

ЕКОЛОГО-БІОХІМІЧНА СТІЙКІСТЬ НАСІННЕВОГО МАТЕРІАЛУ ЯК ФАКТОР ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ АГРОПРОДУКЦІЇ ТА ПІДТРИМКИ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

Боброва М.С.¹, Дефорж Г.В.¹, Мирза-Сіденко В.М.¹, Найдьонова Г.Г.¹,
Ларичева О.М.², Цвях О.О.³

¹Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка
вул. Шевченка, 1, 25000, м. Кропивницький

²Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, 54000, м. Миколаїв

³Навчально-науковий педагогічний інститут імені В.О.Сухомлинського
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54007, м. Миколаїв

kazna4eeva@gmail.com, deforzhav@gmail.com, vmirzasidenko@gmail.com,
galinkaussn@gmail.com, laricheva72@gmail.com, tsvyakho@gmail.com

У статті представлено результати комплексного дослідження впливу температурного стресу (гіпотермії) на посівну придатність та стан прооксидантно-антиоксидантної системи насіння кукурудзи та гороху. Актуальність роботи зумовлена необхідністю зміцнення продовольчої безпеки та інтенсифікації агровиробництва України шляхом використання високоякісного насінневого матеріалу, здатного адаптуватися до змін клімату. Авторами обґрунтовано, що біохімічне здоров'я насіння є первинною ланкою у формуванні якості агропродукції, що безпосередньо корелює із повноцінним харчуванням та здоров'ям людини. Встановлено, що гіпотермія діє як потужний абіотичний стресор, що ініціює накопичення активних форм кисню та продуктів перекисного окиснення ліпідів, зокрема ТБК-активних продуктів, що призводить до вільнорадикального пошкодження мембран. У роботі вперше проведено міжсортове та міжвидове порівняння адаптивного потенціалу однодольних (кукурудза) та дводольних (горох) культур. Доведено, що стійкі сорти (горох «Саксон», кукурудза «Джоді») характеризуються потужнішим антиоксидантним «буфером», здатним швидко ініціювати синтез ферментів (СОД, каталази) та накопичення низькомолекулярних антиоксидантів (аскорбінової кислоти, глутатіону) у відповідь на охолодження. Натомість малостійкі сорти демонструють повільну реакцію антиоксидантного захисту, що призводить до значного зниження енергії проростання та схожості. Наукова новизна дослідження полягає у верифікації біохімічних параметрів прооксидантно-антиоксидантної системи як інформативних маркерів для раннього прогнозування життєздатності рослин. Методологічне значення роботи визначається обґрунтуванням підходу до оцінки якості насіння, що базується на аналізі активності цитохромоксидази та динаміки оксидативного стресу. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх впровадження в діяльність селекційних центрів та агропідприємств для оптимізації передпосівної підготовки та раціонального вибору холодостійких сортів. Отримані дані поглиблюють розуміння молекулярних механізмів екологічної адаптації рослин та створюють підґрунтя для розробки інноваційних систем моніторингу екологічної безпеки агроценозів. *Ключові слова:* біохімія, екологія, антиоксиданти, прооксиданти, здоров'я людини, гіпотермія, онтогенез, рослини.

Eco-biochemical stability of seed material as a factor in shaping agricultural product quality and supporting human health.
Bobrova M., Deforz H., Myrza-Sidenko V., Naidonova H., Larycheva O., Tsviak O.

The article presents the results of a comprehensive study on the impact of temperature stress (hypothermia) on the sowing quality and the state of the prooxidant-antioxidant system in maize and pea seeds. The relevance of the work is driven by the need to strengthen food security and intensify agricultural production in Ukraine through the use of high-quality seed material capable of adapting to climate change. The authors substantiate that the biochemical health of seeds is the primary link in shaping the quality of agricultural products, which directly correlates with adequate nutrition and human health. It was established that hypothermia acts as a powerful abiotic stressor, initiating the accumulation of reactive oxygen species and lipid peroxidation products, particularly TBA-active products, leading to free radical membrane damage. For the first time, the study conducts an inter-varietal and inter-species comparison of the adaptive potential of monocotyledonous (maize) and dicotyledonous (pea) crops. It is proven that resistant varieties (pea "Saxon", maize "Jody") are characterized by a more robust antioxidant "buffer" capable of rapidly initiating the synthesis of enzymes (SOD, catalase) and the accumulation of low-molecular-weight antioxidants (ascorbic acid, glutathione) in response to cooling. Conversely, low-resistance varieties demonstrate a slow antioxidant defense response, leading to a significant decrease in germination energy and laboratory germination rates. The scientific novelty of the research lies in the verification of biochemical prooxidant-antioxidant system



parameters as informative markers for early prediction of plant viability. The methodological significance of the work is defined by the substantiation of an approach to seed quality assessment based on the analysis of cytochrome oxidase activity and the dynamics of oxidative stress. The practical significance of the results consists in the possibility of their implementation in the activities of breeding centers and agricultural enterprises to optimize pre-sowing seed preparation and ensure the rational selection of cold-resistant varieties. The obtained data deepen the understanding of the molecular mechanisms of ecological adaptation in plants and create a foundation for developing innovative systems for monitoring the environmental safety of agroecosystems. *Key words:* biochemistry, ecology, antioxidants, prooxidants, human health, hypothermia, ontogenesis, plants.

Постановка проблеми. Одним із головних викликів для сільськогосподарського виробництва є вплив несприятливих температурних умов (гіпотермії) на початкових етапах проростання насіння, що призводить до зниження його енергії проростання та загальної схожості. Проблема полягає у необхідності глибшого вивчення прооксидантно-антиоксидантної системи (ПАС) тканин насіння як ключового чинника формування стресостійкості. Існує потреба у встановленні чіткого взаємозв'язку між біохімічними показниками стану ПАС та посівною придатністю для того, щоб використовувати ці дані як інформативні маркери життєздатності. Пошук ефективних методів раннього виявлення слабкого або пошкодженого насінневого матеріалу залишається важливим науково-практичним завданням для підвищення біологічної та технологічної ефективності рослинництва.

Враховуючи наведені фактори, **метою дослідження** стало: встановити взаємозв'язок між біохімічними показниками стану ПАС насіння та його посівною придатністю для підвищення якості оцінювання насінневого матеріалу й прогнозування стійкості рослин до стресових чинників.

Реалізація мети дослідження передбачала необхідність виконання таких **завдань**:

1) визначити посівну придатність насіння та значення показників стану ПАС тканин насіння різних сортів рослин у контрольних умовах;

2) визначити зміни посівної придатності насіння та значення показників стану ПАС тканин насіння різних сортів рослин в умовах впливу гіпотермії;

3) здійснити міжсортове порівняння значень дослідних показників;

4) визначити залежність посівної придатності від біохімічних показників стану ПАС та рівня стійкості сорту

5) встановити біохімічні та фізіологічні особливості насінневого матеріалу, які можуть слугувати інформативними маркерами його життєздатності та стійкості до стресових чинників

Актуальність дослідження зумовлена сучасними викликами, перед якими постає аграрний сектор України, а також значенням країни на світовому ринку продовольства. Україна традиційно займає провідні позиції серед держав-виробників зернових культур та іншої агропродукції. Попри умови повномасштабної війни, вітчизняне сіль-

ське господарство продовжує відігравати ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки та збереженні експортного потенціалу. Це підсилює необхідність інтенсифікації агровиробництва, оптимізації використання посівних площ і стабільного отримання високих врожаїв, що набуває не лише економічного, а й стратегічного значення для країни. Одним із головних факторів успішності землеробства є якісне насіння, адже оцінка його посівної придатності дає можливість своєчасно коригувати агротехнічні підходи, знижувати витрати та підвищувати ефективність виробництва. Поглиблений біохімічний аналіз показників ПАС дозволяє краще зрозуміти молекулярні механізми стійкості рослин до стресових чинників і є важливою передумовою для створення більш адаптованих сортів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження є безпосереднім внеском у розв'язання фундаментального наукового завдання щодо розкриття молекулярних механізмів адаптації рослин до несприятливих чинників довкілля. Авторський доробок пов'язаний із пріоритетними напрямками розвитку біологічних наук, зокрема фізіології та біохімії рослин, через встановлення ролі ПАС як ключового регулятора життєздатності насіння. У практичній площині робота корелює із завданнями державної важливості щодо зміцнення продовольчої безпеки України та підвищення конкурентоспроможності вітчизняного агропродукту на світовому ринку. Розроблені підходи до використання біохімічних параметрів (активності супероксиддисмутази, каталази та вмісту продуктів перекисного окиснення макромолекул) як інформативних маркерів дозволяють прогнозувати стійкість сортів до гіпотермії на ранніх етапах. Це забезпечує наукове підґрунтя для оптимізації передпосівної обробки насіння, раціонального вибору посівного матеріалу для різних кліматичних зон та зниження економічних втрат агропідприємств через вплив несприятливих погодних умов. Таким чином, результати дослідження мають пряме впровадження у діяльність селекційних центрів та сільськогосподарських установ для підвищення технологічної ефективності рослинництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню механізмів адаптації рослин до несприятливих чинників довкілля присвячено значну кіль-

кість сучасних наукових праць [1-4], де особлива увага приділяється ролі активних форм кисню (АФО) та ефективності антиоксидантного захисту [6-9, 11-13]. Дослідниками встановлено, що супероксиддисмутаза (СОД) є стабільним біохімічним маркером толерантності до абіотичного стресу у вищих рослин [6, 7]. Важливе значення у наукових публікаціях останніх років надається вивченню глутатіону та аскорбінової кислоти як ключових компонентів неферментативної ланки, що забезпечують фізіологічну стійкість організму [8, 13]. Також у сучасній літературі детально описано процеси перекисного окиснення ліпідів та накопичення ТБК-активних продуктів як маркерів оксидативного пошкодження мембран під впливом екстремальних температур [10, 14]. Проте, попри наявність ґрунтовних розробок щодо окремих біохімічних показників, питання комплексного взаємозв'язку між динамікою прооксидантно-антиоксидантного балансу та посівною придатністю насіння різних сортів в умовах гіпотермії потребує подальшого поглибленого аналізу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо вивченим залишається питання прямої кореляції між початковим станом ПАС насіння та його фактичною здатністю до проростання після короткочасного впливу низьких температур. Досі бракувало порівняльних даних щодо того, як саме специфіка метаболізму однодольних (кукурудза) та дводольних (горох) культур визначає ефективність їхнього антиоксидантного «буфера» при переході від стану спокою до активного онтогенезу в умовах гіпотермії. Також потребує уточнення роль окремих компонентів ПАС, зокрема активності цитохромоксидази та динаміки низькомолекулярних антиоксидантів, як діагностичних маркерів, що дозволяють заздалегідь прогнозувати рівень вільнорадикального пошкодження мембран у сортів із різним ступенем генетично зумовленої стійкості. Саме на комплексному аналізі цих взаємозв'язків та верифікації біохімічних індикаторів життєздатності зосереджена дана стаття.

Наукова новизна дослідження. Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні комплексного взаємозв'язку між біохімічними параметрами ПАС та показниками посівної придатності насіння в умовах температурного стресу. У роботі вперше продемонстровано можливість використання профілю ПАС, зокрема співвідношення активності СОД та рівня генерації супероксиданіонрадикалу, як інструменту для точного прогнозування адаптаційного потенціалу однодольних і дводольних рослин на ранніх етапах онтогенезу. Виявлено специфічні міжсортіві особливості реагування антиоксидантного «буфера», що дозволяє диференціювати сорти за рівнем їхньої генетично зумовленої холодостій-

кості на основі динаміки низькомолекулярних антиоксидантів та активності цитохромоксидази.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає в обґрунтуванні та верифікації біохімічного підходу до оцінки якості насінневого матеріалу, який базується на аналізі маркерів оксидативного стресу та ферментативного захисту. Загальнонаукове значення дослідження полягає у поглибленні теоретичних уявлень про молекулярні механізми стрес-фізіології рослин та функціонування ПАС як універсальної системи підтримки гомеостазу при переході насіння від стану спокою до проростання. Встановлена прямопропорційна залежність між функціональним станом антиоксидантної (АО) системи та життєздатністю організму створює наукове підґрунтя для розробки нових методів біохімічної діагностики у галузі рослинництва, селекції та екології.

Викладення основного матеріалу. Об'єкт дослідження: насіннєвий матеріал представників однодольних та дводольних рослин, а саме кукурудзи та гороху. При обранні сортів рослин керувались їх рівнем стресостійкості до впливу факторів середовища, використовуючи один стресостійкий сорт, а інший – менш стійкий. Таким чином сорти кукурудзи – «Феномен» та «Джолі», сорти гороху – «Саксон» та «Мадонна», перший з яких стресостійкий, другий – менш стійкий відповідно.

Методи дослідження: посівну придатність насіння визначали лабораторним методом пророщування [1, 2]. Пророщування контрольних зразків проводили в термостаті за температури +24 °С протягом 7 діб. Дослідні зразки пророщували після впливу гіпотермії (витримування протягом 3 діб при температурі +4°C). Оцінку енергії проростання здійснювали на 5-й день пророщування вручну підраховуючи кількість пророслого насіння, що дозволяло визначити швидкість та дружність проростання. Оцінку схожості насіння проводили на 9-й день, повторно визначаючи кількість пророслого насіння з урахуванням усіх проростків, які з'явилися протягом усього періоду. Це дозволяло оцінити загальну життєздатність партії [3-5].

Методи дослідження показників ПАС включали: визначення маркерів оксидативного стресу за вмістом супероксиданіонрадикалу ($\bullet\text{O}_2^-$) та ТБК-активних продуктів (ТБК_{AP}); оцінку ферментативного АО захисту, за активністю СОД та каталази; визначення низькомолекулярних АО за вмістом аскорбінової кислоти (АК) на глутатіону (GSH); оцінку рівня вільнорадикального пошкодження (ВРПО) за активністю цитохромоксидази [6, 7]. Концентрацію $\bullet\text{O}_2^-$ оцінювали за допомогою спектрофотометричного НСТ-тесту. Вміст ТБК_{AP}, які є кінцевими продуктами ВРПО, вимірювали шляхом колориметричної реакції з 2-тіобарбіту-

ровою кислотою (ТБК). Активність СОД визначали, вимірюючи її здатність інгібувати реакцію аутоокислення адреналіну в лужному середовищі. Активність каталази досліджували титриметричним методом, модифікованим О.М. Бахом та С.М. Зубковою за розкладом перекису водню та зменшенням його концентрації в реакційній суміші. Концентрацію АК визначали методом титрування за Й. Тільмансом, концентрацію GSH вимірювали колориметрично із використанням реактиву Елмана [8]. Активність цитохромоксидази, кінцевого ферменту дихального ланцюга, визначали за її здатністю окиснювати цитохром с (що реєструється спектрофотометрично), використовуючи як субстрати α -нафтол та *p*-фенілендіамін [7, 9, 10]. Результати аналізували з урахуванням повторень (кратність 10) та відхилень, що забезпечило достовірність отриманих даних.

Результати дослідження контрольної групи наведені в таблиці 1. Показники посівної придатності (енергія проростання та схожість) є критичними для оцінки якості насіння та його потенціалу для формування врожаю. Обидва сорти кукурудзи, «Джолі» та «Феномен», демонструють дуже високі та майже рівні показники енергії проростання (98% та 97%) та схожості (99% та 97%). Сорт «Саксон» має вищі показники посівної придатності (енергія проростання 97%, схожість 98%) порівняно з сортом «Мадонна» (енергія проростання 91%, схожість 96%). Це підтверджує, що сорт «Саксон» є більш стійким порівняно

з «Мадонною» за критеріями якості насіння. Порівнюючи культури, можна стверджувати, що насіння кукурудзи (сорт «Джолі») має дещо вищі показники придатності порівняно з горохом, хоча стійкий сорт гороху («Саксон») не поступається стійкому сорту кукурудзи («Феномен»).

Аналіз показників ПАС відображає баланс між генерацією активних форм Оксигену (АФО) та ефективністю їх нейтралізації ферментними й неферментними АО системами [11-13]. Показниками оксидативного стресу є НСТ-тест та ΔTBA_{ap} . НСТ-тест відображає рівень супероксиданіон радикалу, основного АФО [14]. Стійкіші сорти («Феномен») демонструють нижчу концентрацію $\bullet O_2^-$ порівняно з менш стійкими сортами («Джолі»). Сорт «Саксон» має найнижчий рівень $\bullet O_2^-$, що вказує на його високу стійкість і менший рівень ендogenousного стресу, порівняно з «Мадонною». ΔTBA_{ap} відображає ступінь пошкодження ліпідних мембран кінцевими продуктами перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ). Так, стійкі сорти мають нижче значення ΔTBA_{ap} . «Феномен» має нижчий рівень, ніж «Джолі». «Саксон» має нижчий рівень, що підтверджує його вищу стійкість до окислювального пошкодження порівняно з «Мадонною».

Усі показники АО захисту (активність каталази, СОД, цитохромоксидази, концентрація АК, GSH) у насінні гороху суттєво вищі, ніж у насінні кукурудзи. Це можна пояснити тим, що горох є дводольною культурою з високим вмістом білка

Таблиця 1

Порівняльна характеристика значень показників стану посівної придатності та ПАС насіння (контроль)

№	Дослідні показники	Сорти кукурудзи		Сорти гороху	
		«Джолі»	«Феномен»	«Мадонна»	«Саксон»
<i>Показники посівної придатності:</i>					
1.	Енергія проростання, %	98 ± 1,01	97 ± 0,88	91 ± 1,04	97 ± 0,98
2.	Схожість насіння, %	99 ± 1,11	97 ± 0,24	96 ± 0,21	98 ± 0,56
<i>Показники прооксидантно-антиоксидантної системи:</i>					
3.	НСТ тест (фоновий рівень), нмоль $\bullet O_2^- / (г \cdot с)$	1,212 ± 0,012	1,086 ± 0,011	0,77 ± 0,009	0,69 ± 0,009
4.	ΔTBA_{ap} , %	111,95 ± 4,28	100,09 ± 2,31	73,62 ± 1,84	61,92 ± 2,96
5.	Активність каталази, $\frac{мкмоль}{кг \cdot хв}$	0,09 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,45 ± 0,01	0,58 ± 0,01
6.	Активність СОД, ОД	0,19 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,51 ± 0,01	0,59 ± 0,01
7.	Концентрація АК, $\frac{ммоль}{кг}$	0,085 ± 0,01	0,094 ± 0,01	0,264 ± 0,01	0,299 ± 0,01
8.	Концентрація GSH, $\frac{ммоль}{кг}$	37,21 ± 0,18	39,14 ± 0,67	58,97 ± 0,12	59,39 ± 0,12
9.	Активність цитохромоксидази, ОД	0,154 ± 0,002	0,168 ± 0,004	0,306 ± 0,004	0,353 ± 0,008

і, відповідно, амінокислот, які є джерелом для синтезу ферментів АО захисту. Кукурудза належить до однодольних з переважанням вуглеводневих клітинних включень. У всіх випадках більш стійкі сорти («Феномен» та «Саксон») мають вищі показники АО активності, порівняно з менш стійкими сортами («Джолі» та «Мадонна»). Так, кукурудза сорту «Феномен» має вищу активність каталази та СОД, що вказує на кращу здатність до інактивації АФК, порівняно з «Джолі». Горох «Саксон» демонструє вищу активність каталази, СОД, вищу концентрацію АК та цитохромоксидази, що підтверджує його підвищену стійкість та ефективнішу систему антиоксидантного захисту порівняно з «Мадонною».

Аналіз результатів дозволяє зробити припущення про прямопропорційну залежність між показниками посівної придатності та функціональним станом ПАС: насіння з кращою посівною придатністю (вищою енергією проростання та схожістю) характеризується ефективнішою прооксидантно-антиоксидантною системою. Так, стійкі сорти («Феномен» та «Саксон») мають збалансовану ПАС (низький рівень показників оксидативного стресу, що свідчить про менше пошкодження клітинних структур насіння) та високий антиоксидантний потенціал, що здійснює швидко і ефективно нейтралізацію АФО, які утворюються на початкових етапах проростання. Отже ефективність роботи ПАС, особливо висока активність каталази і СОД у поєднанні з низьким рівнем АФК, є біохіміч-

ною основою високої посівної придатності та стійкості насіння.

Результати дослідження експериментальної групи, яка піддавалась впливу гіпотермії, наведені в таблиці 2.

Результати свідчать, що горох сорту "Мадонна" показав стабільно високі показники енергії проростання (88–94%) та схожості (95–98%) у контрольному варіанті. Після впливу гіпотермії ці показники не лише збереглися, а й дещо підвищились, що свідчить про морозостійкість сорту. Горох сорту "Саксон" виявився найстійкішим до впливу низьких температур: у всіх варіантах енергія проростання залишалась на рівні 96–99%, а схожість в окремих випадках сягала 100%. Кукурудза сорту "Джолі" продемонструвала відмінні показники як у звичайних умовах, так і після впливу гіпотермії. Це свідчить про стабільну життєздатність насіння та стійкість до короточасного зниження температури. Кукурудза сорту "Феномен" виявилася більш чутливою до впливу холоду. У контрольному варіанті маємо високі результати (енергія проростання – 94–99%, схожість – 95–100%), проте після переохолодження показники суттєво знизились: енергія проростання – до 81–88%, схожість – до 89–91%. Це вказує на обмежену холодостійкість і необхідність обережного використання сорту у регіонах із ранньою весняною посівною кампанією.

Аналіз показників ПАС свідчить, що гіпотермія призводить до зростання рівня генерації супероксиду в тканинах кукурудзи сорту «Джолі» на

Таблиця 2

Порівняльна характеристика значень показників стану посівної придатності та ПАС насіння (експериментальна група, вплив гіпотермії)

№	Дослідні показники	Сорти кукурудзи		Сорти гороху	
		«Джолі»	«Феномен»	«Мадонна»	«Саксон»
<i>Показники посівної придатності:</i>					
1.	Енергія проростання, %	98 ± 1,01	85 ± 1,09	96 ± 0,91	97 ± 1,01
2.	Схожість насіння, %	98 ± 1,11	90 ± 1,12	97 ± 0,99	99 ± 0,84
<i>Показники прооксидантно-антиоксидантної системи:</i>					
3.	НСТ тест (фоновий рівень), нмоль •О ₂ /(г*с)	1,346±0,009	1,170±0,006	0,94±0,006	0,72±0,011
4.	ΔТВА _{ар} , %	135,96 ± 2,43	100,09 ± 2,31	92,21 ± 1,28	64,39 ± 0,99
5.	Активність каталази, $\frac{\text{МКМОЛЬ}}{\text{КГ} \cdot \text{ХВ}}$	0,10 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,67 ± 0,02
6.	Активність СОД, ОД	0,21 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,60 ± 0,01	0,72 ± 0,03
7.	Концентрація АК, $\frac{\text{ММОЛЬ}}{\text{КГ}}$	0,099 ± 0,01	0,114 ± 0,01	0,309 ± 0,04	0,370 ± 0,03
8.	Концентрація GSH, $\frac{\text{ММОЛЬ}}{\text{КГ}}$	40,69 ± 0,11	43,48 ± 0,27	60,04 ± 0,09	63,31 ± 0,13
9.	Активність цитохромоксидази, ОД	0,154±0,002	0,168±0,004	0,351±0,009	0,456±0,014

11,03%, в тканинах сорту «Феномен» на 7,74%, рівень $\Delta TBA_{ар}$ зростає на 24,01% та 6,22% відповідно порядку згаданих сортів. Активність каталази достовірно не змінюється, активність СОД зростає на 48% тільки в тканинах сорту «Феномен». Зміни низькомолекулярних антиоксидантів є суттєвішими: так, гіпотермія призводить до зростання вмісту АК в тканинах кукурудзи сорту «Джоді» на 16,04%, а в тканинах сорту «Феномен» на 21%, вміст GSH зростає на 9,34% та 11,08% відповідно. Активність цитохромоксидази зросла на 6,06% для сорту «Джоді» та 14,19% для «Феномен». Загальна тенденція впливу гіпотермії полягає у значно більшому зростанні показників окисного стресу для менш стійкого сорту «Джоді» та меншому зростанні ступеня антиоксидантного захисту. В тканинах більш стійкого сорту «Феномен» спостерігаємо незначне зростання прооксидантної ланки та більше посилення антиоксидантної активності, що має відображення у кінцевому результаті на значення активності цитохромоксидази, що є маркером ступеня вільнорадикального пошкодження мембран.

Вплив гіпотермії на біохімічні показники тканин насіння гороху різних ростів проявляє подібну тенденцію: так, генерація супероксиду зростає на 22% в тканинах насіння сорту «Мадонна» та всього на 4% в тканинах сорту «Саксон», зростання $\Delta TBA_{ар}$ складає 18,59% та 2,47% відповідно. Звертає увагу посилення активності АО ланки як за рахунок ферментних, так і низькомолекулярних АО в тканинах обох сортів, що, можливо пояснюється білковими резервами, які є джерелом амінокислот для синтезу ензимних АО. Так, активність каталази зростає на 9,01% та 16,07%, СОД – на 18,04% та 22,36% відповідно сорту «Мадонна» та «Саксон». Вміст аскорбінової кислоти зростає на 17,07% та 23,81%, різниця вмісту GSH не достовірна, активність цитохромоксидази зростає на 12,5% та 29,34% відповідно порядку згадування сорту.

Виходячи із встановлених числових змін, слідує, що стійкі сорти мають вищий початковий рівень АО або більш стабільну структуру мембран, що забезпечує кращий "буфер" проти раптового холодостресу. Стійкі сорти здатні швидше і потужніше індукувати синтез АО у відповідь на генерацію АФО, забезпечуючи ефективне їхнє знешкодження і запобігаючи масовому пошкодженню. Малостійкі сорти мають повільнішу або слабшу реакцію, що призводить до накопичення АФО, як-от супероксиду, і, як наслідок, до інтенсивного перекисного окислення ліпідів мембран, маркером якого є $\Delta TBA_{ар}$. Зростання активності АО ланки в насінні гороху обох сортів можна пояснити високими білковими резервами, які слугують джерелом амінокислот для синтезу нових ферментних АО (СОД, каталаза). Отримані

дані мають вагоме практичне значення, так, наприклад, сорти з високою холодостійкістю ("Саксон", "Джоді") є пріоритетними для регіонів із ранньою весняною посівною кампанією, де існує високий ризик короточасних заморозків або низьких температур ґрунту. Їхнє насіння забезпечить високу схожість і польову життєздатність. Сорти з обмеженою холодостійкістю ("Феномен") вимагають обережного використання і можуть бути придатні лише для пізніших термінів посіву або в тепліших регіонах. Показники стану ПАС можуть слугувати ранніми маркерами для оцінки холодостійкості нових сортів у селекції.

Головні висновки:

1. У стійкіших сортів рослин спостерігаються вищі показники посівної придатності, нижчий рівень показників оксидативного стресу, вищі показники АО захисту порівняно з менш стійкими сортами.

2. Вплив гіпотермії суттєво знижує показники посівної придатності лише у кукурудзи сорту «Феномен». Показники енергії проростання та схожості збереглися або підвищилися у стійких сортів. Гіпотермія призводить до зростання значення прооксидантної активності в усіх досліджуваних сортах, а також посилення антиоксидантного захисту (зростання активності СОД, каталази, вмісту АК та GSH).

3. Стійкі сорти (горох «Саксон», кукурудза «Джоді») здатні швидше і потужніше індукувати синтез антиоксидантів у відповідь на холодострес. Це забезпечує ефективне знешкодження АФО та мінімізацію пошкоджень клітинних мембран, що відображається меншим зростанням активності цитохромоксидази. Малостійкі сорти мають повільнішу або слабшу реакцію АО захисту, що призводить до накопичення АФО, інтенсивного перекисного окислення ліпідів та значного вільнорадикального пошкодження мембран.

4. Встановлено прямопропорційну залежність між показниками посівної придатності та функціональним станом ПАС: насіння з кращою посівною придатністю характеризується ефективнішою ПАС.

5. Вища активність каталази і СОД у поєднанні з низьким рівнем АФО є біохімічною основою високої посівної придатності та стійкості насіння. Показники стану ПАС можуть слугувати інформативними маркерами та ранніми інструментами прогнозування, аналіз яких дозволяє краще зрозуміти молекулярні механізми стійкості рослин до стресових чинників. Встановлені характеристики дозволяють більш точно прогнозувати життєздатність і стійкість рослин, що має практичне значення для підвищення ефективності передпосівної підготовки насіння, оптимізації агротехнічних рішень та зниження витрат шляхом раннього виявлення слабкого матеріалу.

Перспективи використання результатів дослідження. Одержані дані відкривають широкі можливості для впровадження у практику аграрних підприємств, селекційних центрів та науково-дослідних установ з метою підвищення біологічної та технологічної ефективності рослинництва. Встановлені біохімічні характеристики ПАС дозволяють розробити системи раннього моніторингу якості насіннєвого матеріалу, що забезпечить точне прогнозування життєздатності та продуктивності культур ще до моменту висіву. Перспективним напрямом є використання

виявлених маркерів оксидативного стресу для верифікації холодостійкості нових сортів, що дозволить раціонально підбирати асортимент рослин для конкретних кліматичних зон та оптимізувати терміни посівних кампаній. Крім того, результати дослідження можуть стати підґрунтям для вдосконалення методів передпосівної підготовки насіння, спрямованих на штучне посилення антиоксидантного «буфера», що в перспективі мінімізує виробничі витрати та забезпечить стабільні врожаї навіть за умов нестабільного температурного режиму.

Література

1. Державна установа «Волинська обласна фітосанітарна лабораторія». Визначення посівної якості насіннєвого матеріалу. Луцьк, 2021.
2. Капинос М. В., Калитка В. В. Вплив регуляторів росту рослин і мікробних препаратів на проростання насіння та початковий ріст гороху посівного (*Pisum sativum* L.). Таврійський науковий вісник, 2016, № 96, с. 66–70.
3. Косов О. І., Фомін О. В. Технологія вирощування сільськогосподарських культур. Харків: ФОП Бровін О. В., 2018. 364 с.
4. Методичні рекомендації до проведення передпосівної обробки насіння / ред. Мельник О. П. Київ: ІАЕ, 2015. 48 с.
5. УкрСпецАгроПродукт. Аналіз посівних якостей насіння [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://usap.ua/>
6. Berwal M.K., Ram C. Superoxide Dismutase: A stable biochemical marker for abiotic stress tolerance in higher plants. 2018. Open access peer-reviewed chapter. DOI: 10.5772/intechopen.82079
7. Bobrova M., Holodaieva O., Koval S., Kucher O., Tsviakh O. Features of changes in prooxidant- antioxidant balance of tissues during activation of seed germination. Journal of the University of Zulia. 2022. № 13(37). P. 362–382
8. Hasanuzzaman M., Nahar K., Anee T.I., Fujita M. Glutathione in plants: Biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance. PMBP. 2017. № 23. P. 249–268. 8. Janků M, Luhová L, Petřivalský M. On the Origin and Fate of Reactive Oxygen Species in Plant Cell Compartments. Antioxidants (Basel). 2019. № 8(4). P. 105.
9. Marrocco I, Altieri F, Peluso I. Measurement and Clinical Significance of Biomarkers of Oxidative Stress in Humans. Oxid Med Cell Longev. 2017. 6501046. doi: 10.1155/2017/6501046
10. Morales M, Munné-Bosch S. Malondialdehyde: Facts and Artifacts. Plant physiology. 2019. № 180(3). P. 1246–1250.
11. Nandi A., Liang-Jun Y., Jana C.K., Dascorresponding N. Role of Catalase in Oxidative Stress- and Age-Associated Degenerative Diseases. Oxid Med Cell Longev. 2019. 9613090. doi: 10.1155/2019/9613090
12. Pacheco J. H. L., M. A. Carballo, and M. E. Gonsebatt. “Antioxidants against environmental factor-induced oxidative stress” in Nutritional Antioxidant Therapies. Treatments and Perspectives. 2018. № 8. P. 189–215.
13. Paciolla C.; Fortunato, S.; Dipierro, N.; Paradiso, A.; De Leonardis S. (2019). Vitamin C in Plants: From Functions to Biofortification. Antioxidants. 2019. № 8(11). P. 519.
14. Rampon C., Volovitch M., Joliot A., Vrız S. Hydrogen Peroxide and Redox Regulation of Developments. Antioxidants. 2018. № 7. P. 159.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026