

УДК 577.151.6:582.573.16

## Марія БОБРОВА

кандидат біологічних наук, доцент кафедри природничих наук і методик їхнього навчання, Центральнотуркранський державний університет імені Володимира Винниченка, вул. Шевченка, 1, м. Кропивницький, Україна, 25000 (kazna4eeva@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7703-651X

## Олена ГОЛОДАЄВА

кандидат хімічних наук, доцент кафедри фундаментальних та медико-профілактичних дисциплін, Міжнародний європейський університет, просп. Академіка Глушкова, 42В, м. Київ, Україна, 03187 (elena.gologaeva@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-4922-7033

## Сергій МОВЧАН

завідувач фельдшерсько-акушерського відділення, Кіровоградський медичний фаховий коледж імені С.Й. Мухіна, бульв. Студентський, 16, м. Кропивницький, Україна, 25015 (serg.movchan015@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-3037-1147

## Ярослава ТУР

асистент кафедри мікробіології, вірусології, імунології та медичної біології, Донецький національний медичний університет, вул. Юрія Коваленка, 4А, м. Кропивницький, Україна, 25000 (tur\_yaroslava@ukr.net)

ORCID: 0000-0003-1082-7231

DOI 10.32782/2522-9680-2023-3-132

**Бібліографічний опис статті:** Боброва М., Голодаєва О., Мовчан С., Тур Я. (2023). Вплив тривалості зберігання на стан прооксидантно-антиоксидантної системи тканин насіння *Fagopyrum esculentum* L. *Фітотерапія. Часопис*, 3, 132–137, doi: 10.32782/2522-9680-2023-3-132

## ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ЗБЕРІГАННЯ НА СТАН ПРООКСИДАНТНО-АНТИОКСИДАНТНОЇ СИСТЕМИ ТКАНИН НАСІННЯ *FAGOPYRUM ESCULENTUM* L.

**Актуальність.** Уміст антиоксидантів у продуктах харчування значно залежить від умов та терміну їх зберігання. Зменшення вмісту антиоксидантів в організмі призводить до зростання кількості прооксидантів, представлених активними формами Оксигену, іншими вільними радикалами та продуктами їх перетворення. Збільшення вмісту вільних радикалів призводить до руйнування біологічно активних речовин, синтезованих нашим організмом та отриманих із продуктів харчування, що спричинює зниження харчової цінності продуктів, їх метаболічної здатності, а отже, їх користі.

**Мета дослідження** – виявити закономірності зміни прооксидантно-антиоксидантного балансу в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum* L. залежно від термінів зберігання рослинної продукції.

**Матеріал і методи.** Вимірювали базовий рівень генерації супероксиду, уміст ТБК-активних продуктів, зміну активності супероксиддисмутази, каталази, цитохромоксидази, концентрацію аскорбінової кислоти та глутатіону в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum* L. Біохімічні показники фіксували щомісяця протягом одного року.

**Результати дослідження.** Середній показник зниження активності каталази в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum* L. зі збільшенням терміну зберігання до 12 місяців у середньому становить 68%, для СОД – 46%, для цитохромоксидази – 84% від початкового рівня. Зменшення концентрації АК у кінці експозиції становить 58%, GSH – 71%. Зростання вмісту супероксиданіонрадикалу становить 38%, ТБК-активних продуктів – 14%.

**Висновок.** Зі збільшенням терміну зберігання насіння активність ферментних антиоксидантів падає, зменшується вміст низькомолекулярних антиоксидантів, зростає рівень генерації активних форм Оксигену та рівень вільнорадикально пошкодження біомолекул. Стрибок зниження антиоксидантної активності та зростання прооксидантної активності припадає на 9–10-й місяці зберігання. Відсоток зростання рівня вільнорадикального перекисного окиснення та зменшення антиоксидантного захисту зі збільшенням терміну зберігання тканин залежить від величини стартового рівня показників стану прооксидантно-антиоксидантної системи.

**Ключові слова:** прооксиданти, антиоксиданти, супероксиданіонрадикал, глутатіон, аскорбінова кислота, каталаза, супероксиддисмутаза, цитохромоксидаза.

**Maria BOBROVA**

Ph.D in Biology, Associate Professor at the Department of Natural Sciences and their Teaching Methods, Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Shevchenko str., 1, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25000 (kazna4eeva@gmail.com)

**ORCID:** 0000-0001-7703-651X

**Olena HOLODAIEVA**

PhD in Chemistry, Associate Professor at the Department of Fundamental and Medical Preventive Disciplines, International European University, Academician Glushkov ave., 42V, Kyiv, Ukraine, 03187 (elena.gologaeva@gmail.com)

**ORCID:** 0000-0002-4922-7033

**Serhii MOVCHAN**

Head of the Paramedics and Obstetrics Department, Kirovohrad Mukhin Medical Professional College, Studentskyi blvd, 16, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25015 (serg.movchan015@gmail.com)

**ORCID:** 0000-0003-3037-1147

**Yaroslava TUR**

Assistant at the Department of Microbiology, Virology, Immunology and Medical Biology, Donetsk National Medical University, Yuriy Kovalenko str., 4A, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25000 (tur\_yaroslava@ukr.net)

**ORCID:** 0000-0003-1082-7231

**DOI** 10.32782/2522-9680-2023-3-132

**To cite this article:** Bobrova M., Holodaieva O., Movchan S., Tur Ya. (2023). Vplyv tryvalosti zberihannia na stan prooksydantno-antyoksydantnoi systemy tkanyn nasinnia *Fagopyrum esculentum* L. [Influence of storage duration on the state of the prooxidant-antioxidant system of seed tissues of *Fagopyrum esculentum* L.]. *Fitoterapiia. Chasopys – Phytotherapy. Journal*, 3, 132–137, doi: 10.32782/2522-9680-2023-3-132

## INFLUENCE OF STORAGE DURATION ON THE STATE OF THE PROOXIDANT-ANTIOXIDANT SYSTEM OF SEED TISSUES OF *FAGOPYRUM ESCULENTUM* L.

**Relevance of the research.** The content of antioxidants in food products depends significantly on the conditions and period of their storage. A decrease in the content of antioxidants in the body leads to an increase in the number of pro-oxidants represented by active forms of oxygen, other free radicals and their transformation products. An increase in the content of free radicals leads to the destruction of biologically active substances synthesized by our body and obtained from food products, which causes a decrease in the nutritional value of products, their metabolic capacity, and therefore their usefulness.

**Aim of the research:** to identify patterns of changes in the prooxidant-antioxidant balance in the tissues of *Fagopyrum esculentum* L. seeds, depending on the terms of storage of plant products.

**Research materials and methods.** The basic level of superoxide generation, the content of TBA-active products, changes in the activity of superoxide dismutase, catalase, cytochrome oxidase, the concentration of ascorbic acid and glutathione in the tissues of *Fagopyrum esculentum* L. seeds were measured. Biochemical indicators were recorded monthly for 1 year.

**Research results.** The average decrease in catalase activity in the tissues of *Fagopyrum esculentum* L. seeds, with an increase in the storage period up to 12 months, is on average 68%, for SOD - 46%, for cytochrome oxidase - 84% from the initial level. The decrease in the concentration of ascorbic acid at the end of exposure is 58%, GSH - 71%. The increase in the content of the superoxide anion radical is 38%, TBA-active products are 14%.

**Conclusion.** As the seed storage period increases, the activity of enzyme antioxidants decreases, the content of low molecular weight antioxidants decreases, the level of generation of active forms of oxygen and the level of free radical damage to biomolecules increases. A jump in the decrease in antioxidant activity and increase in pro-oxidant activity occurs at 9-10 months of storage. The percentage of increase in the level of free radical peroxidation and decrease in antioxidant protection with increasing tissue storage time depends on the value of the starting level of indicators of the state of the pro-oxidant-antioxidant system.

**Key words:** prooxidants, antioxidants, superoxide anion radical, glutathione, ascorbic acid, catalase, superoxide dismutase, cytochrome oxidase.

**Вступ. Актуальність.** Антиоксиданти (АО) є біологічно активними природними протекторами нашого організму, які сприяють адаптації до стресових умов та змінних умов існування, супроводжують

нормальні процеси росту і розвитку, гальмують процеси старіння, сприяють регенерації та відновленню після перенесених хвороб та розладів, допомагають вийти з продромального періоду у стан гомеостазу,

є природними антимутаційними агентами (Marrocco et al., 2017; Kohen and Nyska, 2002; Halliwell, 2006). Наш організм синтезує власні АО та поповнює їх резерви з продуктів рослинного та тваринного походження, причому вміст АО навіть у найбільш корисних продуктах харчування значно залежить від умов та терміну їх зберігання (Xu et al., 2017; Song et al., 2010; Shao et al., 2008). Зменшення вмісту АО в організмі призводить до зростання кількості прооксидантів (ПО), представлених активними формами Оксигену (АФО), іншими вільними радикалами та продуктами їх перетворення (Pacheco et al., 2018, Brykulska and Deforz, 2023). АФО спричинюють утворення вільних радикалів, які запускають ланцюгові реакції пошкодження білків, створення міжланцюгових зшивок ДНК, що робить її нездатною до транскрипції і реплікації, та, своєю чергою, унеможлиблює нормальний поділ клітин, а також біосинтез білка (Van Breusegem and Dat, 2006). Порушення цілісності мембран органел клітини та плазмалемі є першим цитологічним проявом більшості хвороб. Вільні радикади зумовлюють перекисне окиснення ліпідів мембран, створення міжмолекулярних зшивок фрагментів жирних кислот, що змінює баланс в'язкості та текучості мембрани та порушує її транспортні властивості. Збільшення вмісту вільних радикалів призводить до руйнування біологічно активних речовин, синтезованих нашим організмом та отриманих із продуктів харчування, що спричинює зниження харчової цінності продуктів, їх метаболічної здатності, а отже, їх користі (Rampon et al., 2018; Rhoads et al., 2006; Janků et al., 2019; Mittler, 2017). Для дієтологів, прихильників здорового способу життя та правильного харчування слід обов'язково враховувати термін зберігання рослинної продукції під час планування харчового раціону. Так, наприклад, у наших попередніх дослідженнях доведено, що замочування насіння призводить до ініціації процесів проростання та зростання рівня АО, але ж рослинна продукція, що піддавалася тривалому зберіганню, може містити зовсім низький базовий рівень АО або не містити їх узагалі, що знецінює користь цілінозернових продуктів та так званих «живих круп», під час приготування яких рекомендовано попереднє замочування та мінімальна термічна обробка з метою збереження максимальної кількості біологічно активних речовин у їжі. Усе окреслене вище посилює актуальність теми дослідження та її вагоме практичне значення для широкого кола читачів і споживачів.

**Мета дослідження** – виявити закономірності зміни прооксидантно-антиоксидантного балансу в тка-

нинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* залежно від термінів зберігання рослинної продукції.

Для реалізації поставленої мети нами було виокремлено такі **завдання**:

1) дослідити зміну вмісту ферментних АО в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* залежно від терміну зберігання;

2) виявити зміну вмісту низькомолекулярних АО в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* залежно від терміну зберігання;

3) експериментально підтвердити зміну вмісту ПО в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* залежно від терміну зберігання;

4) установити зміну вмісту продуктів вільнорадикального перекисного окиснення (ВРПО) мембран у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* залежно від терміну зберігання;

5) дослідити зміну активності маркерів ВРПО мембран у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* залежно від терміну зберігання;

6) прослідкувати зміну балансу ланок прооксидантно-антиоксидантної системи (ПАС) у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* залежно від терміну зберігання рослинної продукції.

Дослідженням значення ПО та АО займалася низка передових учених (Pacheco et al., 2018; Janků et al., 2019; Mittler, 2017). Однією з топових наймасштабніших біохімічних шкіл, що регулярно працює у цьому напрямі, є школа Ніколаса Смірнова (Smirnoff, 2005, 2019). Численні напрацювання з біохімії ПАС в Україні мають О.П. Дмитрієв, З.М. Кравчук, Ю.Т. Дьяков, Ю.Є. Колупаєв, Ю.В. Карпец, В.А. Костюк, М.Н. Мерзляк, О.І. Цебржинський, (Dmytriyev and Kravchuk, 2005; Kolupaev and Karpets, 2010–2019). Більшість учених сходиться на думці, що основними ферментними АО є супероксиддисмутаза (СОД) (Berwal and Ram, 2018) та каталаза, низькомолекулярними – аскорбінова кислота (АК) та глутатіон (GSH). АО властивості СОД описано в працях А. Baiano, М.А. del Nobile, М.К. Berwal та С. Ram (Baiano and Nobile, 2015; Berwal and Ram, 2018), каталази – у роботах А. Nandi, Y. Liang-Jun, С.К. Jana та N. Dascorresponding (Nandi et al., 2019). Протекторну роль АК дослідили С. Paciolla, S. Fortunato, N. Dipierro, А. Paradiso, S. De Leonardis (Paciolla S. et al., 2019). М. Hasanuzzaman, К. Nahar, Т.І. Анее, М. Fujita експериментально підтвердили роль GSH як АО (Hasanuzzaman et al., 2017, 2019). На думку V. Gautam, R. Kaur, S.K. Kohli, V. Verma, P. Kaur, R. Singh, P. Saini, S. Arora, А.К. Thukral, Yu.V. Karpets, Yu.E. Kolupaev, R. Bhardwaj, першим ПО, який виникає у рослинній клітині як побічний продукт фо-

тосинтезу, є синглетний кисень, що перетворюється на супероксиданіонрадикал ( $\bullet\text{O}_2^-$ ) (Gautam et al., 2017). Мішенню  $\bullet\text{O}_2^-$  є клітинні мембрани, результатом ВРПО яких є утворення малонового діальдегіду (МДА) та інших ТБК-активних продуктів (Morales and Munné-Bosch, 2019). Маркером пошкодження мембран є зміна активності цитохромоксидази, значення якої розкрито в працях Wikström (Wikström et al., 2018). Баланс між утворенням та ПО та протекторною дією АО становить ПАС, яка на молекулярному рівні реагує на вплив будь-яких факторів на гомеостаз організму (Gill and Tuteja, 2010).

**Матеріали та методи дослідження.** Об'єктом експериментальних досліджень стали тканини насіння *Fagopyrum esculentum L.* Дослідний матеріал не піддавали дії попередньої термічної обробки та замочування. Гомогенізацію тканин здійснювали механічним шляхом. Для кількісного визначення зміни значення показників стану ПАС використовували загальноприйняті класичні методики, детально описані в наших попередніх роботах (Bobrova, et al., 2020–2022). Так, базовий рівень генерації  $\bullet\text{O}_2^-$  визначали за допомогою спектрофотометричного тесту відновлення нітросинього тетразолію (НСТ-тесту), для визначення вмісту ТБК-активних продуктів використовували прооксидантний ферум-аскорбінатний буфер та фотометрію. Для оцінки зміни активності СОД визначали відсоток гальмування окислення  $\bullet\text{O}_2^-$  адреналіну в адренохром, каталазу визначали титруванням розчином калій перманганату. Титриметрією за Тільмансом визначали вміст

АК, концентрацію GSH – за методом Елмана. Активність цитохромоксидази визначали спектрофотометрично. Біохімічні показники вимірювали щомісяця протягом одного року. Повторність вимірів кожного показника стану ПАС десятикратна.

Результати дослідження та їх обговорення. Для зручності обрахунку та більшого унаочнення цифрових даних наводимо експериментально встановлений нами базовий рівень ПО та АО в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* (табл. 1). Усі подальші зміни значення показників обраховувалися у відсотках від базового рівня, що дало нам змогу представити їх разом на комплексній діаграмі (рис. 1).

Таблиця 1  
Базовий рівень значення показників стану ПАС у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.*

Показник стану ПАС	Значення
Показники прооксидантної активності	
НСТ тест (фоновий рівень), нмоль $\bullet\text{O}_2^-$ /г $\cdot$ с	0,287 $\pm$ 0,019
$\Delta$ ТВАар, %	99,22 $\pm$ 4,11
Рівень ВРПО-пошкодження	
Активність цитохромоксидази, ОД	0,183 $\pm$ 0,005
Ферментні антиоксиданти	
Активність каталази $\frac{\text{мкмоль}}{\text{кг} \cdot \text{хв}}$	0,31 $\pm$ 0,02
Активність СОД, ОД	0,28 $\pm$ 0,02
Низькомолекулярні антиоксиданти	
Концентрація АК, $\frac{\text{мкмоль}}{\text{кг} \cdot \text{хв}}$	0,141 $\pm$ 0,02
Концентрація GSH, $\frac{\text{мкмоль}}{\text{кг} \cdot \text{хв}}$	43,22 $\pm$ 0,96

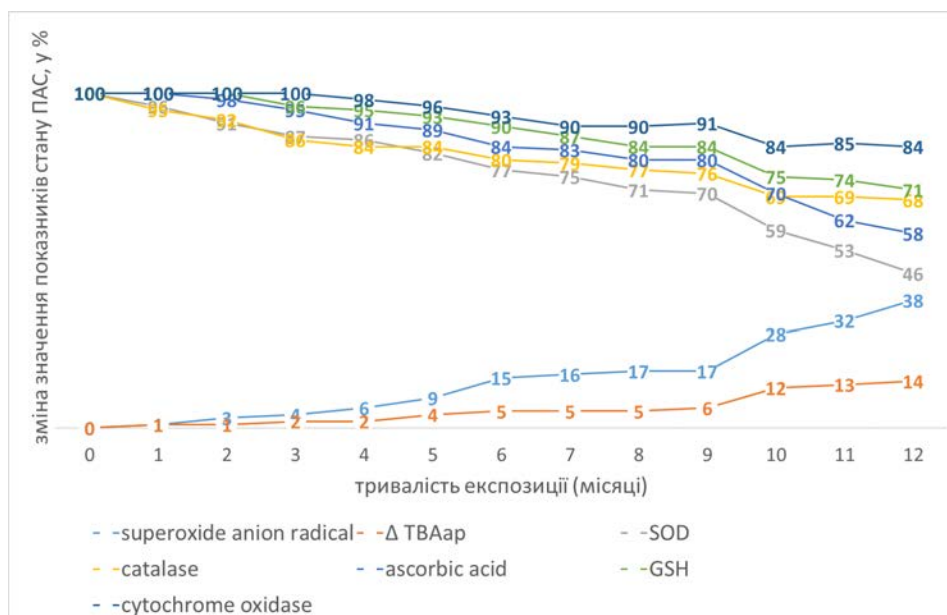


Рис. 1. Вплив терміну зберігання на зміну значення показників стану ПАС у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.*

Аналізуючи одержані результати, можна стверджувати, що зі збільшенням терміну зберігання до 12 місяців у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* зростає концентрація супероксиданіонрадикалу. Середній показник у кінці експозиції становив 38%, середня швидкість зростання – 3,2% на місяць. Однак швидкість зростання вмісту ТБК-активних продуктів майже втричі повільніша (1,2%), що загалом призвело до різниці лише на 14% від початкового рівня. Таку різницю значень показників ПО-ланки можна пояснити цінним біохімічним складом насіння гречки з високим умістом аргініну, лізину, цистину, гістидину, фосфорної кислоти, калію, магнію та феруму, що сприяє синтезу як ферментних, так і низькомолекулярних АО.

Середній показник зниження активності каталази становить 68%, СОД – 46% від початкового рівня. Середня щомісячна швидкість зменшення активності СОД (4,5%) більша, ніж каталази (2,7%), що може свідчити про компенсаторну протекторну роль інших пероксидаз.

Зі збільшенням терміну зберігання концентрація низькомолекулярних антиоксидантів у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* зменшується. Середній показник у кінці експозиції для АК становить 58%, для GSH – 71% від початкового рівня. Середня щомісячна швидкість спадання становила 3,5% для АК та 2,4% для GSH, що підкреслює першочергове значення глутатіону в метаболічних та протекторних процесах.

Порівнюючи ферментну і низькомолекулярну ланки АО-захисту, звертає увагу переважання останньої, що, можливо, пояснюється значним різноманіттям та кількісним умістом мікроелементів у складі тканин насіння *Fagopyrum esculentum L.*

Активність цитохромоксидази в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* за час експерименту зменшилася у середньому до 84% від початкового рівня (середня швидкість спадання активності 1,3% на місяць), що свідчить про низький вплив ПО-ланки на макромолекули та мембрани клітини і пояснюється потужністю АО-ланки та високим умістом феруму, який необхідний для синтезу і функціонування цитохромів.

Слід також зазначити, що базовий рівень показників ПО-ланки в тканинах насіння *Fagopyrum*

*esculentum L.* є досить низьким, а АО-ланка – потужною порівняно з іншими досліджуваними нами культурами, описаними в попередніх роботах (Bobrova, et al., 2020–2022).

Аналізуючи графік зміни значення показників стану ПАС, наведений на рис. 1, можна стверджувати, що стрибок зростання ПО-активності та відповідного зниження АО-активності припадає на 9–10-й місяці зберігання, що свідчить про підвищену чутливість насіння до зміни екологічних факторів та дії стресових чинників. Це треба обов'язково враховувати для забезпечення оптимального терміну посадки насіння та догляду за ним.

**Висновки.** Зі збільшенням терміну зберігання активність ферментних антиоксидантів у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* падає. Середній показник в кінці експозиції для каталази становить 68%, для СОД – 46% від початкового рівня.

Зі збільшенням терміну зберігання концентрація низькомолекулярних антиоксидантів у тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* зменшується. Середній показник у кінці експозиції для АК становить 58%, для GSH – 71% від початкового рівня.

Зростання вмісту супероксиданіонрадикалу в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* зі збільшенням терміну зберігання до 12 місяців у середньому становить 38%.

Концентрація ТБК-активних продуктів у тканинах насіння дослідних рослин за 12 місяців зберігання зросла у середньому на 14%.

Активність цитохромоксидази в тканинах насіння *Fagopyrum esculentum L.* за час експерименту зменшилася у середньому до 84%.

Відсоток зростання рівня ВРПО та зменшення АО-захисту зі збільшенням терміну зберігання тканин залежить від величини стартового рівня показників стану ПАС.

Характерним для тканин насіння *Fagopyrum esculentum L.* є стрибок зростання ПО-активності та відповідного зниження АО-активності, який припадає на 9–10-й місяці зберігання, що свідчить про підвищену чутливість насіння до зміни екологічних факторів та дії стресових чинників, що слід враховувати для забезпечення оптимального терміну посадки насіння та догляду за ним.

## ЛІТЕРАТУРА

- Baiano A., del Nobile M.A. (2015) Antioxidant compounds from vegetable matrices: Biosynthesis, occurrence, and extraction systems. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*; 56:2053–2068. DOI: 10.1080/10408398.2013.812059.
- Berwal M.K., Ram C. (2018) Superoxide Dismutase: A stable biochemical marker for abiotic stress tolerance in higher plants. Open access peer-reviewed chapter. DOI: 10.5772/intechopen.82079.
- Bobrova, M., Holodaieva O., Koval S., Kucher O., Tsviakh O. 2021. The effect of hypothermia on the state of the prooxidant-antioxidant system of plants. *Revista de la Universidad del Zulia*. 2021. № 33. P. 82–101. DOI: <https://doi.org/10.46925/rdluz.33.07>.

- Bobrova, M., Holodaieva, O., Arkushyna, H., Larycheva, O. y Tsviakh, O. The value of the prooxidant-antioxidant system in ensuring the immunity of plants. *Revista de la Universidad del Zulia*. 11, 30 (jul. 2020), 237–266. DOI: <https://doi.org/10.46925/rdluz.30.17>.
- Bobrova M., Holodaieva O., Koval S., Kucher O., Tsviakh O. (2022) Features of changes in prooxidant- antioxidant balance of tissues during activation of seed germination/ *Journal of the University of Zulia*, 13(37), 362–382. <https://doi.org/10.46925/rdluz.37.23>
- Brykulska M.V., Deforzh H.V. (2023). Threats of Radioactive Radiation: Features Of Impact On The Environment And Human Health. *Public Health Journal. The National University of Ostroh Academy. Odesa: «Helvetica» Publishing House. Output 3. P. 4–13. URL: <https://journals.ostroh-academy.rv.ua/index.php/publichealth/issue/view/4>*
- Dmytriiev O.P., Kravchuk Z.M. (2005) Aktivnyi formy kysnyu ta imunitet roslyn [Active forms of oxygen and immunity of plants]. *Tsytolohyya y henetyka*, 39(4), 64–75. (in Ukrainian). <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/126766>
- Gautam V., Kaur R., Kohli S.K., Verma V., Kaur P., Singh R., Saini P., Arora S., Thukral A.K., Karpets Yu.V., Kolupaev Yu.E., Bhardwaj R. (2017) ROS compartmentalization in plant cells under abiotic stress condition // *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation under Abiotic Stress* / Eds. Khan M.I.R., Khan N.A. Springer, Singapore, 2017. P. 89–114.
- Gill, S.S., Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 48, 909–930. <https://dx.doi.org/10.3390%2Fantiox9080681>
- Hasanuzzaman M., Nahar K., Anee T.I., Fujita M. (2017) Glutathione in plants: Biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance. *PMBP*. 23:249–268. DOI: 10.1007/s12298-017-0422-2.
- Hasanuzzaman M.M.H.M., Borhannuddin B.T.I.A., Khursheda P., Kamrun N., Jubayer A.M., Masayuki F. (2019) Regulation of Ascorbate-Glutathione Pathway in Mitigating Oxidative Damage in Plants Under Abiotic Stress. *Antioxidants (Basel) Sep; 8(9): 384.* <https://doi.org/10.3390/antiox8090384>
- Janků M., Luhová L., Petřivalský M. (2019). On the Origin and Fate of Reactive Oxygen Species in Plant Cell Compartments. *Antioxidants (Basel)*. 8(4): 105. DOI: 10.3390/antiox8040105.
- Kohen R., Nyska A. (2002) Oxidation of biological systems: oxidative stress phenomena, antioxidants, redox reactions, and methods for their quantification. *Toxicol Pathol.* 30:620–50. DOI: 10.1080/01926230290166724.
- Kolupaev Yu.Ye., Karpets Yu.V. (2014) Aktivnyye formy kisloroda i stressovyy signaling u rasteniy [Reactive oxygen species and stress signaling in plants]. *Ukrainian biochemical journal*. Vol. 86(4). P. 18–35. (in Russian). [http://nbuv.gov.ua/UJRN/BioChem\\_2014\\_86\\_4\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/BioChem_2014_86_4_4)
- Kolupaev Yu.Ye., Karpets Yu.V. (2010) .Formation of plants adaptive reactions to abiotic stressors influence. Kyiv: Osnova, 352 p. (In Russian). <http://dspace.knau.kharkov.ua/jspui/bitstream/123456789/675/1/Kolupaev.Karpets.Monography.pdf>
- Kolupaev Yu.E., Karpets Yu.V. (2019) Reactive oxygen species, antioxidants, and plants resistance to influence of stressors. Kyiv: Logos. 277 p. [http://dspace.knau.kharkov.ua/jspui/bitstream/123456789/1802/1/Kolupaev\\_Karpets-2019-ROS.pdf](http://dspace.knau.kharkov.ua/jspui/bitstream/123456789/1802/1/Kolupaev_Karpets-2019-ROS.pdf)
- Kolupaev Yu.E., Karpets Yu.V., Kabashnikova L.F. (2019) Antioxidative system of plants: cellular compartmentalization, protective and signaling functions, mechanisms of regulation. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2019. V. 55(5). P. 441–459. <https://doi.org/10.1134/S0003683819050089>
- Marrocco L., Altieri F., Peluso I. (2017) Measurement and Clinical Significance of Biomarkers of Oxidative Stress in Humans. *Oxid Med Cell Longev*. 2017: 6501046. DOI: 10.1155/2017/6501046.
- Mittler, R. (2017) ROS Are Good. *Trends in Plant Science*. Vol. 22. № 1. P. 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Morales M., Munné-Bosch S. (2019). Malondialdehyde: Facts and Artifacts. *Plant physiology*. Letter to the Editor. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.19.00405>.
- Nandi A., Liang-Jun Y., Jana C.K., Dascorresponding N. (2019) Role of Catalase in Oxidative Stress- and Age-Associated Degenerative Diseases. *Oxid Med Cell Longev*. 9613090. DOI: 10.1155/2019/9613090.
- Pacheco J.H.L., Carballo M.A., and Gonsebatt M.E. (2018) Antioxidants against environmental factor-induced oxidative stress in Nutritional Antioxidant Therapies: Treatments and Perspectives, K.H. Al-Gubory, Ed., vol. 8, pp. 189–215, Springer, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67625-8>
- Paciolla C., Fortunato, S., Dipierro, N., Paradiso, A., De Leonardi S. (2019) Vitamin C in Plants: From Functions to Biofortification. *Antioxidants*. 8(11), 519. DOI: [org/10.3390/antiox8110519](https://doi.org/10.3390/antiox8110519)
- Rampon C., Volovitch M., Joliot A., Vriz S. (2018) Hydrogen Peroxide and Redox Regulation of Developments. *Antioxidants*. 7:159. DOI: 10.3390/antiox7110159.
- Rhoads D.M., Umbach A.L., Subbaiah C.C., Siedow J.N. (2006) Mitochondrial reactive oxygen species. Contribution to oxidative stress and interorganellar signaling. *Plant Physiol*. 2006. 141. P. 357–366. DOI: 10.1104/pp.106.079129.
- Smirnov N. (2005) Antioxidants and reactive oxygen species in plants. Blackwell Publishing, NY. 320 p.
- Smirnov N., Arnaud D. (2019) Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. *New Phytol.*;221:1197–1214. doi: 10.1111/nph.15488.
- Song W., Derito C.M., Liu M.K., He X., Dong M., Liu R.H. (2010) Cellular antioxidant activity of common vegetables. *J. Agric. Food Chem*. 58:6621–6629. DOI: 10.1021/jf9035832.
- Van Breusegem F., Dat J. (2006) Reactive oxygen species in plant cell death. *Plant Physiol*. 141:384–90. <https://dx.doi.org/10.1104%2Fpp.106.078295>
- Wikström M., Krab K., Sharma V. (2018). Oxygen activation and energy conservation by cytochrome c oxidase. *Chem. Rev*. 118, 2469–2490. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00664.
- Xu, D.-P., Li, Y., Meng, X., Zhou, T., Zhou, Y., Zheng, J., Zhang, J.-J., Li, H.-B. (2017) Natural Antioxidants in Foods and Medicinal Plants: Extraction, Assessment and Resources. *Int. J. Mol. Sci.* 18, 96. <https://doi.org/10.3390/ijms18010096>

Стаття надійшла до редакції 07.08.2023  
Стаття прийнята до друку 30.11.2023

**Конфлікт інтересів:** відсутній.

**Внесок авторів:**

**Боброва М.С.** – ідея, лабораторні аналізи, висновки, корекція статті;

**Голодасва О.А.** – математична обробка даних, анотації, висновки;

**Мовчан С.В.** – збір та аналіз літератури, дизайн дослідження;

**Тур Я.В.** – збір та аналіз літератури, участь у написанні статті.

**Електронна адреса для листування з авторами:**

[kazna4eeva@gmail.com](mailto:kazna4eeva@gmail.com)