлены общие данные об окислительном стрессе. Выявлены особенности влияния активных форм кислорода, процессов перекисного окисления липидов на метаболизм при физических нагрузках. Проведен анализ литературных источников с целью выяснения особенностей протекания окислительного стресса при физических нагрузках. Описана антиоксидантная защита организма, которая способна предотвратить повреждения, вызванные окислительным стрессом. Окислительный стресс сопровождается генерацией активных форм кислорода, повреждающих различные структурные элементы клетки и ее мембрану. Состояние антиоксидантной системы при физических нагрузках зависит от их длительности, мощности и интенсивности, вида спорта. При умеренных физических нагрузках происходит компенсаторное обезвреживание активных форм кислорода. Интенсивные физические нагрузки снижают антиоксидантный резерв в организме и способствуют выраженному проявлению окислительного стресса. Данные факты доказаны как для экспериментальных животных, так и для человека. В этом случае имеется прямая необходимость введения в рацион питания продуктов, обогащенных антиоксидантами или использование биологически активных добавок с антиоксидантными свойствами.

Ключевые слова: окислительный стресс, свободные радикалы, перекисное окисление липидов, антиоксидантная защита, активные формы кислорода, физические нагрузки, спортсмены.

Список сокращений:

СРО - свободно-радикальное окисление

АФК - активные формы кислорода

ПОЛ - перекисное окисление липидов

АОС –антиоксидантная система

Введение. Интенсивное развитие спорта, рост физических нагрузок у спортсменов требуют постоянного совершенствования процесса физической подготовки. Повышение объема физических нагрузок может отрицательно отразиться на функциональном состоянии спортсмена и привести к перетренированности. Согласно современным представлениям,

активация свободно-радикального окисления (СРО) может негативно влиять на физическую работоспособность. Окислительный стресс может привести к апоптозу клетки [5,16,21,22, 31]. Изучение СРО, механизмов генерации активных форм кислорода (АФК), их повреждающего действия на клетки, особенностей работы антиокислительной системы

при физических нагрузках крайне значимо для разработки способов фармакологической поддержки [14,15,18].

Цель обзора - изучить механизм возникновения и развития окислительного стресса при физических нагрузках.

Основная часть. К возможным причинам чрезмерного образования свободных радикалов кислорода в организме спортсменов можно отнести чрезмерные физические нагрузки и психоэмоциональное напряжение. К АФК относят $O_2^{\cdot -}$, H_2O_2 , OH^{\cdot} , синглетный кислород и другие. Показатель ПОЛ отражает интенсивность процессов липопероксидации. При интенсивных физических нагрузках процессы ПОЛ усиливаются. Противостоят им эндогенные антиоксиданты [3,7,8]. В условиях отсутствия физических нагрузок или при нагрузках низкой интенсивности количество образующихся АФК невелико и они устраняются имеющимися возможностями антиоксидантной защиты. Если она недостаточна, то формирующийся избыток свободных радикалов и активных кислородных метаболитов приводит к окислительному стрессу [23,25,28].

Интенсивность процессов генерирования АФК и протекания ПОЛ у спортсменов связана с видом спортивной деятельности, объемом и длительностью нагрузок. Именно усиление нагрузок приводит к значительной активации процессов ПОЛ. В этом случае необходимо дополнительное поступление антиоксидантов для сдерживания генерации АФК и подавления чрезмерной интенсивности процессов ПОЛ [27,28,29,30].

При физических нагрузках потребление кислорода мышцами резко возрастает, что увеличивает вероятность образования супероксидных радикалов. В зависимости от состава мышечных волокон, а также интенсивности нагрузок, вклад митохондриального источника будет неодинаков.

Однако генерация радикалов может существенно возрастать при повреждении митохондрий, поэтому повышенное образование АФК наблюдается не только при аэробных, но и при изометрических

нагрузках, когда мышечные клетки находятся в состоянии относительной гипоксии. При недостатке кислорода нарушается биоэнергетическая функция митохондрий. Снижение содержания АТФ приводит к выключению ионных насосов и выходу ионов кальция (Ca^{2+}) из внутриклеточных депо, а также «просачиванию» ионов Ca^{2+} из межклеточной среды. Накопление Ca^{2+} в цитозоле приводит к ряду метаболических изменений, способствующих увеличению проницаемости мембран митохондрий и утрате их способности к синтезу АТФ. Определенный вклад в нарушение структуры митохондрий вносит накопление лактата при интенсивных физических нагрузках и развитие ацидоза.

Следует также отметить стрессовый характер физических нагрузок современного спорта. Активация симпатoadrenalовой системы при стрессе обеспечивает мобилизацию энергетических и функциональных ресурсов организма. Однако высокие концентрации катехоламинов (адреналина, норадреналина, дофамина) в организме увеличивают продукцию свободных радикалов [6]. Опасность активации процессов СРО связана с тем, что АФК могут повреждать клетки и их структуры, снижая их функционирование и даже приводить к апоптозу [19,20]. Так же доказано, что увеличение интенсивности ПОЛ при физических нагрузках может привести к нарушению функционирования органов и жизненно важных систем [24].

Функционирование антиоксидантной системы при физических нагрузках претерпевает изменение, которое зависит от вида, длительности, интенсивности и систематичности нагрузок. В исследовании показано увеличение активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, глутатионпероксидазы, глутатионредуктазы и каталазы) в скелетных мышцах в ответ на острую физическую нагрузку [4]. Активация антиоксидантной системы отмечается как при аэробных, так и при анаэробных нагрузках.

Низкий уровень нагрузок практически не вызывает существенного изменения в ра-

боте АОС. Значимые изменения наблюдаются при нагрузках средней и высокой интенсивности. Значение имеет и длительность тренировок. При тренировках продолжительностью более одного часа в день увеличение активности антиоксидантных ферментов оказывается более выраженным, чем при тренировках в течение 30 минут [1]. Под влиянием регулярных тренировок базовая активность антиоксидантных ферментов претерпевает разнонаправленные изменения [4]. Существуют также различия в функционировании антиоксидантной системы у спортсменов в зависимости от вида спорта. Так, при обследовании трёх групп высококвалифицированных спортсменов – триатлонистов, футболистов и легкоатлетов – наиболее низкое значение активности каталазы и общей антиоксидантной активности сыворотки крови было выявлено у триатлонистов, наиболее высокое – у футболистов [13].

В различные периоды спортивной подготовки спортсменов наблюдается волнообразная динамика показателей прооксидантной и антиоксидантной систем [3]. Так, у высококвалифицированных пловцов максимальный уровень продуктов ПОЛ и активности каталазы в крови был отмечен в соревновательный период. Минимальный уровень продуктов ПОЛ наблюдался в восстановительный период, при этом также снижалась активность каталазы и практически не менялась в переходный и подготовительный периоды.

В исследовании было обнаружено увеличение активности глутатионтрансферазы в крови спортсменов в период отдыха после соревнований по спортивному ориентированию, однако активность супероксиддисмутазы и каталазы в этот период не изменилась.

Формирование высокого антиоксидантного статуса вследствие адаптационных перестроек организма, вызванных регулярными адекватными физическими нагрузками, повышает устойчивость к окислительному стрессу. Однако высокоинтенсивные и длительные физические нагрузки, сопровождающиеся чрезмерной активацией свободнорадикального

окисления, могут вызвать декомпенсацию антиоксидантной защиты, и возникновение окислительного стресса [6].

Известно, что уровень маркеров окислительного стресса растёт при разных видах физических нагрузок пропорционально их интенсивности. У спортсменов с синдромом перетренированности в состоянии покоя показатели, отражающие окислительный стресс, достоверно выше, чем в контрольной группе. При физическом утомлении у спортсменов, наряду с повышением содержания в крови продуктов ПОЛ, наблюдается снижение уровня антиоксидантных ферментов и концентрация глутатиона [11]. Усиление свободнорадикального окисления ухудшает передачу нервных импульсов и ведёт к снижению сократительной активности мышц. В результате повреждающего действия АФК на мембрану митохондрий снижается эффективность тканевого дыхания. Таким образом, избыточная активация ПОЛ сопровождается снижением работоспособности и развитием утомления. Чрезмерные физические нагрузки и сопровождающая их активация СРО таят в себе опасность инициации дегенеративно-дистрофических процессов в различных системах организма. Результатом всего этого могут быть травмы, сердечно-сосудистые, бронхолёгочные и другие заболевания.

Анализ результатов исследований применения антиоксидантов в спорте позволяет сделать следующие выводы:

1. Неконтролируемое применение спортсменами препаратов антиоксидантного действия может препятствовать включению адаптационных механизмов, стимулированных умеренными концентрациями АФК.

2. Применение сильных антиоксидантов эффективно в условиях развития окислительного стресса, например, в соревновательный период или в процессе восстановления после чрезмерных физических нагрузок. В остальное время можно использовать продукты, богатые антиоксидантами, или биодобавки [10].

3. Использование антиоксидантной поддержки должно сопровождаться неинва-

живным биохимическим скринингом показателей прооксидантно-антиоксидантного гомеостаза. Такие исследования позволяют дать ответ на вопрос: достаточно ли антиоксидантной способности организма, чтобы предотвратить повреждающее действие окислительного стресса, вызванного физической нагрузкой. На основании результатов анализа должны определяться индивидуальные нормы применения антиоксидантов.

4. Необходим тщательный анализ содержания, активности и биодоступности антиоксидантов в биодобавках, используемых в спортивном питании.

В связи с вышеописанными изменениями в функционировании антиоксидантной системы оправдано применение антиоксидантов [11,26]. В литературе описаны результаты применения веществ этой группы как на экспериментальных животных, так и на спортсменах. В эксперименте на лабораторных крысах при продолжительных физических нагрузках, моделируемых методом вынужденного плавания в качестве источника антиоксидантов использовали апилак, пыльцу и прополис [2]. Применение продуктов пчеловодства тормозило интенсивность СРО у экспериментальных животных, а также снижало интенсивность процессов ПОЛ в мозге и печени крыс, подвергнутых принудительному плаванию. Установлено, что полифитотон, апилак и адаптон-6 повышают физическую работоспособность животных, испытывающих нагрузку плаванием, что связывают с антирадикальным действием этих препаратов. Антиоксидант селен в виде селенита натрия повышал

работоспособность лабораторных крыс, подвергнутых принудительному плаванию с грузом, что связывают со способностью этого микроэлемента ограничивать интенсивность процессов ПОЛ и сохранением фонда антиоксидантов [12].

В исследованиях по обеспеченности спортсменов антиоксидантами установлено нормальное поступление витамина Е у 95% взрослых и 80% молодых спортсменов. Оптимальная обеспеченность витаминами с антиоксидантной активностью отмечена у биатлонистов: 80% спортсменов получали достаточное количество β -каротина, витаминов Е и С. В других видах спорта обеспеченность данными витаминами была на уровне не более 56%. У 40% обследованных спортсменов низкое содержание антиоксидантов сочеталось с недостатком витамина В₂. Это свидетельствует о необходимости дополнительного употребления веществ с антиоксидантной активностью спортсменами при интенсивных тренировках [8].

Заключение. Таким образом, интенсивные нагрузки у спортсменов высокой квалификации сопровождаются развитием окислительного стресса. Отмечаемое усиление генерации свободных радикалов и подавление антиоксидантной защиты в периоды интенсивных нагрузок свидетельствует о необходимости восполнения антиоксидантов. Недостаток последних может негативно отразиться на физической работоспособности спортсменов и привести не только к снижению спортивного результата, но и развитию предпатологических и патологических изменений в различных системах организма

ЛИТЕРАТУРА

1. Bazarin K.P. Rol' aktivnyh form kisloroda v adaptacii k fizicheskoj nagruzke. Sportivnaya medicina: nauka i praktika. 2014;(4): 7-16. Russian (Базарин К.П. Роль активных форм кислорода в адаптации к физической нагрузке). Спортивная медицина: наука и практика. 2014;(4): 7-16.
2. Bal'haev I.M., SHantanova I.M., Tulesonova A.S. Aktoprotekturnaya aktivnost' adaptagenov prirodnoho. Sibirskij medicinskij zhurnal. 2014;1:100-103. Russian (Бальхаев И.М., Шантанова И.М., Тулесонова А.С. Актопротекторная активность адаптагенов природного). Сибирский медицинский журнал. 2014;1:100-103.
3. Velichko T.I. Svobodnoradikal'nye processy i vozmozhnoe proyavlenie oksidativnogo stressa v usloviyah fizicheskikh nagruzok. Vestnik Volzhskogo universiteta. 2015;4 (19): 286-293. Russian (Величко Т.И. Свободнорадикальные процессы и возможное проявление оксидативного стресса в условиях физических нагрузок). Вестник Волжского университета. 2015;4 (19): 286-293.
4. Gadzhiev A.M., Aliev S.A., Agaeva S.E. Rol' endogennyh i ekzogennyh antioksidantov v adaptivnoj myshechnoj deyatel'nosti. Teoriya i praktika fizicheskoj kul'tury. 2014;(8): 53-57. Russian (Гаджиев А.М., Алиев С.А., Агаева С.Э. Роль эндогенных и экзогенных антиоксидантов в адаптивной мышечной деятельности). Теория и практика физической культуры. 2014;(8): 53-57.
5. Grivennikova V. G., Vinogradov A.D. Generaciya aktivnyh form kisloroda mitohondriyami. Uspekhi biologicheskoy himii. 2013;53: 245-296. Russian (Гривенникова В. Г., Виноградов А.Д. Генерация активных форм кислорода митохондриями). Успехи биологической химии. 2013;53: 245-296.
6. Grigor'eva N. M. Ispol'zovanie antioksidantov v sportivnoj praktike. Nauchno-sportivnyj vestnik Urala i Sibiri. 2020; 1: 23-36. Russian (Григорьева Н. М. Использование антиоксидантов в спортивной практике). Научно-спортивный вестник Урала и Сибири. 2020; 1: 23-36.
7. Gunina L. Okislitel'nyj stress i adaptaciya: metabolicheskie aspekty vliyaniya fizicheskikh nagruzok. Nauka v olimpijskom sporte. 2013; 4: 19-25. Russian (Гунина Л. Окислительный стресс и адаптация: метаболические аспекты влияния физических нагрузок. Наука в олимпийском спорте). 2013; 4: 19-25.
8. Gunina L., Lisnyak I. Faktor rosta endoteliya sosudov u predstavitelej raznyh vidov sporta: svyaz' s oksidativnym stressom. Nauka v olimpijskom sporte. 2008; (1): 46-50. Russian (Гунина Л., Лисняк И. Фактор роста эндотелия сосудов у представителей разных видов спорта: связь с оксидативным стрессом). Наука в олимпийском спорте. 2008; (1): 46-50.
9. Karbyshev M.S, Abdullaev SH.P. Biohimiya oksidativnogo stressa. M.: НКН; 2018. pp. 6-15. Russian (Карбышев М.С, Абдуллаев Ш.П. Биохимия оксидативного стресса. М.: НКН; 2018. С. 6-15).
10. Kozicina A.R., Polyanskaya I.S. Antioksidanty v specializirovannyh produktah dlya sporta. Aktual'nye issledovaniya XXI veka. 2019;1:11-16. Russian (Козичина А.Р., Полянская И.С. Антиоксиданты в специализированных продуктах для спорта). Актуальные исследования XXI века. 2019;1:11-16.
11. Kornyakova V.V., Konvaj V.D., Muratov V.A. Narushenie metabolizma purinov u sportsmenov ciklicheskih vidov sporta. Fundamental'nye issledovaniya. 2015;7(3):468-470. Russian (Корнякова В.В., Конвай В.Д., Муратов В.А. Нарушение метаболизма пуринов у спортсменов циклических видов спорта). Фундаментальные исследования. 2015;7(3):468-470.
12. Kornyakova V.V., Konvaj V.D., Ashvic I.V., Muratov V.A. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. Farmakologicheskaya regulyaciya okislitel'nogo stressa pri fizicheskom utomlenii v eksperimente 2017;1-2: 270-272. Russian (Корнякова В.В., Конвай В.Д., Ашвиц И.В., Муратов В.А. Фармакологическая регуляция окислительного стресса при физическом утомлении в эксперименте) Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017;1-2: 270-272.
13. Kremeno S.V., Barabash L.V., Smirnova I.N., Antipova I.I. Osobennosti funkcionirovaniya sistemy prooksidanty-antioksidanty u vysokokvalificirovannyh sportsmenov. Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya medicina. 2014; 6(126):17-20. Russian (Кремено С.В., Барабаш Л.В., Смирнова И.Н., Антипова И.И. Особенности функционирования системы прооксиданты-антиоксиданты у высококвалифицированных спортсменов). Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2014; 6(126):17-20.
14. Levchenkova O.S., Novikov V.E., Pozhilova E.V. Farmakodinamika i klinicheskoe primeneniye antigipoksantov. Obzory po klinicheskoy farmakologii i lekarstvennoj terapii. 2012; 10(3): 3-12. Russian (Левченкова О.С., Новиков В.Е., Пожилова Е.В. Фармакодинамика и клиническое применение антигипоксантов). Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. 2012; 10(3): 3-12.
15. Markova E.O., Novikov V.E., Parfenov E.A. Kompleksnoe soedineniye askorbinovoj kisloty s antigipoksantnymi i antioksidantnymi svojstvami. Vestnik Smolenskoj gosudarstvennoj medicinskoj akademii. 2013; 12(1):27-32. Russian (Маркова Е.О., Новиков В.Е., Парфенов Э.А. Комплексное соединение аскорбиновой кислоты с антигипоксантными и антиоксидантными свойствами). Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2013; 12(1):27-32.
16. Mironova G.D. Ispol'zovanie modulyatorov ionnyh kanalov kak vozmozhnyj put' lecheniya serdechno-sosudistyh zabolevanij, okislitel'nogo stressa i nejrodegenerativnyh narushenij. Patogenez. 2011;9(3):47. Russian (Миронова Г.Д. Использование модуляторов ионных каналов как возможный путь лечения сердечно-сосудистых заболеваний, окислительного стресса и нейродегенеративных нарушений). Патогенез. 2011;9(3):47.
17. Musahanov Z.A., Zemcova I.I., Stankevich L.G. Vliyanie tiolovyh soedinenij na sodержание

- glutationa v krvi dzyudoistov vysokoj kvalifikacii. *Pedagogika, psihologiya i mediko-biologicheskie problemy fizicheskogo vospitaniya i sporta*. 2012; (12):89-94. Russian (Мусаханов З.А., Земцова И.И., Станкевич Л.Г. Влияние тиоловых соединений на содержание глутатиона в крови дзюдоистов высокой квалификации). *Педагогика, психология и медико-биологические проблемы физического воспитания и спорта*. 2012; (12):89-94.
18. Nikitina L.YU., Petrovskij F.I., Soodaeva S.K. Oksidativnyj stress i bronhospazm, vyzvannyj fizicheskoj nagruzkoj v sporte vysokih dostizhenij: sushchestvuet li vzaimosvyaz'? *Pul'monologiya*. 2012;5: 99-104. Russian (Никитина Л.Ю., Петровский Ф.И., Соодаева С.К. Оксидативный стресс и бронхоспазм, вызванный физической нагрузкой в спорте высоких достижений: существует ли взаимосвязь?) *Пульмонология*. 2012;5: 99-104.
19. Novikov V.E., Levchenkova O.S. Gipoksiej inducirovannyj faktor kak mishen' farmakologicheskogo vozdejstviya. *Obzory po klinicheskoy farmakologii i lekarstvennoj terapii*. 2013; 11(2):8-16. Russian (Новиков В.Е., Левченкова О.С. Гипоксией индуцированный фактор как мишень фармакологического воздействия). *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2013; 11(2):8-16.
20. Sazontova T.G., Arhipenko YU.V. Rol' svobodnoradikal'nyh processov i redoks-signalizacii v adaptacii organizma k izmeneniyu urovnya kisloroda. *Rossijskij fiziologicheskij zhurnal imeni A.M. Sechenova*. 2005;91(6): 636-655. Russian (Сазонтова Т.Г., Архипенко Ю.В. Роль свободнорадикальных процессов и редокс-сигнализации в адаптации организма к изменению уровня кислорода). *Российский физиологический журнал имени А.М. Сеченова*. 2005;91(6): 636-655.
21. Silachev D.N. Izuchenie novyh nejroprotektorov na modeli fokal'noj ishemii golovnogogo mozga. *M., 2009;23 p.* Russian (Силачев Д.Н. Изучение новых нейропротекторов на модели фокальной ишемии головного мозга. М., 2009;23 с).
22. Sudakov N.P., Nikiforov S.B., Konstantinov YU.M. Mekhanizmy uchastiya mitohondrij v razvitii patologicheskikh processov, soprovozhdayushchihsya ishemiej i reperfuziej. *Byulleten' VSMC SO RAMN*. 2006; 5(51):332-336. (Russian Судаков Н.П., Никифоров С.Б., Константинов Ю.М. Механизмы участия митохондрий в развитии патологических процессов, сопровождающихся ишемией и реперфузией). *Бюллетень ВСМЦ СО РАМН*. 2006; 5(51):332-336.
23. Tolpygina O.A. Rol' glutaciona v sisteme antioksidantnoj zashchity. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo centra SO RAMN*. 2012;2-2(84): 178-180. Russian (Толпыгина О.А. Роль глутатиона в системе антиоксидантной защиты). *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН*. 2012;2-2(84): 178-180.
24. Treneva M.V., L'vovskaya E.I. Sootnoshenie urovnya trevozhnosti, processov perekisnogo okisleniya lipidov i aktivnosti nekotoryh fermentov u sportsmenov v ciklicheskih i aciklicheskih vidah sporta. *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury*. 2008;(4): 31-34. Russian (Тренева М.В., Львовская Е.И. Соотношение уровня тревожности, процессов перекисного окисления липидов и активности некоторых ферментов у спортсменов в циклических и ациклических видах спорта). *Теория и практика физической культуры*. 2008;(4): 31-34.
25. Hisamova A.A., Gizinger O.A. Rol' metionina v korrekcii oksidativnogo stressa pri povyshennyh fizicheskikh nagruzkah. *Terapevt*. 2020; (5):74-80. Russian (Хисамова А.А., Гизингер О.А. Роль метионина в коррекции оксидативного стресса при повышенных физических нагрузках). *Терапевт*. 2020; (5):74-80.
26. YAshin YA.I., Vedenin A.N., YAshin A.YA. Antioksidanty i sport. Osnovnye prichiny neudachnyh primenenij. *Vozmozhnye perspektivy. Sportivnaya medicina: nauka i praktika*. 2016; 6 (1):35-39. Russian (Яшин Я.И., Веденин А.Н., Яшин А.Я. Антиоксиданты и спорт. Основные причины неудачных применений. Возможные перспективы. Спортивная медицина: наука и практика). 2016; 6 (1):35-39.
27. Djordjevic D. The influence of training status on oxidative stress in young male handball players. *Mol Cell Biochem*. 2011; 351 (1-2): pp. 251-259.
28. Lambrecht M. Antioxidants in sport nutrition. 2014. 299 p.
29. Lastra C.A., Villegas I. Resveratrol as an antioxidant and pro-oxidant agent: mechanisms and clinical implications. *Biochem Soc Trans*. 2007; 35(5): pp. 1156-1160.
30. Pingitore A.M.D., Lima G.P.P., Mastori F., et al. Exercise and oxidative stress: potential effects of antioxidant dietary strategies in sports. *Nutrition*. 2015; 31: pp. 916-922.
31. Sugiura H., Ichinose M. Nitrate stress in inflammatory lung diseases. *Nitric Oxide*. 2011; 25(2): 138-144.