УДК 581.1:633.11:632.112

ВПЛИВ ОБРОБКИ НАСІННЯ МЕТАБОЛІЧНО АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ НА ФОТОСИНТЕТИЧНУ ПРОДУКТИВНІСТЬ ПРОРОСТКІВ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ (*TRITICUM AESTIVUM* L.) ЗА МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОГО ДЕФІЦИТУ

Паливода Юлія Миколаївна
аспірантка
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин, Україна
ORCID: 0000-0001-6544-3441
yulia.palivoda@gmail.com

Гавій Валентина Миколаївна
кандидат біологічних наук, доцент
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин, Україна
ORCID: 0000-0002-2804-0456
gaviyv@gmail.com

Пшениця, одна з найважливіших сільськогосподарських культур у світі, виробництво якої є важливим для людства. В Україні серед зернових культур Triticum aestivum L. належить перше місце. Вона займає понад 6 млн га, що становить понад 22 % усіх посівних площ зернових культур.

Серед усіх природних чинників, які негативно впливають на фізіологічні процеси росту і розвитку пшениці та призводять до зниження урожайності, є водний дефіцит, спричинений посухою.

Питання щодо вивчення посухостійкості зернових культур, є актуальними, оскільки вони орієнтовані на вивчення реакцій рослин на водний стрес та впровадження методів підвищення стійкості рослин до посухи. Одним з таких методів є застосування метаболічно активних речовин, що підвищують стійкість зернових культур до різних несприятливих факторів, в тому числі і до посухи.

Метаболічно активні речовини входять до складу багатьох стимуляторів росту та інших препаратів для рослин. Щороку вивчають нові властивості метаболічно активних речовин та їхні перспективи щодо подальшого застосування. Використання метаболічно активних речовин дає змогу краще розкрити потенціал рослини, підвищити стресостійкість і в результаті збільшити продуктивність сільськогосподарських культур.

У статті наведено порівняльну характеристику впливу метаболічно активних речовин та їх комбінацій на формування асиміляційної поверхні, вміст зелених фотосинтетичних пігментів у проростках пшениці м'якої в умовах водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000. Встановлено, що попередня обробка насіння розчинами параоксибензойної кислоти (ПОБК), убіхінону – 10, магній сульфату ($MgSO_4$) та комбінацією вітамін Е + параоксибензойна кислота (ПОБК) + метіонін + магній сульфат ($MgSO_4$) сприяє збільшенню площі асиміляційної поверхні проростків пшениці на 17,7 %, 16,5 %, 16,2 % та 12,1 % відповідно, порівняно з площею асиміляційної поверхні проростків, насіння яких знаходилося в умовах водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000. Обробка насіння розчином убіхінону – 10 та комбінацією вітамін Е + убіхінон – 10 стимулювали синтез хлорофілу у листках пшениці на 14,4 % та 15,4 % відповідно, порівняно з групою рослин, насіння яких пророщували в умовах уповільненого надходження води.

Обробка насіння метаболічно активними речовинами сприяє збереженню оптимальної обводненості тканин за рахунок посилення ксероморфності листків та може бути використана як елементи технології вирощування зернових культур в умовах водного дефіциту.

Ключові слова: *пшениця м'яка, метаболічно активні речовини, ПЕГ 6000, площа асиміляційної поверхні, хлорофіл a і b.*

DOI https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.3.7

Вступ. У світовому рослинництві, зернові культури займають найбільші посівні площі, що свідчить про їх виключно важливе продовольче, кормове і сировинне значення в народному господарстві. До найважливіших зернових культур як в Україні, так і у всьому світі належить пшениця.

На сьогодні одним із важливих завдань сільськогосподарського виробництва є підвищення продуктивності зернових. Через глобальну зміну клімату перед аграріями постала проблема зниження урожайності пшениці.

Одним із найгостріших екологічних стресорів є посуха, яка має виражений негативний вплив на морфологічні, фізіологічні і біохімічні показники, що порушують процеси росту і розвитку пшениці та призводять до зниження урожайності (Pykalo et al., 2019).

Питання щодо вивчення посухостійкості пшениці м'якої (*T. aestivum*) є актуальними, оскільки вони орієнтовані на вивчення реакцій рослин на водний дефіцит та впровадження методів підвищення стійкості рослин до посухи.

Вчені світу займаються питанням вивчення впливу посухи на рослини та пошуком речовин, що підвищують посухостійкість сільськогосподарських рослин, стимулюючи утворення фотосинтетичних пігментів та прискорюють інтенсивність фотосинтезу (Jia P., Melnyk A. et al.,

2021). З'ясовано, що застосування α-токоферолу, підвищує вміст зелених фотосинтетичних пігментів у листках, посилює антиоксидантні механізми кукурудзи Zea mays L. в умовах посухи (Ali et al., 2020). Експериментально доведено, що в стресових умовах вільні амінокислоти впливають на роботу синтезуючого апарату, а деякі з них беруть участь у регуляції метаболізму, визначаючи ефективність роботи фітогормонів (Zaefyzadeh et al., 2009). Обробка насіння саліциловою кислотою збільшує вміст хлоропластних пігментів у листках озимої пшениці. Застосування біологічно активних речовин дає змогу повніше реалізувати потенційні можливості рослин, підвищити їх стійкість до дії різних стресових чинників та збільшити врожай (Maltseva et al., 2011; Zabolotna A. et al., 2021).

На сьогодні у галузі рослинництва часто використовують метаболічно активні речовини, які входять до складу багатьох стимуляторів росту рослин. Щороку вченими вивчаються нові властивості цих речовин та перспективи щодо подальшого їх застосування (Koziuchko & Havii, 2020).

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 даної роботи є дослідження впливу обробки насіння метаболічно активними речовинами на фотосинтетичну продуктивність проростків пшениці м'якої за умов водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000.

Матеріали і методи досліджень. Для дослідження використовували насіння пшениці м'якої (*T. aestivum*) сорту Провінціалка. Цей сорт селекції Носівської селекційно-дослідної станції Миронівського інституту пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України. Він є одним із найбільш придатних сортів для вирощування продовольчого зерна високої якості в зоні Лісостепу та Полісся та характеризується високою посухостійкістю (State register, 2022).

Дослідження проводилися в навчально-науковій лабораторії з біохімічних та медико-валеологічних досліджень Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя. Для моделювання водного дефіциту використовували розчин нейоногенного високомолекулярного полімеру поліетиленгліколю 6000 (ПЕГ 6000) концентрацією 12 %. Для оцінки на стійкість до посухи рекомендується використовувати зазначену концентрацію ПЕГ 6000 (Seldymyrova, 2019; Jia et al., 2021).

Вивчення впливу метаболічно активних речовин на фотосинтетичну продуктивність 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%) – ЕМПMg.

У зазначених концентраціях метаболічно активні сполуки виявили високу ефективність щодо впливу на фотосинтетичну продуктивність зернобобових культур (Koziuchko & Havii, 2020). Повторність дослідів була чотирьохкратна.

Оброблене насіння заливали 20 мл 12 % розчину ПЕГ 6000 і пророщували протягом 10 діб в термостаті при температурі 20 °С.

Площу листкової поверхні визначали за методикою (Yeshchenko et al., 2005). Вміст пігментів – хлорофілів *a, b* і загальний вміст хлорофілів визначали спектрофотометричним методом на *СФ-26* (Pochynok, 1976). Інтенсивність поглинання червоного кольору вимірювали за довжин хвиль 665, 654, 649 нм з етиловим спиртом як стандартом.

Статистично опрацьовували матеріал за допомогою методів математичної статистики з використанням стандартних вбудованих функцій пакета спеціалізованого програмного забезпечення MS Office Excel – 2010.

Результати. Листок – основний асиміляційний орган рослини, в якому утворюються органічні речовини, які слугують структурно-енергетичним матеріалом для всього організму. Розмір асиміляційного листкового апарату та період його активної дії є прямим показником фотосинтетичної активності рослини (Shadchyna et al., 2006).

Листок має найбільші адаптивні властивості до умов навколишнього середовища, що виражається в зміні площі асиміляційної поверхні. За дефіциту води відбувається зменшення площі листкової поверхні та затримка процесів клітинного росту. Ростова реакція належить до головних механізмів захисту рослин пшениці від критичних втрат води в умовах посухи (Zhuk, 2011).

Фізіологічні показники площі асиміляційної поверхні проростків пшениці м'якої за пророщування в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ 6000 із попереднім замочуванням насіння у розчинах метаболічно активних сполук наведені у таблиці 1.

Згідно отриманих нами результатів, асиміляційна поверхня проростків насіння пшениці м'якої за дії метаболічно активних речовин на розчині осмотично-активної речовини ПЕГ 6000 має найменшу площу. Так, у варіанті з посухою площа листкової пластинки зменшилася на 0,6 $см^2$ і становить 81,1 % у порівнянні з контролем. Це одна з найбільш швидких адаптивних реакцій рослин на водний дефіцит – зупинка подальшого збільшення поверхні випаровування через пригні-

Таблиця 1

Площа асиміляційної поверхні проростків пшениці м'якої сорту Провінціалка за умов водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000 за дії метаболічно активних речовин

Варіанти досліду	Площа листкової пластинки, см²	% до контролю
Контроль	3,38±0,18	100,0
ПЕГ	2,74±0,20	81,1
ПЕГ+Е	3,03±0,18#	89,6
ПЕГ+Q	3,30±0,36#	97,6
ПЕГ+М	2,53±0,21	74,9
ПЕГ+П	3,34±0,17#	98,8
ПЕГ+Mg	3,29±0,25#	97,3
ПЕГ+EQ	3,07±0,13#	90,8
ПЕГ+ЕМП	2,89±0,14#	85,5
ПЕГ+ЕМПMg	3,15±0,14#	93,2

 # – Різниця достовірна порівняно з групою рослин, насіння яких пророщували в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ(p<0,05)

Таблиця 2

Вміст хлорофілів a і b у листках проростків пшениці м'якої сорту «Провінціалка» в умовах водного дефіциту за дії метаболічно активних речовин

Варіанти досліду	Хлорофіл *a*		Хлорофіл *b*		*a:b*
	мг/г	% до контролю	мг/г	% до контролю	
Контроль	0,75±0,03	100,0	0,32±0,03	100,0	2,3:1
ПЕГ	0,83±0,03	110,7	0,35±0,01	109,4	2,4:1
ПЕГ+Е	0,79±0,09	105,3	0,34±0,01	106,3	2,3:1
ПЕГ+Q	0,97±0,09#	129,3	0,37±0,01#	115,6	2,6:1
ПЕГ+М	0,92±0,10#	122,7	0,39±0,05#	121,9	2,4:1
ПЕГ+П	0,80±0,03	106,7	0,35±0,01	106,3	2,3:1
ПЕГ+Mg	0,73±0,03	97,3	0,31±0,01	96,9	2,4:1
ПЕГ+EQ	0,95±0,05#	126,7	0,38±0,01#	118,8	2,5:1
ПЕГ+ЕМП	0,72±0,04	96,0	0,30±0,02	93,8	2,4:1
ПЕГ+ЕМПMg	0,84±0,02#	112,0	0,37±0,01#	115,6	2,3:1

 # – Різниця достовірна порівняно з групою рослин, насіння яких пророщували в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ(p<0,05)

чення росту клітин. Існує прямий зв'язок між розміром асиміляційної поверхні і інтенсивністю зневоднення: чим більше площа листя, тим швидше рослина втрачає воду (Kolupaiev, 2010).

Попереднє замочування насіння в розчинах метаболічно активних речовинах усуває інгібуючий вплив змодельованого водного дефіциту. У порівнянні з обробкою ПЕГ найвищі показники площі асиміляційної поверхні мали проростки, насіння, яких зазнало попередньої обробки розчинами П, Q, Mg. Так, за обробки насіння пшениці *T. aestivum* розчином П в умовах водного дефіциту площа асиміляційної поверхні проростків зросла на 17,7 %, за обробки розчином Q – на 16,5 %, за обробки Mg – на 16,2 % порівняно з площею асиміляційної поверхні проростків, насіння яких знаходилося в умовах водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000. Висока ефективність щодо збільшення площі асиміляційної поверхні проростків пшениці в умовах посухи була відмічена також при використанні комбінації ЕМПMg.

Основним джерелом синтезу й нагромадження рослинами біомаси є процес фотосинтезу. Головними фотосинтезуючими пігментами вищих рослин є хлорофіли *a* та *b*, оскільки продуктивність фотосинтетичного апарату тісно пов'язана з їх вмістом у листках.

У табл. 2 відображений вплив метаболічно активних сполук на вміст хлорофілів *a* і *b* та їх співвідношення у листках проростків пшениці м'якої пророщених в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ 6000.

Дослідження впливу метаболічно активних речовин на вміст хлорофілу *a* в листках проростків пшениці м'якої (*T. aestivum*) показали, що обробка насіння пшениці м'якої розчином Q та комбінацією EQ найефективніше стимулювали синтез хлорофілу *a* в умовах водного дефіциту, перевищуючи показники контролю на 29,3 %, та на 26,7 % відповідно, а показники проростків, насіння яких що знаходилося в змодельованих умовах посухи, – на 16,9 % та 14,3 % відповідно. Висока ефективність щодо вмісту хлорофілу *a* була відмічена також при використанні розчину М.

Схожа тенденція простежується і при дослідженні вмісту хлорофілу *b* (табл. 2). Так, обробка насіння розчином М мало найкращий вплив на вміст пігменту – перевищення контролю на 21,9%, а посухи – на 12,3 %. Дещо нижча ефективність щодо підвищення вмісту хлорофілу *b* за обробки насіння комбінацією EQ – значення фотосинтетичного показника підвищилося порівняно з контролем на 18,8 %, а з посухою на 9,2 %.

Досліджувані метаболічно активні речовини показали позитивний вплив на співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b*, що становить відповідно 2,4:1 та відповідає нормальному співвідношенню згідно наукових даних.

Результати дослідження впливу метаболічно активних речовин на вміст загального хлорофілу в листках проростків пшениці в умовах водного дефіциту представлено у табл. 3. Показано, що обробка насіння пшениці комбінацією EQ збільшила показник суми хлорофілів *a* і *b* у листках на 27,8 % порівняно з контролем і на 15,4 % порівняно з проростками, насіння яких знаходилося в умовах посухи. Висока ефективність щодо вмісту загального хлорофілу листках проростків пшениці в умовах посухи була відмічена також при використанні таких метаболічно активних речовин як Q та M.

Таблиця 3

Вміст загального хлорофілу у листках проростків пшениці м'якої сорту «Провінціалка» в умовах водного дефіциту за дії метаболічно активних речовин

Варіанти досліду	Хлорофіл *a* + *b*	
	мг/г	% до контролю
Контроль	0,97±0,05	100
ПЕГ	1,09±0,04	112,4
ПЕГ+E	1,09±0,04	112,4
ПЕГ+Q	1,23±0,07#	126,8
ПЕГ+M	1,20±0,15#	123,7
ПЕГ+П	1,09±0,03	112,4
ПЕГ+Mg	0,99±0,05	102,1
ПЕГ+EQ	1,24±0,05#	127,8
ПЕГ+ЕМП	0,96±0,06	99,0
ПЕГ+ЕМПMg	1,17±0,07#	120,6

 # – Різниця достовірна порівняно з групою рослин, насіння яких пророщували в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ(p<0,05)

Обговорення. Посуха є одним із екологічних факторів, що обмежують фотосинтез рослин. Фотосинтетична система дуже чутлива до гальмівних факторів навколишнього середовища, і стрес від посухи призводить до пошкодження реакційних центрів. (Khayatnezhad & Gholamin, 2012). Сучасний стан досліджень проблеми фотосинтезу дає підставу вважати, що фотосинтетична діяльність сільськогосподарських культур є основою їх продуктивності й значною мірою залежить від вмісту пігментів у рослинах (Shin et al., 2021).

Концентрація хлорофілу вважається чутливим індикатором стану рослини і стійкості її до водного стресу. Вчені Ірану та Азербайджану довели, що існує тісна взаємодія між генотипами та водним дефіцитом на вміст хлорофілу у різних сортів твердої пшениці (Zaefyzadeh et al., 2009). Згідно їх досліджень вміст хлорофілу під час водного дефіциту підвищується у сортів які мають високий індекс посухостійкості і зменшується у нестійких сортів. Це пояснюється вищим рівнем антиоксидантів у посухостійких сортів пшениці та більшою стійкістю молекул хлорофілу до окисного пошкодження.

У багатьох працях повідомляється про зниження вмісту хлорофілу і зміни співвідношення хлорофілів *a* і *b* внаслідок тривалої ґрунтової посухи (Morhun et al., 2002; Sokolovska-Serhiienko & Stasyk, 2008; Jia et al., 2021). У дослідженнях, де вивчали наслідки м'якої і помірної посухи, було показано незмінність вмісту хлорофілів (Flexas & Medrano, 2002).

Вважають, що вміст хлорофілу починає знижуватись тільки тоді, коли асиміляція CO_2 тривалий час була дуже пригніченою. Нетривала ґрунтова посуха не впливала на концентрацію хлорофілу у дослідних рослин посухостійких сортів озимої пшениці (Sokolovska-Serhiienko& Stasyk, 2008).

У працях Шматька та співавторів (Shmatko et al., 1989) показано, що за умов водного дефіциту посухостійкі сорти озимої пшениці характеризувалися стійкою пігментною системою порівняно із нестійкими сортами.

Інтенсивність фотосинтезу та вміст фотосинтетичних пігментів у рослинах залежить від мінерального живлення. Застосування метаболічно активних сполук для попередньої обробки насіння викликає певні зміни в пігментному складі листків (Koziuchko et al., 2020).

Використання метаболічно активних речовин дає змогу знизити шкідливий вплив природних чинників та збільшити продуктивність сільськогосподарських культур (Nardi et al., 2016).

У роботі ми досліджували вплив метаболічно активних речовин в умовах водного дефіциту на площу асиміляційної поверхні та вміст хлорофілів *a* та *b* у листках проростків пшениці м'якої.

Одним з факторів оптимізації функціонування асиміляційної поверхні в умовах водного дефіциту є рівень мінерального живлення (Terek, 2007). З'ясовано, що попередня обробка насіння розчинами П, Q, Mg та комбінацією ЕМПMg збільшує площу асиміляційної поверхні проростків порівняно з проростками, насіння яких знаходилося в умовах водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000. Це пов'язано з тим, що метаболічно активні речовини відіграють важливу роль у функціонуванні рослинного організму. Зокрема, убіхінон – 10 залучений до біоенергетичних процесів, захисту від пошкоджуючої дії активних форм кисню та продуктів окислення, виступає в якості ефективного імуностимулятора (Liu & Lu, 2016). Параоксибензойна кислота регулює активність комплексу антиоксидантних ферментів та виконує в клітині функцію сигнальних молекул при формуванні захисних реакцій (Barkosky & Einhellig, 2003). $MgSO_4$ є для рослинного організму одним із джерел магнію, який необхідний для функціонування понад 300 ферментів. Окрім того, що магній є центральним атомом молекули хлорофілу, він бере участь у численних фізіологічних процесах під час росту та розвитку рослин. Сульфур контролює ріст і розвиток рослини, також, як і магній, відіграє роль у синтезі білків, ферментів, метаболізмі, в окисно-відновних процесах клітини, підвищує стійкість до стресових умов, активізує відновні процеси (Guo et al., 2015; Chornyi, 2020). Метіонін задіяний у багатьох метаболічних процесах рослинних організмів. Зокрема, він потрібний для

біосинтезу білків, бере участь у регулюванні стану листкових продихів та оптимізації обміну води в рослинному організмі. Активна форма метіоніну, S-аденозилметіонін, виконує ключові функції як основний донор метильної групи і як попередник метаболітів, як-от етилен, поліаміни, вітамін B1, 3-диметилсульфоніопропіонат (осмопротектор), і як джерело сірки: диметилсульфід (Hildebrandt et al., 2015).

Вітамін Е є сильним антиоксидантом, який рослини використовують як складову захисних систем проти окиснювального стресу. Високий вміст токоферолів зумовлює стійкість до засолень, посухи, дії важких металів, озону, УФ-променів тощо. Токофероли захищають рослини на ранніх етапах росту від згубної дії активних форм кисню, що утворюються під час активних біохімічних процесів у молодій рослині (Sattler et al., 2004, Jia et al., 2022).

Високий вміст хлорофілу *a* та *b*, на нашу думку, пояснюється високим показником адаптаційного потенціалу дослідних рослин, що забезпечується ефективною роботою фотосинтетичного апарату асиміляційних органів. Це пов'язано з тим, що однією із найважливіших функцій убіхінону – 10 є транспорт електронів у дихальному ланцюзі під час фотосинтезу. Разом із пластохіноном він є складовою хімічних реакцій фотофосфорилювання та окислювального фосфорилювання відповідно в тилакоїдах хлоропластів. Окрім того, убіхінон – 10 є антиоксидантом (Liu & Lu, 2016). Метіонін – це сірковмісна амінокислота, яка приймає участь у синтезі білків, ферментів, фітогормонів і низки інших необхідних для рослинного організму сполук. Саме фітогормональний баланс забезпечує нормальне проходження фотосинтезу.

Обробка насіння м'якої пшениці розчинами метаболічно активних сполук, таких як Q, EQ, M, ЕМПMg забезпечує кращу адаптацію рослин до умов водного дефіциту. В ході наших досліджень з'ясовано, що збільшення вмісту зелених фотосинтетичних пігментів за відносно незначної площі асиміляційної поверхні є показником ксеноморфної структури листків, що вказує на високу адаптаційну здатність рослин до умов посухи. Вченими з'ясовано, що запобігання висиханню досягається завдяки морфологічній, анатомічній пристосованості рослин до збереження оптимальної обводненості тканин при сухості повітря та ґрунту. Це здійснюється трьома основними напрямами: регулювання втрати води за допомогою ксероморфної будови листків (невелика площа листкової поверхні при інтенсивному розвитку палісадної паренхіми і високому вмісту фотосинтетичних пігментів); посилення поглинання води з ґрунту завдяки збільшенню потужності кореневої системи та зниженню водного потенціалу коренів; накопичення води та активізація її транспорту (Zlobin, 2004). У попередніх наших дослідженням показано, що обробка насіння розчинами метаболічно активних сполук стимулювала утворення коренів на проростках пшениці в умовах водного дефіциту (Palyvoda et al., 2021).

Таким чином, застосування попередньої обробки насіння метаболічно активними речовинами пшениці м'якої (*T. aestivum L.*) та росту кореневої системи. Це підвищує посухостійкість пшениці м'якої та дає можливість зберегти високу продуктивність сільськогосподарських культур за умов водного дефіциту.

Висновки. Встановлено, що використання метаболічно активних речовин в умовах посухи сприяло оптимізації формування та функціонування асиміляційної поверхні рослин пшениці м'якої сорту Провінціалка. Найбільш ефективними метаболічно активними речовинами, які стимулюють збільшення фотосинтетичної поверхні проростків пшениці в умовах посухи є розчини: П, Q, Mg та комбінація ЕМПMg.

Досліджувані комбінації метаболічно активних речовин стимулювали синтез хлорофілу у листках пшениці в умовах водного дефіциту. Найвищі показники були виявлені при обробці насіння розчином Q та комбінацією EQ.

Попередня обробка насіння розчинами Q, M та комбінацією EQ сприяє максимальній реалізації фотосинтетичної продуктивності в умовах дефіциту вологи за рахунок посилення ксероморфної будови листків, тому, подальше вивчення впливу вище зазначених речовин 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.

Бібліографічні посилання:

1. Ali, Q., Javed, M., Haider, M., Habib, N., Rizwan, M., Perveen, R., Ali, S., Alyemeni, M., El-Serehy, H. & Al-Misned, F. (2020) α-Tocopherol foliar spray and translocation mediates growth, photosynthetic pigments, nutrient uptake, and oxidative defense in Maize (Zea mays L.) under drought stress. Agronomy. Vol. 10, No. 9, P.1235.
2. Barkosky, R.R. & Einhellig, F.A. (2003) Allelopathic interference of plant water relationships by para-hydroxybenzoic acid. Botanical Bulletin of Academia Sinica., 44, 53–58
3. Chornyi, S.H. (2020). Osnovy ahronomichnoi khimii: navchalnyi posibnyk [Fundamentals of agronomic chemistry: a textbook]. MNAU, Mykolaiv, 284 (in Ukrainian)
4. Derzhavnyi reiestr sortiv roslyn, prydatnykh dlia poshyrennia v Ukraini na 2022 rik [State register of plant varieties suitable for dissemination in Ukraine] (2022) (Chynnyi vid 2022-09-08). Vyd. ofits. Kyiv. 526. (in Ukrainian)
5. Flexas, J. & Medrano, H. (2002) Energy dissipation in C3 plants under drought. Funct. Plant Biology, 29(10), 1209–1215.
6. Guo, W., Chen, S., Hussain, N., Cong, Y., Liang, Z. & Chen, K. (2015) Magnesium stress signaling in plant: just a beginning. Plant Signal Behav., 10(3), Article: e992287

7. Hildebrandt, T.M., Nunes-Nesi, A., Araújo, W.L. & Braun, H.P. (2015) Amino Acid Catabolism in Plants. Mol Plant. Vol 8(11). P.1563–79.

8. Jia, P., Melnyk, A. & Zhang, Z. (2022). Differential adaptation of root and shoot to salt stress correlates with antioxidant capacity in mustard. Pakistan journal of botany, 54(6), 2001–2011 doi: 10.30848/PJB2022-6(32)

9. Jia, P., Melnyk, A., Li L., Kong, X., Dai, H., Zhang, Z. & Butenko, S. (2021). Effects of drought and rehydration on the growth and physiological features of mustard seedlings. Journal of Central European Agriculture, 22(4), 836–847 doi: 10.5513/JCEA01/22.4.3246.

10. Jia, P., Melnyk, A., Zhang, Z., Butenko, S. & Kolosok, V. (2021). Effects of seed pre-treatment with plant growth compound regulators on seedling growth under drought stress. Agraarteadus, 32(2), 251–256 doi: 10.15159/jas.21.35.Khayatnezhad, M. & Gholamin, R. (2012) The effect of drought stress on leaf chlorophyll contentand stress resistance in maize cultivars (Zea mays). African Journal of Microbiology Research, 6 (12), 2844–2848.

11. Kolupaiev, Yu.Ye. (2010) Osnovy fiziolohii stiikosti roslyn: Kurs lektsii [Basics of physiology of plant resistance: Course of lectures]. Kharkiv. 121 (in Ukrainian).

12. Koziuchko, A. & Havii, V. (2020) Efektyvnist vplyvu peredposivnoi obrobky nasinnia metabolichno aktyvnymy rechovynamy ta rehuliatorom rostu roslyn «vympel» na asymiliatsiini protsesy soi sortu annushka u fazi tsvitinnia Roslyn [The effectiveness of the influence of pre-sowing treatment of seeds with metabolically active substances and plant growth regulator «Pennant» on the assimilation processes of Annushka soybeans in the flowering phase of plants]. Zbirnyk naukovykh prats ΛΌΗΟΣ. Tom 2. 82–85. (in Ukrainian).

13. Koziuchko, A.H., Havii, V.M. & Kuchmenko, O.B. (2020) Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia metabolichno aktyvnymy rechovynamy na okremi fiziolohichni pokaznyky soi sortu Annushka ta yii produktyvnist [The effect of pre-sowing treatment of seeds with metabolically active substances on certain physiological indicators of Annushka soybean and its productivity]. Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biolohiia. Ternopil : TNPU im. V. Hnatiuka, 1–2 (79), 84–90. doi: 10.25128/2078-2357.21.4.11 (in Ukrainian).

14. Liu, M. & Lu, S. (2016) Plastoquinone and Ubiquinone in Plants: Biosynthesis, Physiological Function and Metabolic Engineering. Front Plant Sci., 7, 1898.

15. Maltseva, N.M., Haievskyi, A.P. & Derevianko, K.Iu. (2011) Vplyv biolohichno aktyvnykh rechovyn ta yikh kompozytsii na vmist fotosyntetychnykh pihmentiv u lystkakh ozymoi pshenytsi v umovakh defitsytu fosforu [The influence of biologically active substances and their compositions on the content of photosynthetic pigments in winter wheat leaves under conditions of phosphorus deficiency]. Fyzyolohyia y byokhymyia kult. Rastenyi, 43(5), 403–411. (in Ukrainian).

16. Morhun, V.V., Hryhoriuk, I.P. & Nyzhnyk, T.P. (2002) Pihmentnyi fond khloroplastiv v lystkakh sortiv za umov posukhy ta obrobky polistymulinom K [The pigment fund of chloroplasts in the leaves of cultivars under conditions of drought and treatment with polystimulin K]. Naukovi zapysky Ternopil. ped. un-tu. Ser. Biolohiia, 3, 180–186. (in Ukrainian).

17. Nardi, S., Pizzeghello, D., Schiavon, M. & Ertani, A. (2016) Plant biostimulants: physiological responses induced by protein hydrolyzed-based products and humic substances in plant metabolism. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), 73(1), 18–23

18. Palyvoda, Iu.M., Havii, V.M. & Kuchmenko, O.B. (2021) Fizioloho-biokhimichni pokaznyky prorostkiv pshenytsi miakoi (*Triticum aestivum* L.) pry modeliuvanni vodnoho defitsytu za dii metabolichno aktyvnykh spoluk [Physiological and biochemical indicators of common wheat seedlings (Triticum aestivum L.) in the simulation of water deficit under the action of metabolically active compounds]. Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biolohiia. Ternopil: TNPU im. V. Hnatiuka, 3(81), 44–54. doi: 10.25128/2078-2357.21.3.7 (in Ukrainian).

19. Pochynok, Kh.N. (1976). Metody biokhimichnoho analizu Roslyn [Methods of biochemical analysis of plants]. Naukova dumka, Kyiv, 336 (in Ukrainian)

20. Pykalo, S.V., Demydov, O.A., Yurchenko, T.V., Prokopik, N.I. & Kharchenko, M.V. (2019) Porivnialna otsinka metodiv vyznachennia posukhostiikosti sortiv pshenytsi miakoi ozymoi [Comparative assessment of methods for determining drought tolerance of soft winter wheat varieties]. Science Rise: Biological Science, 4, 19, 17–21 (in Ukrainian).

21. Sattler, S.E., Gilliland, L.U., Magallanes-Lundback, M., Pollard, M. & Della Penna, D. (2004). Vitamin E Is Essential for Seed Longevity and for Preventing Lipid Peroxidation during Germination. The Plant Cell., 16, 1419–1432.

22. Seldymyrova, O.A. (2019) Testyrovanye selektyvnыkh ahentov dlia otsenky yarovoi miahkoi pshenytsы na ustoichyvost k zasukhe [Testing of selective agents for evaluation of spring soft wheat for drought resistance]. Ekobyotekh, 2(1), 51–62 (in Russian).

23. Shadchyna, T.M., Huliaiev, B.I. & Kirizii, D.A. (2006) Rehuliatsiia fotosyntezu i produktyvnist roslyn: fiziolohichni ta ekolohichni aspekty [Regulation of photosynthesis and plant productivity: physiological and ecological aspects]. Fitosotsiotsentr, Kyiv, 384 (in Ukrainian).

24. Shin, Y.K., Bhandari, S.R., Jo, J.S., Song, J.W. & Lee, J.G. (2021) Effect of Drought Stress on Chlorophyll Fluorescence Parameters, Phytochemical Contents, and Antioxidant Activities in Lettuce Seedlings. Horticulturae, 7, 238

25. Shmatko, Y.H., Hryhoriuk, Y.A. & Shvedova, O.E. (1989) Ustoichyvost rastenyi k vodnomu y temperaturnomu stressam [Resistance of plants to water and temperature stress]. Nauk. dumka, Kyev, 224 (in Russian).

26. Sokolovska-Serhiienko, O.H. & Stasyk, O.O. (2008) Osoblyvosti reaktsii fotosyntetychnoho aparatu kontrastnykh za posukhostiikistiu sortiv ozymoi pshenytsi na gruntovu posukhu [Peculiarities of the reaction of the photosynthetic apparatus of winter wheat varieties contrasting in terms of drought resistance to soil drought]. Visnyk. Ukr. tov-va henetykiv i selektsioneriv, 6(1), 137–144 (in Ukrainian).

27. Terek, O.I. (2007). Rist roslyn: navchalnyi posibnyk [Plant growth: a study guide]. Vyd-vo Lvivskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Franka, Lviv, 248 (in Ukrainian).

28. Yeshchenko, V.O., Kopytko, P.H. & Opryshko V.P. (2005) Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii [Fundamentals of scientific research in agronomy]. Diia, Kyiv, 288 (in Ukrainian).
29. Zabolotna, A.V., Zabolotnyi, O.I., Rozborska, L.V., Zhyliak, I.D. & Datsenko, A.A.. (2021) Vmist pihmentiv i chysta produktyvnist fotosyntezu kukurudzy za vykorystannia rehuliatoriv rostu roslyn [Pigment content and net photosynthetic productivity of maize using plant growth regulators]. Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia «Ahronomiia i biolohiia», 4 (46), 9–15. (in Ukrainian).
30. Zaefyzadeh, M., Quliyev, R.A., Babayeva, S.M. & Abbasov, M.A.(2009) The Effect of the Interaction between Genotypes and Drought Stress on the Superoxide Dismutase and Chlorophyll Content in Durum Wheat Landraces. Turk J Biol., 33, 1–7.
31. Zhuk, O.I. (2011) Formuvannia adaptyvnoi vidpovidi roslyn na defitsyt vody.[Formation of adaptive response of plants to water deficit]. Fyzyolohyia y byokhymyia kult. Rastenyi, 43(1), 26–37 (in Ukrainian).
32. Zlobin, Yu.A. (2004) Kurs fiziolohii i biokhimii roslyn: pidruchnyk [Course of physiology and biochemistry of plants: textbook]. VTD «Universytetska knyha», Sumy, 464. (in Ukrainian).

Palivoda Yu.M., *PhD student, Nizhyn Mykola Gogol State University, Ukraine*
Haviy V.M., *PhD (Biological Sciences), Nizhyn Mykola Gogol State University, Ukraine*

The effect of seed treatment with metabolically active substances on the photosynthetic productivity of common wheat (Triticum aestivum L.) seedlings under simulation of water deficit

Wheat one of the most important agricultural crops in the world, the production of which is important for mankind. In Ukraine, Triticum aestivum L. ranks first among grain crops. It occupies more than 6 million hectares, which is more than 22% of all grain crops.

Among all the natural factors that negatively affect the physiological processes of growth and development of wheat and lead to a decrease in productivity, there is a water deficit caused by drought.

Questions regarding the study of the drought resistance of grain crops are relevant, as they are focused on the study of plant reactions to water stress and the implementation of methods of increasing plant resistance to drought. One of these methods is the use of metabolically active substances that increase the resistance of grain crops to various adverse factors, including drought.

Metabolically active substances are part of many growth stimulants and other preparations for plants. New properties of metabolically active substances and their prospects for further use are studied every year. The use of metabolically active substances makes it possible to better reveal the plant's potential, increase stress resistance and, as a result, increase the productivity of agricultural crops.

The article provides a comparative description of the influence of metabolically active substances and their combinations on the formation of the assimilation surface, the content of green photosynthetic pigments in common wheat seedlings under conditions of water deficit, simulated using PEG 6000. It was established that pretreatment of seeds with solutions of paraoxybenzoic acid (POBA), ubiquinone – 10, magnesium sulfate ($MgSO_4$) and the combination of vitamin E + paraoxybenzoic acid (POBA) + methionine + magnesium sulfate ($MgSO_4$) helps to increase the assimilation surface area of wheat seedlings by 17.7%, 16.5%, 16.2% and 12.1%, respectively, compared to the area of the assimilation surface of seedlings whose seeds were in conditions of water deficit, simulated using PEG 6000. Treatment of seeds with a solution of ubiquinone - 10 and a combination of vitamin E + ubiquinone – 10 stimulated the synthesis of chlorophyll in wheat leaves by 14.4% and 15.4%, respectively, compared to the group of plants whose seeds were germinated under conditions of slow water supply.

Treatment of seeds with metabolically active substances contributes to the preservation of optimal hydration of tissues by increasing the xeromorphism of leaves and can be used as elements of the technology of growing grain crops in conditions of water deficit.

Key words: *soft wheat, metabolically active substances, PEG 6000, assimilation surface area, chlorophyll a and b.*