

Оксидативний стрес – негативний наслідок екзогенного впливу на організм спортсменів

УДК: 577(616-092)+796.06

О. О. Чернікова, О. І. Осадча, О. О. Шматова, М. А. Барчук

Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ, Україна

Резюме. Робота присвячена актуалізації питання окиснювального стресу та дії антиоксидантів у практиці спортивної підготовки. Визначено, що під час фізичної активності зростає потреба в кисні, особливо в скелетних м'язах, внаслідок чого відбувається різка зміна кровопостачання до різних органів. Визначені фізіологічні зміни збільшують вироблення вільних радикалів, викликаючи окиснювальне пошкодження біомолекул. *Мета.* Визначити наукові підходи у питанні окиснювального стресу та дії антиоксидантів у практиці спортивної підготовки. *Методи.* Аналіз і узагальнення даних спеціальної науково-методичної літератури; моніторинг інформаційних ресурсів мережі Інтернет; метод систематизації; контент-аналіз. *Результати.* Встановлено, що основними науковими напрямками дослідження виникнення оксидативного стресу та протидії йому є складання дієтичних програм на основі споживання різних комбінацій антиоксидантів, а також розробка технологій тренувальних занять зі зменшенням рівня розвитку та прояву оксидативного стресу через підібраний індивідуальний режим, спрямованість та обсяг фізичних навантажень. Проте нами виокремлено тези, які можуть визначити зміст гіпотези подальших досліджень: більшість робіт, які інформують про користь антиоксидантних добавок для зменшення пошкодження м'язів та протидії окиснювальному стресу після тренувальних занять на витривалість, були проведені на здорових, але нетренованих особах. У тренуваних людей ендогенний антиоксидантний захист може бути підвищеним, тобто кращим, і екзогенні антиоксидантні добавки для зменшення пошкодження м'язів можуть не мати значного ефекту дії на організм. Результати систематизації отриманих у ході аналізу даних науково-методичної літератури та моніторингу інформаційних джерел мережі Інтернет показали, що фізичні навантаження викликають окиснювальний стрес через утворення вільних радикалів та зниження рівня антиоксидантних ферментів у різних тканинах і органах. Проте, залежно від інтенсивності та обсягу навантаження в організмі розвивається різний ступінь окиснювального стресу: утворення вільних радикалів зростає зі збільшенням споживання кисню та окисного фосфорилювання.

Ключові слова: оксидативний стрес, спортсмени, антиоксиданти, окиснення, перенавантаження.

Oxidative stress is a negative consequence of exogenous influence on the athlete's body

O. O. Chernikova, O. I. Osadcha, O. O. Shmatova, M. A. Barchuk

National University of Ukraine on Physical Education and Sport, Kyiv, Ukraine

Abstract. The work addresses the actualisation of the issue of oxidative stress and the action of antioxidants in the practice of sports preparation. It has been found that during physical activity, the need for oxygen increases, especially in skeletal muscles, resulting in a sharp change in blood supply to various organs. These physiological changes lead to an increase in the production of free radicals, causing oxidative damage to biomolecules. *Objective.* To define scientific approaches to the issue of oxidative stress and the action of antioxidants in the practice of sports training. *Methods.* Analysis and synthesis of data of special scientific and

methodological literature; monitoring of information resources on the Internet; systematisation; and content analysis. *Results.* It was found that the main scientific directions of research of oxidative stress development and coping with it are the development of dietary programmes based on the consumption of various combinations of antioxidants, as well as the development of technologies of training sessions to reduce the level of development and manifestation of oxidative stress through the selected individual mode, focus, and volume of physical exercise. However, we identified the theses that can determine the content of the hypothesis for further research: most of the studies that reported about the benefits of antioxidant supplements to reduce muscle damage and counteract oxidative stress after endurance training were conducted on healthy but untrained individuals. In trained people, endogenous antioxidant defence may be increased, i.e. better, and exogenous antioxidant supplements to reduce muscle damage may not have a significant effect on the body.

The results of the systematisation of the data obtained during the analysis of scientific and methodological literature and monitoring of information resources on the Internet showed that physical activity causes oxidative stress through the formation of free radicals and a decrease in the level of antioxidant enzymes in various tissues and organs. However, the degree of oxidative stress depends on the intensity and volume of exercise: the formation of free radicals increases with increasing oxygen consumption and oxidative phosphorylation.

Keywords: oxidative stress, athletes, antioxidants, oxidation, overload.

Постановка проблеми. Сучасні наукові дослідження досягли консенсусу у ствердженні того, що одне тренувальне заняття викликає окиснювальний стрес в організмі спортсмена, а утворені при цьому вільні радикали стають важливими модуляторами м'язової та системної адаптації до фізичного навантаження [1].

Це ґрунтується на результатах досліджень впливу фізичних навантажень на організм спортсмена у науковій теорії та практиці спортивної фізіології й спортивної медицини за останні три десятиліття [2].

Мета дослідження – визначити наукові підходи у питанні окиснювального стресу та дії антиоксидантів у практиці спортивної підготовки.

Методи дослідження: аналіз і узагальнення даних спеціальної науково-методичної літератури; моніторинг інформаційних ресурсів мережі Інтернет; метод систематизації; контент-аналіз.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз і узагальнення даних спеціальної науково-методичної літератури передбачав передусім визначення змісту поняття оксидативного стресу та пояснення специфіки його формування в організмі під дією фізичних навантажень спортивного характеру.

Моніторинг інформаційних ресурсів мережі Інтернет та метод систематизації дозволив виділити основні наукові напрями дослідження оксидативного стресу у практиці спортивної підготовки, а контент-аналіз поєднав їх із визначеними у ході аналізу й узагальнення даних спеціальної науково-методичної літератури основними напрямками дослідження засобів протидії: дієтичних програм на основі споживання різних комбінацій антиоксидантів; технологій тренувальних занять

на основі індивідуалізованого підходу до планування і підбору фізичних навантажень.

У патогенезі багатьох захворювань людини була визначена участь оксидативного стресу, поняття, введеного в 1985 р., що визначається як загальне окиснювальне пошкодження тканин і органів, індуковане дисбалансом між утворенням активних форм кисню (надлишковим) та активністю систем антиоксидантного захисту (недостатньою) (рис. 1) [16].

Починаючи з розшифровки патогенетичних механізмів та патофізіологічних наслідків дії вільних радикалів, біомедичні наукові дослідження також спрямовані на впровадження потенційних методів лікування і боротьбу з окиснювальним стресом [15].

Під час фізичних навантажень зростає потреба в кисні, особливо в скелетних м'язах, що спричиняє різку зміну кровопостачання до різних органів. Крім того, пошкодження м'язів, спричинене фізичними вправами, сприяє інфільтрації фагоцитів (тобто, нейтрофілів і макрофагів) до зони ураження (рис. 2). [25, 37].

Процеси, що супроводжують виконання інтенсивного фізичного навантаження, збільшують вироблення вільних радикалів та призводять до окиснювального пошкодження біомолекул [1, 2].

Так, у своїх роботах учені, спираючись на останні досягнення біохімічних та молекулярно-біологічних методів дослідження, спостерігали за цими процесами на клітинному рівні та зробили висновок, згідно з яким, вільні радикали, що утворюються під час виконання фізичних навантажень спортивного характеру, відіграють окрему роль у процесі фізіологічної адаптації організму спортсмена [23, 25].

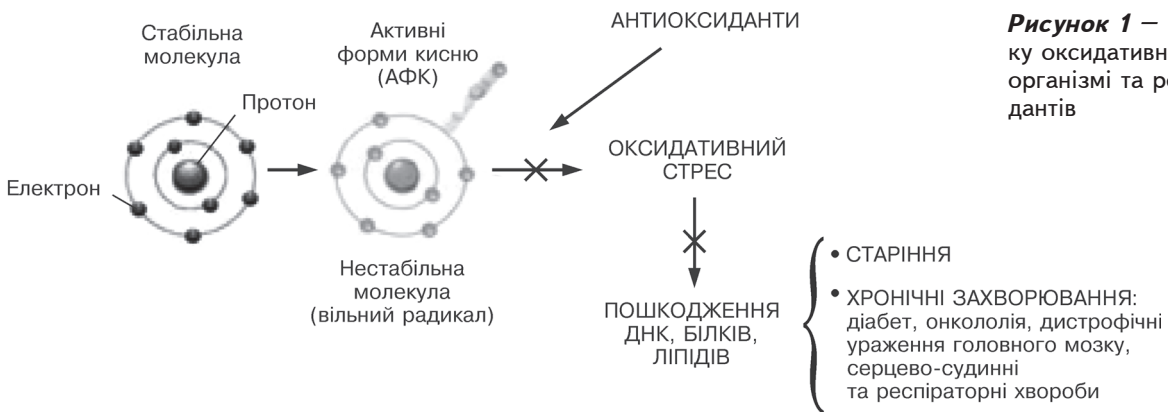


Рисунок 1 – Схема розвитку оксидативного стресу в організмі та роль антиоксидантів

Індукований фізичними вправами окиснювальний стрес як процес збільшення продукції вільних радикалів вивчається вже 40 років. Вперше його представили у результатах досліджень у 1978 р., під час проведення обстеження спортсменів, які спеціалізувались на витривалість: суб'єкти виконували 60-хвилинне тренування на велоергометрі з максимальною інтенсивністю 50 % максимального споживання кисню. Експериментальні дані показали підвищення рівня пентану — показника перекисного окиснення ліпідів [23, 25].

Саме цей факт у подальшому знайшов своє відображення у продовженні всебічного вивчення окиснювального стресу. Було встановлено, що оскільки тривалі фізичні навантаження призводять до збільшення вироблення оксидантів у скелетних м'язах, а отже, до регулярної активації ферментативних антиоксидантних механізмів, тренувальні навантаження на витривалість підвищують адаптаційні процеси і посилюють регуляторну активність антиоксидантних ферментів у скелетних м'язах, а саме супероксиддисмутази [23, 25].

Безсумнівно, високі концентрації вільних радикалів негативно впливають на функцію м'язів, розвиваючи больовий синдром і запалення, уражаючи м'язову тканину на клітинному рівні, що призводить до зниження та втрати спортивних результатів. Тому окремі фахівці рекоменду-

ють постійний прийом неферментативних антиоксидантних добавок, таких як вітаміни С і Е та β-ліпоева кислота. Проте слід зазначити, що останні дослідження можливостей неферментативних антиоксидантних добавок для запобігання шкідливому впливу вільних радикалів на організм під час виконання фізичних навантажень показали суперечливі результати [14].

Інтегративний вплив антиоксидантів на окиснювальний стрес, спричинений фізичними вправами, все ще залишається предметом активних дискусій. Так, Т. Kawamura, І. Muraoka зазначають, що антиоксиданти можуть проявляти свої ефекти за певних умов, пов'язаних із тренуванням і фізичними вправами, наприклад, один вид спорту проти іншого (аеробні вправи проти анаеробних) або в певний час тренування (до або після виконання серії вправ) [22].

Учені дійшли висновку, що підвищення оксидативного стресу відіграє певну роль у патофізіології синдрому перевантаження. Ослаблені реакції оксидативного стресу та антиоксидантної здатності до фізичних навантажень при перетренованості та перенапруженні окремих органів і систем організму можуть бути пов'язані з нездатністю ефективно виконувати тренувальні вправи та поганою адаптацією до самих фізичних навантажень [22].

Стрес-реакція на тренувальне навантаження



Адаптаційна відповідь

- ✓ Підвищення мітохондріального біогенезу
- ✓ Підвищення антиоксидантної активності
- ✓ Підвищення анаболістичних процесів у скелетних м'язах

Рисунок 2 – Фізіологічна адаптація до тренувального навантаження

Дослідженнями С. Simioni et al. було встановлено необхідність проведення через неінвазивні дослідження (сечі та слини) моніторингу для визначення біохімічного складу оксидативного стресу та контролю досягнення післятренувального відновлення у спортсменів [39].

Контент-аналіз розглянутих за темою дослідження наукових робіт показав, що вид спорту не має впливу на рівень маркерів оксидативного стресу, але науковці рекомендують вживати антиоксиданти як невід'ємний засіб тренувально-підготовчого режиму і процесу відновлення [24, 27].

Окремими дослідженнями встановлено, що динаміка оксидативного стресу та нітритів при максимальних навантаженнях у спортсменів високого класу пов'язана з видом спорту (аеробний вид спорту – аеробний, анаеробний, аеробно-анаеробний) та абсолютно доступна у дігностичі шляхом вимірювання концентрації лактату, оксиду азоту та тіобарбітумних реактивних речовин (ТБАРС) як індексу перекисного окиснення ліпідів. Результати показали, що довготривалі тренувальні стратегії встановлюють різні базальні рівні нітритів та перекисного окиснення ліпідів у спортсменів, що можна пояснити різними механізмами індукції активних форм кисню (АФК) під впливом аеробних та анаеробних вправ [13, 28–30].

Поряд з дослідженнями окиснювального стресу – причин та наслідків – з'явилися численні дослідження, що стосуються використання антиоксидантних добавок [3, 31, 32, 34]. Дослідники провели дослідження на групі спортсменів (футболістів), де вони спостерігали за впливом цинку і магнію на оксидантно-антиоксидантну рівновагу (О/АО). Наприкінці дослідження вони дійшли висновку, що споживання цинку позитивно впливає на оксидантно-антиоксидантну рівновагу [36]. Подібні дослідження свідчать про те, що споживання антиоксидантів може захистити від оксидативного стресу, викликаного фізичними навантаженнями [11, 19].

Дослідження, що вивчають вплив вітамінних добавок (вітамін С, вітамін Е та коензим Q10) ще не надали суттєвих наукових доказів, які б підтверджували їх здатність покращувати працездатність та/або відновлення шляхом зменшення впливу оксидативного стресу та розвитку відповідних патологічних процесів, таких як запалення [9, 10, 35].

Встановлено, що добавки не впливають на окиснювально-відновлювальні чутливі сигнальні шляхи, окиснення і відновлення розглядаються разом як взаємодоповнюючі процеси [12, 20, 40, 41]. Існує інше бачення, згідно з яким вітамінні

добавки пригнічують ефекти, спричинені утворенням активних форм кисню [17, 18, 21, 33, 38].

Останнім часом увага вчених у галузі спорту зосереджена на підгрупі метаболітів, отриманих із рослинних джерел, під назвою поліфеноли, завдяки їхнім антиоксидантним та протизапальним властивостями [23]. Дослідження показали, що включення цієї добавки покращує відновлення м'язів після тренувальних занять саме на витривалість [5, 6, 39].

Існують додаткові докази на підтримку ідеї про те, що поліпшення відновлення м'язів може позитивно впливати на продуктивність в наступні дні після високоінтенсивних вправ, що формують втому [4, 8].

Група дослідників посилається на зміни в процесі формування та розвитку оксидативного стресу, спричиненого фізичною активністю. Вони стверджують, що аеробні та анаеробні вправи мають різний вплив на м'язи, але обидва типи позитивно впливають на біомаркери окиснювального стресу. Аеробні вправи підвищують статус ендогенних антиоксидантів. Помірні регулярні фізичні вправи призводить до підвищення антиоксидантної активності через зміни в окисно-відновному гомеостазі [26].

Окремо слід відзначити встановлений фахівцями факт, що фізичні навантаження з інтенсивністю від 50 до 80 % максимального споживання кисню та з частотою три тренувальні заняття на тиждень показані для системи профілактики оксидативного стресу [7].

Висновки. Результати наших досліджень дозволили виокремити провідну тенденцію наукових пошуків за представленою проблематикою, відповідно до якої збільшення швидкості споживання кисню під час тренування призводить до більшого утворення його активних форм порівняно з неповним відновленням самого кисню.

Спираючись на встановлені нами наукові підходи до вивчення питання окиснювального стресу та дії антиоксидантів у практиці спортивної підготовки, слід зазначити, що основною стратегією у вирішенні даного питання на сьогодні є складання програм раціонального харчування із включенням потужних антиоксидантних нутрієнтів, задіяння системи фармакологічної підтримки та протидії оксидативному стресу, розробка та апробація моніторингових системи на основі експрес-методів контролю розвитку оксидантного стресу і зменшення його прояву та профілактику виникнення через розробку та впровадження технологій організації спеціалізованих тренувальних занять.

Література

1. Осадча О, Павлова О. Екологічна триада в спорті. Сучасний погляд. [Ecological triad in sport. Modern view] Спортивна медицина, фізична терапія та ерготерапія. 2021;(1):3134. doi: 10.32652/spmed.2021.1.31-34
2. Осадча О, Борисова О, Футорний С. Оксидантний стрес у спорті [Oxidative stress in sports]. Спортивна медицина, фізична терапія та ерготерапія, 2022.2:19-22. doi: 10.32652/spmed.2022.2.19-22.
3. Bailey DM, Williams R, Betts JA, Thompson D, Hurst TL. Oxidative stress, inflammation and recovery of muscle function after damaging exercise: effect of 6-week mixed antioxidant supplementation. Eur Journal Appl Physiol. 2011;111(6):925-36. doi: 10.1007/s00421-010-1718-x.
4. Bell PG, Stevenson E, Davison GW, Howatson G. The Effects of Montmorency Tart Cherry Concentrate Supplementation on Recovery Following Prolonged, Intermittent Exercise. Nutrients. 2016;8(7):441. doi: 10.3390/nu8070441.
5. Bell PG, Walshe IH, Davison GW, Stevenson E, Howatson G. Montmorency cherries reduce the oxidative stress and inflammatory responses to repeated days high-intensity stochastic cycling. Nutrients. 2014;6(2):829-43. doi: 10.3390/nu6020829.
6. Bell PG, Walshe IH, Davison GW, Stevenson EJ, Howatson G. Recovery facilitation with Montmorency cherries following high-intensity, metabolically challenging exercise. Appl Physiol Nutr Metab. 2015;40(4):414-23. doi: 10.1139/apnm-2014-0244.
7. Bouzid MA, Filaire E, McCall A, Fabre C. Radical Oxygen Species, Exercise and Aging: An Update. Sports Med. 2015;45(9):1245-1261. doi: 10.1007/s40279-015-0348-1.
8. Bowtell JL, Summers DP, Dyer A, Fox P, Mileva KN. Montmorency cherry juice reduces muscle damage caused by intensive strength exercise. Med Sci Sports Exerc. 2011;43(8):1544-51. doi: 10.1249/MSS.0b013e31820e5adc.
9. Braakhuis AJ. Effect of vitamin C supplements on physical performance. Curr Sports Med Rep. 2012;11(4):180-4. doi: 10.1249/JSR.0b013e31825e19cd.
10. Braakhuis AJ, Hopkins WG. Impact of Dietary Antioxidants on Sport Performance: A Review. Sports Med. 2015;45(7):939-55. doi: 10.1007/s40279-015-0323-x.
11. Brites FD, Evelson PA, Christiansen MG, Nicol MF, Basílico MJ, Wikinski RW, Llesuy SF. Soccer players under regular training show oxidative stress but an improved plasma antioxidant status. Clin Sci (Lond). 1999;96(4):381-5. doi:10.1042/cs19980269
12. Cumming KT, Raastad T, Holden G, Bastani NE, Schneeberger D, Paronetto MP, Mercatelli N, Ostgaard HN, Ugelstad I, Caporossi D, Blomhoff R, Paulsen G. Effects of vitamin C and E supplementation on endogenous antioxidant systems and heat shock proteins in response to endurance training. Physiol Rep. 2014;2(10):e12142. doi: 10.14814/phy2.12142.
13. D'Angelo S, Sammartino D. Protective effect of Annurcaapple extract against oxidative damage in human erythrocytes. Current Nutrition & Food Science. 2015;11(4):248-256. doi: 10.2174/1573401311666150610210529
14. D'Angelo S, Rosa R. Oxidative stress and sport performance. Sport Science. 2020;13:18-22.
15. Davalli P, Mitic T, Caporali A, Lauriola A, D'Arca D. ROS, Cell Senescence, and Novel Molecular Mechanisms in Aging and Age-Related Diseases. Oxid Med Cell Longev. 2016;2016:3565127. doi: 10.1155/2016/3565127.
16. Gutteridge JM, Halliwell B. Free radicals and antioxidants in the year 2000. A historical look to the future. Ann N Y Acad Sci. 2000;899:136-47. doi: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06182.x.
17. Gomez-Cabrera MC, Martínez A, Santangelo G, Pallardó FV, Sastre J, Viña J. Oxidative stress in marathon runners: interest of antioxidant supplementation. Br Journal Nutr. 200;96 (1) 1:S31-3. doi: 10.1079/bjn20061696.
18. Gomez-Cabrera MC, Domenech E, Romagnoli M, Arduini A, Borrás C, Pallardó FV, Sastre J, Viña J. Oral administration of vitamin C decreases muscle mitochondrial biogenesis and hampers training-induced adaptations in endurance performance. Am Journal Clin Nutr. 2008;87(1):142-9. doi: 10.1093/ajcn/87.1.142.
19. Groussard C, Machefer G, Rannou F, Faure H, Zouhal H, Sergent O, Chevanne M, Cillard J, Gratas-Delamarche A. Physical fitness and plasma non-enzymatic antioxidant status at rest and after a wingate test. Can Journal Appl Physiol. 2003;28(1):79-92. doi: 10.1139/h03-007.
20. Higashida K, Kim SH, Higuchi M, Holloszy JO, Han DH. Normal adaptations to exercise despite protection against oxidative stress. Am Journal Physiol Endocrinol Metab. 2011;301(5):E779-84. doi: 10.1152/ajpendo.00655.2010.
21. Howatson G, McHugh MP, Hill JA, Brouner J, Jewell AP, van Someren KA, Shave RE, Howatson SA. Influence of tart cherry juice on indices of recovery following marathon running. Scand Journal Med Sci Sports. 2010;20(6):843-52. doi: 10.1111/j.1600-0838.2009.01005.x.
22. Kawamura T, Muraoka I. Exercise-Induced Oxidative Stress and the Effects of Antioxidant Intake from a Physiologic Viewpoint. Antioxidants (Basel). 2018;7(9):119. doi: 10.3390/antiox7090119.
23. Malaguti M, Angeloni C, Hrelia S. Polyphenols in exercise performance and prevention of exercise-induced muscle damage. Oxid Med Cell Longev. 2013;2013:825928. doi: 10.1155/2013/825928.
24. Manach C, Scalbert A, Morand C, Rémésy C, Jiménez L. Polyphenols: food sources and bioavailability. Am Journal Clin Nutr. 2004;79(5):727-47. doi: 10.1093/ajcn/79.5.727.
25. Mankowski RT, Anton SD, Buford TW, Leeuwenburgh C. Dietary Antioxidants as Modifiers of Physiologic Adaptations to Exercise. Med Sci Sports Exerc. 2015;47(9):1857-68. doi: 10.1249/MSS.0000000000000620.
26. Mihalas E, Serban, LI, Matei D, Cascaval D, Galaction AI Changes of oxidative stress caused by physical activity. Studia UBB Chemia LXIV. 2019;2(1): 35-47. DOI:10.24193/subbchem.2019.2.03
27. Morrison D, Hughes J, Della Gatta PA, Mason S, Lamon S, Russell AP, Wadley GD. Vitamin C and E supplementation prevents some of the cellular adaptations to endurance-training in humans. Free Radic Biol Med. 2015;89:852-62. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2015.10.412.
28. Motti ML, D Angelo S, Meccariello R. MicroRNAs, Cancer and Diet: Facts and New Exciting Perspectives. Curr Mol Pharmacol. 2018;11(2):90-96. doi: 10.2174/1874467210666171013123733. PMID: 29034844.
29. Muñoz Marín D, Barrientos G, Alves J, Grijota FJ, Robles MC, Maynar M. Oxidative stress, lipid peroxidation indexes and antioxidant vitamins in long and middle distance athletes during a sport season. Journal Sports Med Phys Fitness. 2018 Dec;58(12):1713-1719. doi: 10.23736/S0022-4707.17.07887-2.
30. Myburgh KH. Polyphenol supplementation: benefits for exercise performance or oxidative stress? Sports Med. 2014 May;44 (1):S57-70. doi: 10.1007/s40279-014-0151-4. PMID: 24791917; PMCID: PMC4008802.
31. Nakhostin-Roohi B, Babaei P, Rahmani-Nia F, Bohlooli S. Effect of vitamin C supplementation on lipid peroxidation, muscle damage and inflammation after 30-min exercise at 75 % VO2max. Journal Sports Med Phys Fitness. 2008;48(2):217-24.
32. Naziroğlu M, Kiliç F, Uğuz AC, Celik O, Bal R, Butterworth PJ, Baydar ML. Oral vitamin C and E combination modulates blood lipid peroxidation and antioxidant vitamin levels in maximal exercising basketball players. Cell Biochem Funct. 2010;28(4):300-5. doi: 10.1002/cbf.1657.
33. Paulsen G, Cumming KT, Holden G, Hallén J, Rønnestad BR, Sveen O, Skaug A, Paur I, Bastani NE, Østgaard HN, Buer C, Middtun M, Freuchen F, Wiig H, Ulseth ET, Garthe I, Blomhoff R, Benestad HB, Raastad T. Vitamin C and E supplementation hampers cellular adaptation to endurance training in humans: a double-blind, randomised, controlled trial. Journal Physiol. 2014;592(8):1887-901. doi: 10.1113/jphysiol.2013.267419.
34. Pesić S, Jakovljević V, Cubriilo D, Zivković V, Jorga V, Mujović V, Stojimirović B. Oxidative status evaluation in elite karate athletes during training process. Vojnosanit Pregl. 2009;66(7):551-5. Serbian. doi: 10.2298/vsp0907551p.
35. Petermelj TT, Coombes JS. Antioxidant supplementation during exercise training: beneficial or detrimental? Sports Med. 2011;41(12):1043-69. doi: 10.2165/11594400-000000000-00000.
36. Popovici C, Tache S, Popovici C, Bondor C. Suplimentarea de magneziu și zinc și balanța oxidanți/antioxidanți în efort fizic. Palestrica of the Third Millennium Civilization & Sport 2009;10(4):371-376. doi: 10.26717/BJSTR.2020.32.005278

37. Radak Z, Zhao Z, Koltai E, Ohno H, Atalay M. Oxygen consumption and usage during physical exercise: the balance between oxidative stress and ROS-dependent adaptive signaling. *Antioxid Redox Signal*. 2013;18(10):1208-46. doi: 10.1089/ars.2011.4498.

38. Ristow M, Zarse K, Oberbach A, Klötting N, Birringer M, Kiehnopf M, Stumvoll M, Kahn CR, Blüher M. Antioxidants prevent health-promoting effects of physical exercise in humans. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2009 May 26;106(21):8665-70. doi: 10.1073/pnas.0903485106.

39. Simioni C, Zauli G, Martelli AM, Vitale M, Sacchetti G, Gonelli A, Neri LM. Oxidative stress: role of physical exercise and antioxidant

nutraceuticals in adulthood and aging. *Oncotarget*. 2018 Mar 30;9(24):17181-17198. doi: 10.18632/oncotarget.24729.

40. Yfanti C, Akerström T, Nielsen S, Nielsen AR, Mounier R, Mortensen OH, Lykkesfeldt J, Rose AJ, Fischer CP, Pedersen BK. Antioxidant supplementation does not alter endurance training adaptation. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;42(7):1388-95. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181cd76be.

41. Yfanti C, Fischer CP, Nielsen S, Akerström T, Nielsen AR, Veskokouk AS, Kouretas D, Lykkesfeldt J, Pilegaard H, Pedersen BK. Role of vitamin C and E supplementation on IL-6 in response to training. *Journal Appl Physiol* (1985). 2012;112(6):990-1000. doi: 10.1152/jappphysiol.01027.2010.

ochernikova@uni-sport.edu.ua

oosadcha@uni-sport.edu.ua

oshmatova@uni-sport.edu.ua

nredko@uni-sport.edu.ua

Надійшла 28.02.2024