

УДК 616-001:577.151.63

DOI: <https://doi.org/10.17721/1728.2748.2025.102.21-26>

Катерина ДВОРЩЕНКО, д-р біол. наук

ORCID ID: 0000-0003-3118-9355

e-mail: kateryna.dvorshchenko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Юрій ТУГАРОВ, асп.

ORCID ID: 0000-0002-1583-6279

e-mail: tugarovdoc@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПОКАЗНИКИ СИСТЕМИ АНТИОКСИДАНТНОГО ЗАХИСТУ В ПЛАЗМІ КРОВІ КОМБАТАНТІВ ПІСЛЯ БОЙОВОЇ ТРАВМИ ОПОРНО-РУХОВОГО АПАРАТУ

Вступ. Унаслідок повномасштабної війни в Україні, що розпочалась із 2022 року, багато військовослужбовців зазнали негативного впливу різних факторів бойової діяльності. Використання високотехнічних засобів та інноваційних технологій ведення бою спричинює високий рівень отримання бойових травм опорно-рухового апарату комбатантами. Особливої актуальності набуває вивчення перебігу ранового процесу та стратегії його ефективного лікування. Від цього залежить швидкість одужання пацієнтів і запобігання розвитку місцевих і системних ускладнень, пов'язаних із такими пораненнями. Ураження тканин і розвиток у них запалення пов'язані з порушенням окисно-антиоксидантної рівноваги в організмі. Це призводить до розвитку окисного стресу і ушкодження біологічних молекул. Важливу роль у захисті від вільних радикалів відіграють антиоксидантні ферменти. Тому метою роботи було визначити активність антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази, каталази) і вміст сульфгідрильних груп у плазмі крові комбатантів після бойової травми опорно-рухового апарату.

Методи. Усі учасники дослідження були розподілені на дві експериментальні групи, середній вік пацієнтів у кожній групі був однаковим. До першої групи (n=12) включено умовно здорових людей. Друга група (n=15) – пацієнти з вогнепальним пораненням суглоба. У плазмі крові пацієнтів визначали супероксиддисмутазу та каталазу активність загальноприйнятими біохімічними методами. Обробку результатів дослідження проводили загальноприйнятими методами варіаційної статистики.

Результати. У ході проведених нами експериментальних досліджень було показано зниження в плазмі крові активності антиоксидантних ферментів: супероксиддисмутаза активність зменшується в 1,7 раза, а каталаза – у 1,5 раза відносно показників групи умовно здорових людей. Установлено, що у плазмі крові пацієнтів із бойовою травмою суглобів вміст сульфгідрильних груп зменшується: небілкових SH-груп – у 1,8 раза, білкових і загальних SH-груп – у 1,5 раза відносно групи умовно здорових людей.

Висновки. Отримані результати свідчать про зменшення резервних захисних механізмів в організмі пацієнтів із бойовою травмою опорно-рухового апарату.

Ключові слова: бойова травма, опорно-руховий апарат, плазма крові, антиоксидантна система.

Вступ

Повномасштабна війна між Україною та росією стала каталізатором для активного впровадження інноваційних підходів у веденні бойових дій. Це виявляється в широкому застосуванні безпілотних літальних апаратів, використанні кіберзброї, діджиталізації систем управління та зв'язку тощо. Застосування сучасних технологій у веденні війни збільшує ризик отримання поранень комбатантами при виконанні бойових завдань, що призводить до серйозних наслідків для їхнього здоров'я, як фізичного, так і психологічного. Ці наслідки можуть варіюватися від тимчасових травм до тривалих інвалідностей (Головко, 2023). Зважаючи на третій рік повномасштабної агресії росії проти України, фіксується збільшення кількості поранених серед українських військових. Це підкреслює нагальну потребу в детальному дослідженні перебігу ранового процесу та створенні передових стратегій лікування. Такі дії є фундаментом для запобігання як локальним, так і загальним ускладненням, спричиненим бойовими травмами. Слід зазначити, що сучасні бойові поранення, особливо важкі, вимагають значного часу для лікування та подальшої реабілітації (Гірик, & Киридон, 2024). Загоєння ран – це багатогранний і динамічний біологічний процес, що залежить від чіткої координації численних клітинних взаємодій для ефективної регенерації пошкоджених тканин. Тому існує нагальна потреба в поглибленому біологічному та клінічному розумінні цих фундаментальних механізмів (Денисюк та ін., 2022).

Бойові ушкодження опорно-рухового апарату посідають значне місце серед усіх поранень. Після першочергової хірургічної допомоги, спрямованої на порятунок життя, ключовим завданням медичної служби стає відновлення функцій пошкоджених органів і систем опорно-рухового апарату (Гур'єв та ін., 2024; Роговський та ін., 2022). Для оцінювання стану цих пацієнтів та ефективності їхнього лікування використовують біохімічні показники біологічних рідин, зокрема крові. Особливу увагу приділяють біохімічним параметрам окисно-антиоксидантної системи. Відомо, що ушкодження тканин і розвиток запалення супроводжуються надмірним утворенням вільних радикалів, які атакують важливі біологічні макромолекули, спричиняючи пошкодження клітин і порушення гомеостазу. Антиоксидантна система організму слугує захисним бар'єром проти надмірної кількості вільних радикалів, утворення яких значно зростає при патологічних станах (Demirci-Çekiç et al., 2022). Отже, дослідження показників антиоксидантної системи організму при бойовій травмі є критично важливим для визначення тяжкості патологічного процесу й оцінювання ефективності його лікування.

Тому **метою роботи** було визначити активність антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази, каталази) і вміст сульфгідрильних груп у плазмі крові комбатантів після бойової травми опорно-рухового апарату.

Методи

У дослідженні брали участь 27 пацієнтів – чоловіки, середній вік 40 років, які перебували на стаціонарному або амбулаторному лікуванні в ортопедичному спеціалі-

© Дворщенко Катерина, Тугаров Юрій, 2025

зованому медичному центрі "Ортоклініка" (м. Тернопіль, Україна). У 15 пацієнтів на підставі клінічних і рентгенологічних критеріїв було встановлено діагноз "вогнепальне поранення суглоба". На етапі відбору всім хворим проводили рентгенографію суглобів у прямій (передньозадній) і боковій проєкціях.

Усі учасники дослідження були розподілені на дві експериментальні групи, середній вік пацієнтів у кожній групі був однаковим. До першої групи (n=12) включено умовно здорових людей. Друга група (n=15) – пацієнти з вогнепальним пораненням суглоба. Усі учасники, які добровільно погодилися взяти участь у дослідженні, ознайомилися та підписали відповідну форму інформованої згоди. Дослідження виконані з дотриманням основних положень "Правил етичних принципів проведення наукових медичних досліджень за участю людини", затверджених Гельсінською декларацією (1964–2013), ІСН GCP (1996), Директиви ЄС № 609 (від 24.11.1986), наказів МОЗ України № 690 від 23.09.2009 р., № 944 від 14.12.2009 р., № 616 від 03.08.2012 р. і схвалені Комітетом з етики медичного центру "Ортоклініка" (м. Тернопіль, Україна). Вжито всіх заходів для забезпечення анонімності пацієнтів. Усі учасники, які добровільно погодилися взяти участь у дослідженні, ознайомилися та підписали відповідну форму інформованої згоди.

Забір біологічного матеріалу проводили на базі спеціалізованого медичного центру "Ортоклініка", м. Тернопіль. Кров отримували пункцією з ліктьової вени пацієнта натще та переносили у пробірку. Плазму крові отримували шляхом центрифугування протягом 15 хв при 2000 g.

Супероксиддисмутазну активність визначали за здатністю ферменту конкурувати з нітросинім тетразолієм за супероксидні радикали (Durak et al., 1993). Каталазну активність вимірювали за кількістю незруйнованого гідроген пероксиду у пробі, який взаємодіє з розчином молібдату амонію (Goth, 1991). Вміст загальних, білокв'язаних і небілкових сульфгідрильних груп вимірювали за методом Елмана (реакція сульфгідрильних груп зі специфічним хромогенним реагентом – 5,5'-дитіобіс-(2-нітробензойною кислотою)) (Ellman, 1959). Визначення концентрації білка проведено за методом Лоурі (Lowry et al., 1951). Отримані дані тестували на нормальне розподілення за допомогою тесту Шапіро – Вілка з використанням програмного пакету "GraphPad Prism 8.4.3" ("GraphPad Software Inc.", США). Подальший обрахунок результатів здійснювали за допомогою Н-критерію Крускала – Уолліса з посттестом Данна та подавали у вигляді середнього арифметичного ± стандартна похибка середнього. Результати вважали значущими, коли $p \leq 0,05$.

Результати

Вільні радикали, що утворюються в нашому організмі як побічні продукти нормального клітинного метаболізму, відіграють ключову роль у численних фізіологічних каскадах, зокрема в молекулярному переданні

клітинних сигналів, механізмах імунного захисту та підтриманні гомеостазу тканин, виконуючи спектр біологічних функцій (Lennicke, & Cochemé, 2021). Їхні ефекти на організм залежать від їхньої внутрішньоклітинної концентрації. При запальних і дегенеративних процесах їхня кількість може значно зростати. Коли вироблення вільних радикалів значно перевищує можливість антиоксидантних систем організму їх нейтралізувати, виникає стан окисного стресу. За цих умов їхні фізіологічні функції перетворюються на деструктивні (руйнування структури та порушення функцій біологічних молекул), що, своєю чергою, призводить до розвитку різноманітних патологій (Bolduc et al., 2019).

Антиоксидантна система є критично важливим захисним механізмом, що протидіє окиснювальному пошкодженню та підтримує нормальне функціонування клітин і тканин, запобігаючи формуванню широкого спектра патологічних станів. Антиоксидантний захист включає поглинання вільних радикалів, хелатування металів і ферментативну діяльність для нейтралізації реакційноздатних видів молекул відразу після їх утворення в нашому організмі (Chaudhary et al., 2023). Вагому роль у нейтралізації вільних радикалів виконують антиоксидантні ферменти. Першою лінією антиоксидантного захисту організму від вільних радикалів є ферменти супероксиддисмутаза та каталаза. Супероксиддисмутаза каталізує перетворення супероксиду (O_2^-) на кисень і перекис водню. Завдяки своїй активності супероксиддисмутаза регулює рівні різноманітних активних форм кисню (АФК), таким чином обмежуючи потенційну токсичність цих молекул і контролюючи широкі аспекти життя клітин, які регулюються їхніми сигнальними функціями (Wang et al., 2018). Другим важливим антиоксидантним ферментом для захисту клітини від окисного пошкодження АФК є каталаза. Вона зустрічається майже в усіх живих організмах, які піддаються впливу кисню (бактерії, рослини та тварини). Каталаза каталізує реакцію розкладання перекису водню до води та кисню. Вважається, що дефіцит або порушення функціонування каталази пов'язані з патогенезом багатьох захворювань, включаючи запалення, ішемія-реперфузійне пошкодження, метаболічні порушення та дегенеративні хвороби (Nandi et al., 2019). Завдяки злагодженій сумісній роботі супероксиддисмутази та каталази концентрація АФК в організмі підтримується на фізіологічному рівні.

У наших дослідженнях для оцінювання антиоксидантної системи було визначено супероксиддисмутазну та каталазну активність у сироватці крові пацієнтів із бойовою травмою опорно-рухового апарату. Установлено, що активність антиоксидантних ферментів у плазмі крові пацієнтів із бойовою травмою суглобів знижується: супероксиддисмутазна активність зменшується в 1,7 раза, а каталазна – у 1,5 раза відносно показників групи умовно здорових людей (табл. 1).

Таблиця 1

Активність антиоксидантних ферментів у плазмі крові дослідних груп, (M ± m)

Групи людей	Показник	Супероксиддисмутаза, ум. од. × хв ⁻¹ × мг білка ⁻¹	Каталаза, мкмоль × хв ⁻¹ × мг білка ⁻¹
Умовно здорові (n = 12)		3,47 ± 0,33	13,18 ± 1,24
Бойова травма (n = 15)		2,03 ± 0,19*	8,57 ± 0,84*

Примітка. * – $p < 0,05$ відносно умовно здорових людей.

Ключовими компонентами антиоксидантної системи є біологічні молекули, що містять сульфгідрильні (SH)-групи. Унікальні хімічні властивості атома сірки в тіоловій групі надають цим сполукам вузькоспеціалізованих функцій, дозволяючи їм виконувати безліч біохімічних ролей. Серед них особливе місце займає молекула глутатіону (GSH) – низькомолекулярного трипептиду, що становить основний мобільний пул SH-груп. На молекулярному рівні глутатіон бере участь у детоксикації, знешкоджуючи як зовнішні (ксенобіотики), так і внутрішні токсичні сполуки. Будучи найвідомішим природним антиоксидантом (Gasmі et al., 2024), GSH відіграє критичну роль у захисті клітин від окисного пошкодження, нейтралізації електрофільних ксенобіотиків і підтриманні клітинного редокс-гомеостазу. Крім того, сульфгідрильні групи є невід’ємною частиною високомолекулярних білків (так звані білок-зв’язані

SH-групи). Висококонсервативні цистеїнові залишки в цих білках зазвичай розташовані у функціонально чи структурно значущих місцях. Тут вони функціонують як стабілізуючі елементи, каталітичні центри, учасники зв’язування металів та/або редокс-регулятори (Heathcote et al., 2024; Herpner, 2021). Отже, як низькомолекулярні тіоли (зокрема глутатіон), так і цистеїнові тіоли у складі білків функціонують як перша лінія захисту, екрануючи інші біомолекули від окисних і ксенобіотичних стресових факторів. Вони також активно підтримують окисно-відновний гомеостаз клітини й беруть участь у складних молекулярних сигнальних процесах в організмі.

Продемонстровано, що у плазмі крові пацієнтів із бойовою травмою суглобів вміст сульфгідрильних груп зменшується: небілкових SH-груп – у 1,8 раза, білкових SH-груп – у 1,5 раза відносно групи умовно здорових людей (табл. 2).

Таблиця 2

Вміст сульфгідрильних (SH-) груп у плазмі крові дослідних груп, мкмоль × мг білка⁻¹ (M ± m)

Групи людей	Показник	Небілкові SH-групи	Білкові SH-групи	Загальні SH-групи
Умовно здорові (n = 12)		0,51 ± 0,05	5,68 ± 0,53	6,14 ± 0,59
Бойова травма (n = 15)		0,29 ± 0,02*	3,74 ± 0,36*	4,03 ± 0,38*

Примітка. * – p < 0,05 відносно умовно здорових людей.

Відповідно, у крові комбатантів після бойової травми вміст загальних сульфгідрильних груп знижується в 1,5 раза відносно групи умовно здорових людей (табл. 2).

Дискусія і висновки

Виявлене нами зниження активності антиоксидантних ферментів у плазмі крові хворих із бойовою травмою суглобів свідчить про виснаження власних антиоксидантних резервів організму та надмірне накопичення АФК. За патологічних умов реакційноздатні молекули, що містять кисень (гідроксильний і супероксидний радикали), а також нерадикальні види (перекис водню) будуть окиснювати біологічні молекули (білки, ліпіди, нуклеїнові кислоти). Вони зазвичай нестабільні, мають короткий час існування, але хімічно дуже реактивні. Втрата функціональності важливих біомолекул через окисний стрес є одним із вагомих факторів, що опосередковує формування патологій, включаючи хвороби опорно-рухового апарату (Ansari et al., 2020; Liu et al., 2022).

Супероксид є первинним радикалом, який утворюється, коли молекула кисню отримує один електрон через ферментативні або неферментативні реакції. Супероксид легко перетворюється на інші АФК, що ускладнює оцінювання його внеску в індивідуальну етіологію. Оскільки радикальний електрон може запускати ланцюгові реакції, то супероксиддисмутаза, безсумнівно, відіграє ключову роль у захисті від опосередкованого АФК окисного пошкодження на початковій стадії (Yamacita-Borin et al., 2015; Fujii et al., 2022). Серед реакційноздатних речовин перекис водню вільно дифундує і відносно довго живе. Він діє як слабкий окиснювач, а також відновник; однак він не дуже реакційноздатний, але є попередником багатьох інших АФК. У більшості пошкоджень клітини ця молекула, як відомо, відіграє непряму роль. Одним із найважливіших продуктів є утворення більш реакційноздатного гідроксильного радикала (•OH) у присутності іонів перехідних

металів, таких як Fe²⁺, за допомогою реакції Фентона (Liu et al., 2021; Bolduc et al., 2019).

Проведені дослідження показали зниження концентрації небілкових SH-груп у плазмі крові пацієнтів із бойовою травмою суглобів, що вказує на виснаження пулу відновленого глутатіону (GSH). Дефіцит GSH безпосередньо компрометує молекулярні механізми антиоксидантного захисту, оскільки GSH є ключовим учасником нейтралізації вільних радикалів. Більш того, нестача глутатіону порушує тонку молекулярну регуляцію численних клітинних процесів, що залежать від його редокс-статусу: від синтезу ДНК і білка до модуляції експресії генів, регуляції клітинної проліферації та індукції апоптозу. Наслідком цього дефіциту є розвиток окисного стресу, який, діючи на молекулярному рівні, відіграє вагомий роль у патогенезі бойової травми (Jaganjac et al., 2022). Виявлене зниження вмісту білкових сульфгідрильних (SH)-груп, зокрема тих, що належать цистеїновим і метіоніновим залишкам, свідчить про окиснення білків унаслідок надмірного продукування вільних радикалів, особливо АФК. Цей процес призводить до формування як оборотних, так і необоротних молекулярних модифікацій у білкових структурах (Demasi et al., 2021). Це, у свою чергу, може призводити до зміни структури білків (утворення реакційноздатних сполук, які можуть пошкоджувати інші молекули), зниження або втрати каталітичної активності ферментів та інших функцій білкових молекул. Наприклад, у крові окиснення білків може впливати на її в'язкість, здатність до згортання та транспортні функції (Tsamesidis et al., 2020; Kehm et al., 2021).

Наші експериментальні дослідження виявили зниження активності ключових антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази та каталази) і зменшення вмісту тіолових груп у плазмі крові пацієнтів із бойовою травмою опорно-рухового апарату. Це вказує на виснаження резервних захисних механізмів організму. Такий дисбаланс окисно-відновного гомеостазу та втрата

адаптаційних можливостей через окисний стрес неминуче призводять до окисної модифікації життєво важливих біомолекул і клітин, що потенційно має системний вплив на весь організм. Тривалий окисний стрес може спричинити хронічне запалення, яке, своєю чергою, виступає медіатором у розвитку більшості хронічних захворювань. Отже, порушення окисно-антиоксидантної рівноваги в бік інтенсифікації вільнорадикальних процесів у крові є одним із механізмів, що погіршує перебіг вогнепальної бойової травми та сприяє розвитку численних ускладнень.

Внесок авторів: Катерина Дворченко – формулювання концепції дослідження, проведення біохімічних досліджень, обробка та аналіз отриманих результатів, написання рукопису; Юрій Тугаров – дизайн дослідження, збирання біологічного матеріалу.

Список використаних джерел

- Грік, С., & Киридон, А. (2024). *Хроніка. Два роки повномасштабної війни (24 лютого 2022 р. – 23 лютого 2024 р.)*. Державна наукова установа "Енциклопедичне видавництво".
- Головко, В. (2023). *Вторгнення. 2022. Широкомасштабна агресія Росії проти України*. (В. Смолий, відп. ред.). Інститут історії України НАН України. ISBN 978-617-14-0194-5
- Гур'єв, С., Танасієнко, П., & Деркач, Р. (2024). Травма опорно-рухового апарату у цивільних постраждалих внаслідок бойових дій. *Медицина невідкладних станів*, 20(6), 464–469. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.20.6.2024.1757>
- Денисюк, М., Дубров, С., Черняєв, С., Серєда, С., & Заїкін, Ю. (2022). Структура травматичних ушкоджень та досвід лікування поранених внаслідок бойових дій в перші дні нападу росії на Україну. *PAIN, ANAESTHESIA & INTENSIVE CARE*, 1(98), 7–12. [https://doi.org/10.25284/2519-2078.1\(98\).2022.256092](https://doi.org/10.25284/2519-2078.1(98).2022.256092)
- Роговський, В., Гуменюк, К., & Саволук, С. (2022). Клінічний досвід ведення пацієнтів із вогнепальними ранами у сучасних бойових умовах. *Хірургія. Ортопедія. Травматологія. Інтенсивна терапія*, 4(51), 12–13. <https://health-ua.com/multimedia/7/1/0/8/3/1670680677.pdf>
- Ansari, M. Y., Ahmad, N., & Haqqi, T. M. (2020). Oxidative stress and inflammation in osteoarthritis pathogenesis: Role of polyphenols. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 129, 110452. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110452>
- Bolduc, J. A., Collins, J. A., & Loeser, R. F. (2019). Reactive oxygen species, aging and articular cartilage homeostasis. *Free Radical Biology and Medicine*, 132, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.08.038>
- Bolduc, J. A., Collins, J. A., & Loeser, R. F. (2019). Reactive oxygen species, aging and articular cartilage homeostasis. *Free Radical Biology and Medicine*, 132, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.08.038>
- Chaudhary, P., Janmeda, P., Docea, A. O., Yeskalyeva, B., Abdull Razis, A. F., Modu, B., Calina, D., & Sharifi-Rad, J. (2023). Oxidative stress, free radicals and antioxidants: Potential crosstalk in the pathophysiology of human diseases. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1158198. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1158198>
- Demasi, M., Augusto, O., Bechara, E. J. H., Bicev, R. N., Cerqueira, F. M., da Cunha, F. M., Denicola, A., Gomes, F., Miyamoto, S., Netto, L. E. S., Randall, L. M., Stevani, C. V., & Thomson, L. (2021). Oxidative modification of proteins: From damage to catalysis, signaling, and beyond. *Antioxidants & Redox Signaling*, 35(12), 1016–1080. <https://doi.org/10.1089/ars.2020.8176>
- Demirci-Çekiç, S., Özkan, G., Avan, A., Uzunboy, S., Çapanoğlu, E., & Apak, R. (2022). Biomarkers of Oxidative Stress and Antioxidant Defense. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 209, 114477. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114477>
- Durak, I., Yurtarslan, Z., Canbolat, O., & Akyol, O. (1993). A methodological approach to superoxide dismutase (SOD) activity assay based on inhibition of nitroblue tetrazolium (NBT) reduction. *Clinica Chimica Acta*, 214(1), 103–104. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(93\)90307-p](https://doi.org/10.1016/0009-8981(93)90307-p)
- Ellman, G. (1959). Tissue sulfhydryl groups. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 82(1), 70–77. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(59\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0003-9861(59)90090-6)
- Fujii, J., Homma, T., & Osaki, T. (2022). Superoxide radicals in the execution of cell death. *Antioxidants*, 11(3), 501. <https://doi.org/10.3390/antiox11030501>
- Gasmi, A., Nasreen, A., Lenchuk, L., Lysiuk, R., Peana, M., Shapovalova, N., Piscopo, S., Komisarenko, M., Shanaida, M., Smetanina, K., Antonyak, H., Fira, L., Lykhatskiy, P., Fira, D., & Bjørklund, G. (2024). An update on glutathione's biosynthesis, metabolism, functions, and medicinal purposes. *Current Medicinal Chemistry*, 31(29), 4579–4601. <https://doi.org/10.2174/0109298673251025230919105818>
- Goth, L. (1991). A simple method for determination of serum catalase activity and revision of reference range. *Clinica Chimica Acta*, 196(2–3), 143–151. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(91\)90067-m](https://doi.org/10.1016/0009-8981(91)90067-m)
- Heathcote, K. C., Keeley, T. P., Myllykoski, M., Lundekvam, M., McTiernan, N., Akter, S., Masson, N., Ratcliffe, P. J., Arnesen, T., & Flashman, E. (2024). N-terminal cysteine acetylation and oxidation patterns may define protein stability. *Nature Communications*, 15(1), 5360. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49489-2>
- Heppner, D. E. (2021). Structural insights into redox-active cysteine residues of the Src family kinases. *Redox Biology*, 41, 101934. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2021.101934>
- Jaganjac, M., Milkovic, L., Zarkovic, N., & Zarkovic, K. (2022). Oxidative stress and regeneration. *Free Radical Biology and Medicine*, 181, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.02.004>
- Kehm, R., Baldensperger, T., Raupbach, J., & Höhn, A. (2021). Protein oxidation – Formation mechanisms, detection and relevance as biomarkers in human diseases. *Redox Biology*, 42, 101901. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2021.101901>
- Lennicke, C., & Cochemé, H. M. (2021). Redox metabolism: ROS as specific molecular regulators of cell signaling and function. *Molecular Cell*, 81(18), 3691–3707. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2021.08.018>
- Liu, G., Liu, Q., Yan, B., Zhu, Z., & Xu, Y. (2021). USP7 inhibition alleviates H2O2-induced injury in chondrocytes via inhibiting NOX4/NLRP3 pathway. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 617270. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.617270>
- Liu, L., Luo, P., Yang, M., Wang, J., Hou, W., & Xu, P. (2022). The role of oxidative stress in the development of knee osteoarthritis: A comprehensive research review. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 9, 1001212. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2022.1001212>
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)
- Nandi, A., Yan, L. J., Jana, C. K., & Das, N. (2019). Role of catalase in oxidative stress- and age-associated degenerative diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 9613090. <https://doi.org/10.1155/2019/9613090>
- Tsamesidis, I., Pério, P., Pantaleo, A., & Reybier, K. (2020). Oxidation of erythrocytes enhance the production of reactive species in the presence of artemisinins. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(13), 4799. <https://doi.org/10.3390/ijms21134799>
- Wang, Y., Branicky, R., Noë, A., & Hekimi, S. (2018). Superoxide dismutases: Dual roles in controlling ROS damage and regulating ROS signaling. *Journal of Cell Biology*, 217(6), 1915–1928. <https://doi.org/10.1083/jcb.201708007>
- Yamacita-Borin, F. Y., Zarpelon, A. C., Pinho-Ribeiro, F. A., Fattori, V., Alves-Filho, J. C., Cunha, F. Q., Cunha, T. M., Casagrande, R., & Verri, W. A. (2015). Superoxide anion-induced pain and inflammation depends on TNF α /TNFR1 signaling in mice. *Neuroscience Letters*, 605, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2015.08.015>

References

- Ansari, M. Y., Ahmad, N., & Haqqi, T. M. (2020). Oxidative stress and inflammation in osteoarthritis pathogenesis: Role of polyphenols. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 129, 110452. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110452>
- Bolduc, J. A., Collins, J. A., & Loeser, R. F. (2019). Reactive oxygen species, aging and articular cartilage homeostasis. *Free Radical Biology and Medicine*, 132, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.08.038>

- Chaudhary, P., Janmeda, P., Docea, A. O., Yeskalyeva, B., Abdull Razis, A. F., Modu, B., Calina, D., & Sharifi-Rad, J. (2023). Oxidative stress, free radicals and antioxidants: Potential crosstalk in the pathophysiology of human diseases. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1158198. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1158198>
- Demasi, M., Augusto, O., Bechara, E. J. H., Bicev, R. N., Cerqueira, F. M., da Cunha, F. M., Denicola, A., Gomes, F., Miyamoto, S., Netto, L. E. S., Randall, L. M., Stevani, C. V., & Thomson, L. (2021). Oxidative modification of proteins: From damage to catalysis, signaling, and beyond. *Antioxidants & Redox Signaling*, 35(12), 1016–1080. <https://doi.org/10.1089/ars.2020.8176>
- Demirci-Çekiç, S., Özkan, G., Avan, A. N., Uzunboy, S., Çapanoğlu, E., & Apak, R. (2022). Biomarkers of Oxidative Stress and Antioxidant Defense. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 209, 114477. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114477>
- Denysiuk, M., Dubrov, S., Chernyaev, S., Sereda, S., & Zaikin, Yu. (2022). Structure of traumatic injuries and experience in treating the wounded as a result of hostilities in the first days of the Russian attack on Ukraine. *PAIN, ANAESTHESIA & INTENSIVE CARE*, 1(98), 7–12 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.25284/2519-2078.1\(98\).2022.256092](https://doi.org/10.25284/2519-2078.1(98).2022.256092)
- Durak, I., Yurtarlan, Z., Canbolat, O., & Akyol, O. (1993). A methodological approach to superoxide dismutase (SOD) activity assay based on inhibition of nitroblue tetrazolium (NBT) reduction. *Clinica Chimica Acta*, 214(1), 103–104. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(93\)90307-p](https://doi.org/10.1016/0009-8981(93)90307-p)
- Ellman, G. L. (1959). Tissue sulfhydryl groups. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 82(1), 70–77. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(59\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0003-9861(59)90090-6)
- Fujii, J., Homma, T., & Osaki, T. (2022). Superoxide Radicals in the Execution of Cell Death. *Antioxidants*, 11(3), 501. <https://doi.org/10.3390/antiox11030501>
- Gasmi, A., Nasreen, A., Lenchuk, L., Lysiuk, R., Peana, M., Shapovalova, N., Piscopo, S., Komisarenko, M., Shanaida, M., Smetanina, K., Antonyak, H., Fira, L., Lykhatskyi, P., Fira, D., & Bjørklund, G. (2024). An update on glutathione's biosynthesis, metabolism, functions, and medicinal purposes. *Current Medicinal Chemistry*, 31(29), 4579–4601. <https://doi.org/10.2174/0109298673251025230919105818>
- Golovko, V. (2023). *Invasion. 2022. Large-scale aggression of Russia against Ukraine* (V. Smoliy, Ed.). Institute of History of Ukraine, NAS of Ukraine. ISBN 978-617-14-0194-5 [in Ukrainian].
- Goth, L. (1991). A simple method for determination of serum catalase activity and revision of reference range. *Clinica Chimica Acta*, 196(2–3), 143–151. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(91\)90067-m](https://doi.org/10.1016/0009-8981(91)90067-m)
- Gurieva, S. O., Tanasienko, P. V., & Derkach, R. V. (2024). Musculoskeletal trauma in civilian casualties as a result of hostilities. *Emergency Medicine*, 20(6), 464–469 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.20.6.2024.1757>
- Heathcote, K. C., Keeley, T. P., Myllykoski, M., Lundekvam, M., McTiernan, N., Akter, S., Masson, N., Ratcliffe, P. J., Arnesen, T., & Flashman, E. (2024). N-terminal cysteine acetylation and oxidation patterns may define protein stability. *Nature Communications*, 15(1), 5360. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49489-2>
- Heppner, D. E. (2021). Structural insights into redox-active cysteine residues of the Src family kinases. *Redox Biology*, 41, 101934. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2021.101934>
- Hiryk, S., & Kyrydon, A. (2024). *Chronicle: Two years of full-scale war (February 24, 2022 – February 23, 2024)*. State Scientific Institution "Encyclopedic Publishing" [in Ukrainian].
- Huriev, S., Tanasienko, P., & Derkach, R. (2024). Musculoskeletal trauma in civilian casualties as a result of hostilities. *Emergency Medicine*, 20(6), 464–469 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.20.6.2024.1757>
- Jaganjac, M., Milkovic, L., Zarkovic, N., & Zarkovic, K. (2022). Oxidative stress and regeneration. *Free Radical Biology and Medicine*, 181, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.02.004>
- Kehm, R., Baldensperger, T., Raupbach, J., & Höhn, A. (2021). Protein oxidation – Formation mechanisms, detection and relevance as biomarkers in human diseases. *Redox Biology*, 42, 101901. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2021.101901>
- Lennicke, C., & Cochemé, H. M. (2021). Redox metabolism: ROS as specific molecular regulators of cell signaling and function. *Molecular Cell*, 81(18), 3691–3707. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2021.08.018>
- Liu, G., Liu, Q., Yan, B., Zhu, Z., & Xu, Y. (2021). USP7 inhibition alleviates H2O2-induced injury in chondrocytes via inhibiting NOX4/NLRP3 pathway. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 617270. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.617270>
- Liu, L., Luo, P., Yang, M., Wang, J., Hou, W., & Xu, P. (2022). The role of oxidative stress in the development of knee osteoarthritis: A comprehensive research review. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 9, 1001212. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2022.1001212>
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265–275. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52451-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52451-6)
- Nandi, A., Yan, L. J., Jana, C. K., & Das, N. (2019). Role of Catalase in Oxidative Stress- and Age-Associated Degenerative Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 9613090. <https://doi.org/10.1155/2019/9613090>
- Rogovsky, V., Gumenyuk, K., & Savolyuk, S. (2022). Clinical experience in managing patients with gunshot wounds in modern combat conditions. *Surgery. Orthopedics. Traumatology. Intensive care*, 4(51), 12–13 [in Ukrainian]. <https://health-ua.com/multimedia/7/1/0/8/3/1670680677.pdf>
- Tsamesidis, I., Pério, P., Pantaleo, A., & Reybier, K. (2020). Oxidation of Erythrocytes Enhance the Production of Reactive Species in the Presence of Artemisinins. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(13), 4799. <https://doi.org/10.3390/ijms21134799>
- Wang, Y., Branicky, R., Noë, A., & Hekimi, S. (2018). Superoxide dismutases: Dual roles in controlling ROS damage and regulating ROS signaling. *Journal of Cell Biology*, 217(6), 1915–1928. <https://doi.org/10.1083/jcb.201708007>
- Yamacita-Borin, F. Y., Zarpelon, A. C., Pinho-Ribeiro, F. A., Fattori, V., Alves-Filho, J. C., Cunha, F. Q., Cunha, T. M., Casagrande, R., & Verri, W. A. (2015). Superoxide anion-induced pain and inflammation depends on TNF α /TNFR1 signaling in mice. *Neuroscience Letters*, 605, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2015.08.015>

Отримано редакцією журналу / Received: 15.06.25
 Прорецензовано / Revised: 12.07.25
 Схвалено до друку / Accepted: 28.08.25

Kateryna DVORSHCHENKO, DSc (Biol.)
 ORCID ID: 0000-0003-3118-9355
 e-mail: kateryna.dvorshchenko@knu.ua
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Yurij TUHAROV, PhD Student
 ORCID ID: 0000-0002-1583-6279
 e-mail: tugarovdoc@gmail.com
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

INDICATORS OF THE ANTIOXIDANT DEFENSE SYSTEM IN THE BLOOD PLASMA OF COMBATANTS AFTER COMBAT-RELATED MUSCULOSKELETAL TRAUMA

Background. The full-scale war in Ukraine, which began in 2022, has exposed many servicemen to the adverse effects of various combat factors. The use of high-tech means and innovative combat technologies leads to a high incidence of combat-related musculoskeletal injuries among combatants. Therefore, studying wound healing dynamics and effective treatment strategies has become particularly relevant. Patient recovery speed and the prevention of local and systemic complications associated with such injuries depend on these factors. Tissue damage and

subsequent inflammation are linked to a disruption in the body's oxidative-antioxidant balance. This leads to the development of oxidative stress and damage to biological molecules. Antioxidant enzymes play a crucial role in protecting against free radicals.

Therefore, this study aimed to determine the activity of antioxidant enzymes (superoxide dismutase, catalase) and the content of sulfhydryl groups in the blood plasma of servicemen with combat-related musculoskeletal trauma.

M e t h o d s . *All study participants were divided into two experimental groups with comparable mean ages. The first group (n=12) consisted of healthy controls. The second group (n=15) included patients with gunshot joint injuries. Superoxide dismutase and catalase activities, as well as sulfhydryl group content, were determined in the patients' blood plasma using standard biochemical methods. Study results were processed using established methods of variational statistics.*

R e s u l t s . *Our experimental studies demonstrated a decrease in the activity of antioxidant enzymes in the blood plasma: superoxide dismutase activity was reduced by a factor of 1.7, and catalase activity by a factor of 1.5, compared to the healthy control group. It was also established that the content of sulfhydryl groups in the blood plasma of patients with combat-related joint trauma decreased: non-protein SH-groups by a factor of 1.8, and protein and total SH-groups by a factor of 1.5, relative to the healthy control group.*

C o n c l u s i o n s . *These findings indicate a reduction in the reserve protective mechanisms within the bodies of patients with combat-related musculoskeletal trauma.*

K e y w o r d s : *combat trauma, musculoskeletal system, blood plasma, antioxidant system.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.