

Ю. М. ПАЛИВОДА, В. М. ГАВІЙ

Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя
вул. Графська, 2, м. Ніжин, Чернігівська область, 16600
e-mail: yulia.palivoda@gmail.com

ВПЛИВ ОБРОБКИ НАСІННЯ МЕТАБОЛІЧНО АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ НА АКТИВНІСТЬ АСКОРБАТПЕРОКСИДАЗИ ТА ВМІСТ АСКОРБАТУ В ПРОРОСТКАХ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ (*TRITICUM AESTIVUM* L.) ЗА УМОВ ВОДНОГО ДЕФІЦИТУ

У статті наведено порівняльну характеристику впливу метаболічно активних речовин та їх комбінацій на активність аскорбатпероксидази та вміст аскорбату в проростках пшениці м'якої в умовах водного дефіциту. Встановлено, що розчин вітаміну Е підвищує активність аскорбатпероксидази в проростках, перевищуючи показник контролю на 65,5 % та на 2,4 %, як порівняти з показниками проростків, насіння яких знаходилося у змодельованих умовах посухи. Розчин убіхінону-10 в умовах водного дефіциту найефективніше підвищує вміст аскорбату на 46,3 % у тканинах проростків пшениці м'якої. Попередня обробка насіння метаболічно активними речовинами посилює активацію аскорбатпероксидази та збільшує вміст аскорбату в проростках пшениці м'якої, що сприяє максимальній реалізації системи антиоксидантного захисту рослин в умовах посухи.

Ключові слова: пшениця м'яка, метаболічно активні речовини, ПЕГ 6000, вітамін Е, убіхінон-10, параоксибензойна кислота, метіонін, $MgSO_4$, аскорбатпероксидаза, аскорбат.

Пшениця – важлива продовольча культура, на яку припадає до третини світового виробництва зерна. Україна є однією з країн лідерів у світовому виробництві пшениці, площі її посівів становлять більше, ніж 22 % посівних площ зернових. З кожним роком обсяги виробництва зерна пшениці зростають. Українськими вченими виявлено, що за останні 30 років середня річна температура на материковій частині України зросла на 1,2°C. Наявна тенденція до зміни клімату у бік зниження опадів та підвищених температур впливає на продуктивність зернових культур. Несприятливі умови навколишнього середовища, що зумовлені глобальними змінами клімату, висувають надзвичайно важливе завдання перед аграріями – підвищення продуктивності пшениці. Одним із найгостріших екологічних факторів, який негативно впливає на фізіологічні та обмінні процеси і, як наслідок, призводить до зниження кількості накопиченої рослинами органічної речовини в рослинах, є водний дефіцит, спричинений посухою. Він є найбільшим лімітуючим чинником формування врожаю серед факторів, які викликають стрес у рослин [8].

Водний дефіцит призводить до зменшення водного потенціалу листя і до закриття продихів, що в кінцевому результаті зменшує транспіраційні втрати, підвищує температуру листя та призводить до порушення загальних метаболічних функцій, таких, як дихання, фотосинтез, поглинання поживних речовин, а також синтез амінокислот і білків [19]. Недоступність CO_2 через тривале закриття продихів сприяє накопиченню відновлених сполук ланцюга транспорту електронів. Процес зменшує доступність молекулярного кисню та збільшує продукцію активних форм кисню (АФК). Згідно з дослідженнями, окислювальний стрес спричиняє перекисне окислення ліпідів, пошкоджує нуклеїнові кислоти та білки і змінює вуглеводний обмін, що призводить до дисфункції клітин та її смерті [14].

Відомо, що деструкція АФК у клітині здійснюється системою антиоксидантного захисту, у якій задіяний цілий ряд ферментів та субстратів. Різноманітні ферментативні та неферментативні антиоксидантні компоненти усувають АФК, пригнічують розвиток процесу перекисного окислення та запобігають фрагментації ДНК. Антиоксидантні ферменти, такі, як аскорбатпероксидаза, відіграють важливу роль у боротьбі зі стресом, викликаним посухою.

В умовах сьогодення у галузі рослинництва для обробки зернових культур, для підвищення їх стійкості до дії різних стресорів, включаючи і посуху, та збільшення врожаю застосовують біологічно активні речовини та природні антиоксиданти. Перспективними регуляторами росту зернових культур в умовах посухи можуть бути метаболічно активні речовини та їх комбінації [5], які є високоефективними в малих концентраціях та не є токсичними для здоров'я людини та тварин.

Пакистанські вчені Qasim Ali та інші [20] з'ясували, що обприскування листя кукурудзи (*Zea mays* L.) розчином α -токоферолу збільшило активність антиоксидантних ферментів та відіграло важливу роль у захисті клітинних мембран від осиснення.

Вчені Liu M. та Lu S. [16] встановили, що використання убіхінону-10 може збільшувати вегетаційний період і покращувати структуру врожаю пшениці шляхом пригнічення виробництва АФК за рахунок антиоксидантної активності. Окрім цього, вчені встановили здатність убіхінону-10 відновлювати інші антиоксиданти, такі, як вітамін Е та аскорбінова кислота.

Таким чином, пошук метаболічно активних сполук, що зменшують негативну дію посухи та стимулюють фізіолого-біохімічні процеси в організмі зернових культур є актуальною проблемою сьогодення.

Метою цієї роботи є дослідження впливу обробки насіння метаболічно активними речовинами на активність аскорбатпероксидази та аскорбату в проростках пшениці м'якої за умов водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000.

Матеріали та методи досліджень

Для дослідження використовували насіння пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) сорту Провінціалка. Цей сорт селекції Носівської селекційно-дослідної станції Миронівського інституту пшениці імені В. М. Ремесла НААН України є одним із найбільш придатних для вирощування продовольчого зерна високої якості в зонах Лісостепу і Полісся та характеризується високою посухостійкістю (6,6–8 балів) [2]. Дослідження проводилися в навчально-науковій лабораторії з біохімічних та медико-валеологічних досліджень Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя. Для моделювання водного дефіциту використовували розчин нейногенного високомолекулярного полімеру поліетиленгліколю 6000 (ПЕГ 6000) концентрацією 12 %. За дослідженнями [15], зазначена концентрація ПЕГ 6000 є оптимальною для оцінки на стійкість до посухи.

Вивчення впливу метаболічно активних речовин на активність аскорбатпероксидази та вміст аскорбату в проростках пшениці м'якої за тривалої дії водного дефіциту проводили в чашках Петрі, насіння пшениці замочували на 3 години у розчинах досліджуваних речовин та їх комбінацій. Дослідження передбачало використання таких варіантів:

- 1) контроль (необроблене насіння + дистильована вода);
- 2) обробка насіння розчином ПЕГ 6000 (12 %);
- 3) обробка насіння розчином вітаміну Е (10^{-8} М) – Е;
- 4) обробка насіння розчином убіхінону-10 (10^{-8} М) – Q;
- 5) обробка насіння розчином метіоніну (0,001 %) – М;
- 6) обробка насіння розчином параоксибензойної кислоти (ПОБК) (0,001 %) – П;
- 7) обробка насіння розчином $MgSO_4$ (0,001 %) – Mg;
- 8) обробка насіння комбінацією речовин: вітамін Е (10^{-8} М) + убіхінон – 10 (10^{-8} М) – EQ;
- 9) обробка насіння комбінацією речовин: вітамін Е (10^{-8} М) + метіонін (0,001 %) + ПОБК (0,001 %) – ЕМП;
- 10) обробка насіння комбінацією речовин: вітамін Е (10^{-8} М) + метіонін (0,001 %) + ПОБК (0,001 %) + $MgSO_4$ (0,001 %) – ЕМПМg.

У зазначених концентраціях метаболічно активні сполуки виявили високу ефективність щодо впливу на фізіологічні та біохімічні показники зернових та зернобобових культур [4, 5]. Повторність дослідів чотирикратна.

Дослідження активності ферментів антиоксидантної системи в проростках пшениці м'якої сорту Провінціалка проводили з визначенням показників активності аскорбатпероксидази та вмісту аскорбінової кислоти на 10-ту добу вегетації у десятикратній

повторності. Активність аскорбатпероксидази у проростках пшениці м'якої сорту Провінціалка в умовах водного дефіциту визначали спектрофотометричним методом за методикою [18]. Активність ферменту виражали в мкмоль аскорбата на 1 г сирової маси за 1 хвилину. Визначення вмісту аскорбату у проростках пшениці м'якої сорту Провінціалка в умовах водного дефіциту проводили спектрофотометрично за методом Hewitt E. J. та Dickes G. J. [9]. Вміст аскорбату виражали в ммоль/г маси сирової речовини.

Статистично опрацьовували матеріал за допомогою методів математичної статистики з використанням стандартних вбудованих функцій пакета спеціалізованого програмного забезпечення MS Office Excel – 2010 (пакету «Аналіз даних»).

Результати досліджень та їх обговорення

Здатність рослин витримувати значне зневоднення та перегрів, зберігаючи при цьому нормальний ріст, розвиток та здатність до відтворення, називають посухостійкістю. Стійкість рослин до посухи пов'язана з низкою подій на морфологічному, фізіологічному та молекулярному рівнях.

Вирішальна роль в адаптації рослин до дії несприятливих чинників навколишнього середовища належить біохімічним системам захисту. Осмотичний стрес, спричинений посухою, супроводжується надмірним утворенням АФК та розвитком окиснювального стресу. За цих умов важливим є збалансованість функціонування всіх компонентів складної системи антиоксидантного захисту.

Під дією водного дефіциту відбувається посилення синтезу антиоксидантних ферментів. Вони приймають участь у нейтралізації активних форм кисню (АФК), надмірне накопичення яких у рослинних клітинах за дії стресу ініціює перекисне окиснення ліпідів та призводить до деструкції мембранних структур, пошкодження білків та ДНК.

Головними ферментами антиоксидантного захисту від АФК є хлоропластні супероксиддисмутаза (СОД) та аскорбатпероксидаза (АПО) [10].

Аскорбатпероксидаза (КФ 1.11.1.11) – важливий компонент ферментативної антиоксидантної системи рослин, що каталізує реакцію окиснення аскорбату пероксидом водню [7].

Одержані результати активності аскорбатпероксидази в проростках пшениці м'якої сорту Провінціалка за обробки насіння метаболічно активними речовинами у змодельованих умовах водного дефіциту наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Активність аскорбатпероксидази у 10-ти добових проростках пшениці м'якої сорту Провінціалка за умов водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000 за дії метаболічно активних речовин

Варіанти досліджу	Активність аскорбатпероксидази	
	мкмоль аскорбата/г сирової маси за хв	% до контролю
Контроль	0,084±0,02#	100
ПЕГ	0,137±0,03*	163,1
ПЕГ+Е	0,139±0,03*	165,5
ПЕГ+Q	0,114±0,03*	135,7
ПЕГ+М	0,093±0,04	110,7
ПЕГ+П	0,081±0,03	96,4
ПЕГ+Mg	0,124±0,03*	147,6
ПЕГ+EQ	0,110±0,03*	131,0
ПЕГ+ЕМП	0,086±0,02	102,4
ПЕГ+ЕМПМg	0,087±0,02	103,6

Примітка. * – різниця достовірна, порівнюючи з контролем ($p < 0,05$); # – достовірно, порівнюючи з групою рослин, насіння яких пророщували в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ ($p < 0,05$).

Результати наших досліджень показують, що змодельовані умови посухи за допомогою ПЕГ 6000 індукували підвищення активності аскорбатпероксидази на 63,1 % відносно контролю. Цей показник вказує на розвиток окиснювального стресу та на підвищений вміст H_2O_2 в проростках. Попередня обробка насіння пшениці м'якої метаболічно активною сполукою Е підвищує активність аскорбатпероксидази, перевищуючи показник контролю на 65,5 % та на 2,4 %, порівнюючи з показниками проростків, насіння яких знаходилося у змодельованих умовах посухи. Відмічена нами активність АПО в проростках пов'язана з підвищенням концентрації H_2O_2 , що призводить до активації ферменту. Розчин вітаміну Е стимулює АПО як фермент антиоксидантної системи, що є необхідним для формування посухостійкості.

За стресових умов посухи, активність АПО має негативну корелятивну залежність з інтенсивністю фотосинтезу листків пшениці [11]. Тобто, окиснювальний стрес спричиняє зменшення активності фотосинтетичного апарату, але антиоксидантні ферменти запобігають його остаточному пригніченню. У наших попередніх дослідженнях спостерігається взаємозалежність цих даних за обробки насіння розчином вітаміну Е. Підвищення активності АПО корелює з показниками інтенсивності фотосинтезу у листках пшениці в умовах водного дефіциту [6], що свідчить про інтенсифікацію захисних реакцій фотосинтетичного апарату на окислювальний стрес.

Показники активності АПО проростків пшениці за обробки насіння розчинами Mg, Q та комбінацією EQ перевищують значення контролю на 47,6 %, 35,7 % та 31 % відповідно, але не перевищують показників ПЕГ. Це вказує на те, що дані речовини проявляють захисну дію в умовах водного дефіциту, але не повністю знімають інгібуючий вплив ПЕГ 6000.

Для захисту клітин від дії вільних радикалів, окрім ферментів, задіяний цілий ряд ензимів та субстратів. Аскорбат є важливим низькомолекулярним антиоксидантом, головною функцією якого є відновлення вільних радикалів АФК. Накопичення та перетворення аскорбату відбувається за участі аскорбатпероксидази, яка є високоафінною до аскорбату [1].

Аскорбат у рослинних клітинах є важливим субстратом відновлення H_2O_2 . Він бере участь у детоксикації H_2O_2 , безпосередньо реагує із супероксидними аніон-радикалами, молекулярним синглетним киснем і гідроксильними радикалами.

Захисний ефект аскорбату заснований на тому, що проміжні радикали і молекули, що утворюються при його окисленні, хімічно менш активні в порівнянні з радикалами АФК. Відновлена форма аскорбату здатна не лише безпосередньо взаємодіяти з АФК, але й брати участь у відновленні інших низькомолекулярних антиоксидантів (α -токоферолу, глутатіону) у ферментативних та неферментативних реакціях.

Результати дослідження впливу метаболічно активних речовин на вміст аскорбату у проростках пшениці в умовах водного дефіциту представлено у табл. 2.

Згідно отриманих нами результатів за дії водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000, накопичення аскорбату в тканинах проростків перевищувала контрольні значення на 29,1 %. Обробка насіння *T. aestivum* розчином Q в умовах водного дефіциту підвищила вміст аскорбату на 46,3 %, за обробки комбінацією ЕММg – 24,2 %, комбінацією ЕМп – 18,8 %, розчином М – 13 % та комбінацією EQ – 7,4 %, порівнюючи з вмістом аскорбату в проростках, насіння яких знаходилося в умовах водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000. Отримані експериментальні дані дають змогу стверджувати, що вище зазначені метаболічно активні сполуки та їх комбінації зумовлюють збільшення накопичення антиоксиданта для забезпечення про-/антиоксидантної рівноваги для відновлення метаболізму. Обробка насіння розчинами Е та Mg призводять до зниження вмісту аскорбату у порівнянні з показниками в проростках, насіння яких знаходилося в умовах водного дефіциту. Зниження вмісту цього антиоксиданту відбувалося на тлі підвищення активності аскорбатпероксидази і може бути пов'язане з активним використанням аскорбату як субстрату в реакції, що каталізується цим ферментом.

Вміст аскорбату у 10-ти добових проростках пшениці м'якої сорту Провінціалка за умов водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000 за дії метаболічно активних речовин

Варіанти досліджу	Вміст аскорбату	
	мкмоль /г сиріої маси	% до контролю
Контроль	11,39±0,1#	100
ПЕГ	14,7±0,5*	129,1
ПЕГ+E	13,76±0,4*	120,8
ПЕГ+Q	19,98±0,4*#	175,4
ПЕГ+M	16,19±0,2*#	142,1
ПЕГ+П	14,78±0,3*	129,8
ПЕГ+Mg	13,41±0,3*	117,7
ПЕГ+EQ	15,55±0,1*#	136,5
ПЕГ+ЕМП	16,85±0,6*#	147,9
ПЕГ+ЕМПMg	17,46±0,3*#	153,3

Примітка. * – різниця достовірна, порівнюючи з контролем ($p < 0,05$); # – достовірно, порівнюючи з групою рослин, насіння яких пророщували в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ ($p < 0,05$).

Попередня обробка насіння пшениці м'якої метаболічно активними речовинами виявила чіткий стимулюючий ефект на активність аскорбатпероксидази та вміст аскорбату. Це пояснюється тим, що α -токоферол є одним з найважливіших антиоксидантів. Він взаємодіє з поліненасиченими ацильними групами та захищає поліненасичені жирні кислоти від перекисного окислення ліпідів шляхом видалення пероксирадикалів ліпідів і гасіння АФК. Під час цього процесу токоферолі віддають свій фенольний водень вільним радикалам ліпідів, нейтралізуючи таким чином радикал. Радикали токоферолу є більш стабільними, менш реакційноздатними і, що більш важливо, можуть бути перетворені у відповідний токоферол шляхом реакції з іншими антиоксидантами такими, як аскорбат. Крім того, α -токоферол здатний дезактивувати синглетний кисень, який окислює мембранні ліпіди, білки, амінокислоти, нуклеїнові кислоти, нуклеотиди та вуглеводи. Хімічна реакція α -токоферолу з синглетним киснем призводить до утворення відповідних хінонів токоферолу (та інших похідних), деякі з яких є потужними антиоксидантами [20].

Однією із найважливіших антиоксидантних властивостей убіхінону-10 є його здатність регенерувати інші антиоксиданти, такі, як α -токоферол і аскорбат [3]. Убіхінон, зі свого боку, може не тільки виступати як антиоксидант, а й бути прооксидантом.

Метіонін є основним метаболітом у клітинах рослин та залучений до антиоксидантної системи [17].

Параоксибензойна кислота регулює активність комплексу антиоксидантних ферментів, а саме активує ферменти антиоксидантної системи такі, як НАДФН-оксидази, пероксидази та СОД [12].

Сульфур, як складова $MgSO_4$, приймає участь у синтезі ферментів, білків, в окисно-відновних процесах клітини, підвищуючи посухостійкість рослин [13].

Метаболічно активні речовини, які входять до складу комбінації, підсилюють дію один одного та краще активують ферменти антиоксидантної системи.

Висновки

Використання метаболічно активних речовин в умовах посухи збільшило активність ферментів антиоксидантної системи проростків пшениці сорту Провінціалка.

Досліджувані метаболічно активні речовини показали позитивний вплив на активність аскорбатпероксидази в проростках пшениці в умовах посухи. Найвищі показники були виявлені за попередньої обробки насіння розчином E.

Попередня обробка насіння пшениці розчинами Q, M та комбінаціями EQ, ЕМП та ЕМПМg забезпечила підвищення вмісту аскорбату в проростках пшениці, що вказує на вплив вище зазначених метаболічно активних сполук та їх комбінацій на забезпечення про-/антиоксидантної рівноваги для відновлення метаболізму.

Обробка насіння метаболічно активними речовинами сприяє підвищенню посухостійкості пшениці м'якої, тому подальше вивчення їх впливу на зернові культури в умовах посухи є перспективним напрямком досліджень.

Передпосівна обробка насіння метаболічно активними речовинами може бути використана як елементи технології за вирощування зернових культур в умовах водного дефіциту.

1. Більчук В. С., Россіхіна-Галича А. С. Аскорбат-глутатионова захисна система рослин кукурудзи за дії іонів нікелю. *Регуляторні механізми в біосистемах*. 2012. № 3 (2). С. 9–14. <https://doi.org/10.15421/021225>.
2. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2022 рік. [Чинний від 2022-09-08]. Вид. офіц. Київ, 2022. 332 с.
3. Дзюба В., Кучменко О. Сучасні уявлення про роль убіхінону в процесах метаболізму клітини. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2017. № 75. С. 3–13.
4. Козючко А. Г., Гавій В. М., Кучменко О. Б. Вплив передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на окремі фізіологічні показники сої сорту Аннушка та її продуктивність. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія*. 2020. № 1–2 (79). С. 84–90. DOI: <http://doi.org/10.25128/2078-2357.20.1-2.12>.
5. Куриленко А. О., Кучменко О. Б. Вплив передпосівної обробки насіння на вміст продуктів окислення ліпідів, вітамінів та активність антиоксидантних ензимів в зерні озимого жита. *Нотатки сучасної біології*. 2022. 1 (1). С. 18–22. DOI: [10.29038/2617-4723-2022-1-1-3](https://doi.org/10.29038/2617-4723-2022-1-1-3).
6. Паливода Ю. М., Гавій В. М. Вплив обробки насіння метаболічно активними речовинами на фотосинтетичну продуктивність проростків пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) за моделювання водного дефіциту. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агронія та біологія*. 2023. № 3 (49). С. 49–55. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.3.7>.
7. Соколовська-Сергієнко О. Г. Інтенсивність фотосинтезу та активність антиоксидантних ферментів листків озимої пшениці за різних умов мінерального живлення. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2013. Т. 45, № 3. С. 206–212.
8. Хоменко С. О. Посухостійкість та елементи продуктивності колекційних зразків пшениці м'якої ярої в умовах Лісостепу України. *Миронівський вісник*. 2017. Вип. 4. С. 79–87.
9. Antonenko K., Duma M., Kreicberg V., Kunkulberga D. The influence of microelements selenium and cooper on the rye malt amylase activity and flour technological properties. *Agronomy Research*. 2016. Vol. 14 (2). P. 1261–1270.
10. Asada K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Ibid*. 2006. Vol. 141(2). P. 391–396. <https://doi.org/10.1104/pp.106.082040>.
11. Ashraf M., Harris P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*. 2013. Vol. 51(2). P. 163–190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>.
12. Barkosky R. R., Einhellig F. A. Allelopathic interference of plant water relationships by para-hydroxybenzoic acid. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*. 2003. Vol. 44. P. 53–58.
13. Guo W., Chen S., Hussain N., Cong Y., Liang Z., Chen K. Magnesium stress signaling in plant: just a beginning. *Plant Signal Behav*. 2015. Vol. 3(10). e992287. <https://doi.org/10.4161/15592324.2014.992287>.
14. Hasanuzzaman M., Bhuyan M., Anee T. I., Parvin K., Nahar K., Mahmud J. A., Fujita M. Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic stress. *Antioxidants*. 2019. Vol. 8(9). P. 384. <https://doi.org/10.3390/antiox8090384>.
15. Kolesnikov M., Gerasko T., Paschenko Yu., Pokoptseva L., Onyschenko O., Kolesnikova A. Effect of water deficit on maize seeds (*Zea mays* L.) during germination. *Agronomy Research*, 2023. Vol. 21, № 1. P. 156–174. DOI: <http://doi.org/10.15159/AR.23.016>.
16. Liu M, Lu S. Plastoquinone and Ubiquinone in Plants: Biosynthesis, Physiological Function and Metabolic Engineering. *Front Plant Sci*. 2016. Vol. 7. P. 1898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01898>.
17. Martinez Y., Li X., Liu G. et al. The role of methionine on metabolism, oxidative stress, and diseases. *Amino Acids*. 2017. 12(49). P. 2091–2098. <https://doi.org/10.1007/s00726-017-2494-2>.

18. Nakano Y., Asada K. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. *Plant Cell Physiol.* 1981. Vol. 22. P. 867–880.
19. Nezhadahmadi A., Prodhani Z. H., Faruq G. Drought Tolerance in Wheat. *The Scientific World Journal.* 2013. ID 610721. <https://doi.org/10.1155/2013/610721>.
20. Qasim Ali, Muhammad Tariq Javed, Muhammad Zulqurnain Haider, Noman Habib, Muhammad Rizwan, Rashida Perveen, Shafaqat Ali, Mohammed Nasser Alyemeni, Hamed A. El-Serehy and Fahad A. Al-Misned. α -Tocopherol Foliar Spray and Translocation Mediates Growth, Photosynthetic Pigments, Nutrient Uptake, and Oxidative Defense in Maize (*Zea mays* L.) under Drought Stress. *Agronomy.* 2020. Vol. 10(9), 1235. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/9/1235>.

References

1. Bilchuk V. S., Rossikhina-Halycha A. S. Askorbat-hlutationova zakhysna systema roslyn kukurudzy za dii ioniv nikeliu. *Rehuliatorni mekhanizmy v biosystemakh.* 2012. No 3 (2). S. 9–14. <https://doi.org/10.15421/021225>. [in Ukrainian]
2. Derzhavnyi reiestr sortiv roslyn, prydatnykh dlia poshyrennia v Ukraini na 2022 rik. [Chynnyi vid 2022-09-08]. Vyd. ofits. Kyiv, 2022. 332 s. [in Ukrainian]
3. Dziuba V., Kuchmenko O. Suchasni uiavlennia pro rol ubikhinonu v protsesakh metabolizmu klityny. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii biologichna.* 2017. No 75. S. 3–13. [in Ukrainian]
4. Koziuchko A. H., Havii V. M., Kuchmenko O. B. Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia metabolichno aktyvnymy rehovynamy na okremi fiziologichni pokaznyky soi sortu Annushka ta ii produktyvnist. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biologhiia.* 2020. Vyp. No 1–2 (79). C. 84–90. DOI: <http://doi.org/10.25128/2078-2357.20.1-2.12>. [in Ukrainian]
5. Kurylenko A. O., Kuchmenko O. B. Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia na vmist produktiv oksylennia lipidiv, vitaminiv ta aktyvnist antyoksydantnykh enzymiv v zerni ozymoho zhyta. *Notatky suchasnoi biologii.* 2022. 1 (1). S. 18–22. DOI: 10.29038/2617-4723-2022-1-1-3. [in Ukrainian]
6. Palyvoda Yu. M., Havii V. M. Vplyv obrobky nasinnia metabolichno aktyvnymy rehovynamy na fotosyntetychnu produktyvnist prorostkiv pshenytsi miakoi (*Triticum aestivum* L.) za modeliuvannia vodnoho defitsytu. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii: Ahronomiia ta biologhiia.* 2023. No 3 (49). S. 49–55. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.3.7>. [in Ukrainian]
7. Sokolovska-Serhiienko O. H. Intensyvni fotosyntezy ta aktyvnist antyoksydantnykh fermentiv lystkiv ozymoi pshenytsi za riznykh umov 107 mineralnoho zhyvlennia. *Fiziologhiia i biokhimiia kulturnykh roslyn.* 2013. T. 45, No 3. S. 206–212. [in Ukrainian]
8. Khomenko S. O. Posukhostiykist ta elementy produktyvnosti kolektsiynykh zrazkiv pshenytsi miakoi iaroi v umovakh Lisostepu Ukrainy. *Myronivskiy visnyk.* 2017. Vyp. 4. S. 79–87. [in Ukrainian]
9. Antonenko K., Duma M., Kreicberg V., Kunkulberga D. The influence of microelements selenium and cooper on the rye malt amylase activity and flour technological properties. *Agronomy Research.* 2016. Vol. 14 (2). P. 1261–1270.
10. Asada K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Ibid.* 2006. Vol. 141(2). P. 391–396. <https://doi.org/10.1104/pp.106.082040>.
11. Ashraf M., Harris P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica.* 2013. Vol. 51(2). P. 163–190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>.
12. Barkosky R. R., Einhellig F. A. Allelopathic interference of plant water relationships by para-hydroxybenzoic acid. *Botanical Bulletin of Academia Sinica.* 2003. Vol. 44. P. 53–58.
13. Guo W., Chen S., Hussain N., Cong Y., Liang Z., Chen K. Magnesium stress signaling in plant: just a beginning. *Plant Signal Behav.* 2015. Vol. 3(10). e992287. <https://doi.org/10.4161/15592324.2014.992287>.
14. Hasanuzzaman M., Bhuyan M., Anee T. I., Parvin K., Nahar K., Mahmud J. A., Fujita M. Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic stress. *Antioxidants.* 2019. Vol. 8(9). P. 384. <https://doi.org/10.3390/antiox8090384>.
15. Kolesnikov M., Gerasko T., Paschenko Yu., Pokoptseva L., Onyschenko O., Kolesnikova A. Effect of water deficit on maize seeds (*Zea mays* L.) during germination. *Agronomy Research,* 2023. Vol. 21, № 1. P. 156–174. DOI: <http://doi.org/10.15159/AR.23.016>.
16. Liu M, Lu S. Plastoquinone and Ubiquinone in Plants: Biosynthesis, Physiological Function and Metabolic Engineering. *Front Plant Sci.* 2016. Vol. 7. P. 1898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01898>.
17. Martinez Y., Li X., Liu G. et al. The role of methionine on metabolism, oxidative stress, and diseases. *Amino Acids.* 2017. 12(49). P. 2091–2098. <https://doi.org/10.1007/s00726-017-2494-2>.

18. Nakano Y., Asada K. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. *Plant Cell Physiol.* 1981. Vol. 22. P. 867–880.
19. Nezhadahmadi A., Prodhani Z. H., Faruq G. Drought Tolerance in Wheat. *The Scientific World Journal.* 2013. ID 610721. <https://doi.org/10.1155/2013/610721>.
20. Qasim Ali, Muhammad Tariq Javed, Muhammad Zulqurnain Haider, Noman Habib, Muhammad Rizwan, Rashida Perveen, Shafaqat Ali, Mohammed Nasser Alyemini, Hamed A. El-Serehy and Fahad A. Al-Misned. α -Tocopherol Foliar Spray and Translocation Mediates Growth, Photosynthetic Pigments, Nutrient Uptake, and Oxidative Defense in Maize (*Zea mays* L.) under Drought Stress. *Agronomy.* 2020. Vol. 10(9), 1235. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/9/1235>.

Yu. M. Palivoda, V. M. Havii

Nizhyn Mykola Gogol State University, Ukraine

EFFECT OF SEED TREATMENT WITH METABOLIC ACTIVE SUBSTANCES ON ASCORBATE PEROXIDASE ACTIVITY AND ASCORBATE CONTENT IN COMMON WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) SPROUTS UNDER WATER DEFICIT CONDITIONS

The article presents a comparative analysis of the effects of metabolically active substances and their combinations on ascorbate peroxidase activity and ascorbate content in common wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under water deficit conditions simulated using PEG 6000. Ten seed treatment options were studied: control (unprocessed seeds + distilled water); PEG 6000 solution (12 %); vitamin E solution (10-8M) – E; ubiquinone-10 solution (10-8M) – Q; methionine solution (0.001 %) – M; paraoxybenzoic acid (POBA) solution (0.001%) – P; MgSO₄ solution (0.001%) – Mg; combinations: vitamin E (10-8M) + ubiquinone-10 (10-8M) – EQ; vitamin E (10-8M) + methionine (0.001 %) + POBA (0.001 %) – EMP; vitamin E (10-8M) + methionine (0.001 %) + POBA (0.001 %) + MgSO₄ (0.001 %) – EMPMg. The experimental water deficit was simulated using a 12 % PEG 6000 solution.

It was found that simulated drought conditions induced a 63.1% increase in ascorbate peroxidase activity compared to the control. Pretreatment of wheat seeds with compound E resulted in a 65.5 % increase in ascorbate peroxidase activity compared to the control and a 2.4 % increase compared to seedlings under simulated water deficit conditions using PEG 6000.

The activity of ascorbate peroxidase in wheat seedlings after treatment with magnesium sulfate, ubiquinone-10, and the combination of vitamin E + ubiquinone-10 exceeded control values by 47.6 %, 35.7 %, and 31 %, respectively, but did not surpass the levels induced by PEG. This suggests a protective effect of these substances under water deficit conditions but does not completely mitigate the inhibitory effect of PEG 6000.

Under simulated water deficit conditions, the accumulation of ascorbate in seedling tissues exceeded control values by 29.1 %. Treatment with ubiquinone-10 increased ascorbate content by 46.3 %, while treatment with a combination of vitamin E + methionine + POBA + MgSO₄ increased it by 24.2 %. Other treatments also showed increases: vitamin E + methionine + POBA (18.8 %), methionine (13 %), and vitamin E + ubiquinone-10 (7.4 %).

Pre-treatment of wheat seeds with metabolically active substances increased the activity of antioxidant enzymes in wheat seedlings, enhancing drought resistance in the Provintsiialka variety. Therefore, seed treatment with these substances could serve as a component of grain crop cultivation technology under water deficit conditions.

Key words: soft wheat, metabolically active substances, PEG 6000, vitamin E, ubiquinone-10, paraoxybenzoic acid, methionine, MgSO₄, ascorbate peroxidase, ascorbate.

Надійшла 19.03.2024.