

<https://doi.org/10.15407/frg2023.04.326>

УДК 581.132.1+58.02+631.87

СТАН ФОТОСИНТЕТИЧНОГО АПАРАТУ І ПРОДУКТИВНІСТЬ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ ЗА ОБРОБКИ КОМПЛЕКСНИМИ МІКРОДОБРИВАМИ-БІОСТИМУЛЯТОРАМИ

О.Г. СОКОЛОВСЬКА-СЕРГІЄНКО, А.С. КЕДРУК, Н.М. МАХАРИНСЬКА,
Г.О. ПРЯДКІНА, О.О. СТАСИК

*Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17
e-mail: sokolovska_oksana@ukr.net*

В умовах дрібноділянкового дослідження вивчали вплив комплексних мікродобрив-біостимуляторів, створених на основі екстракту водоростей і суміші амінокислот, на стан фотосинтетичного апарату впродовж репродуктивного періоду розвитку, що проходив за наростання дефіциту атмосферних опадів і підвищеної температури повітря, та продуктивність рослин сорту озимої пшениці Малинівка. Позакореневу обробку дослідних рослин розчинами мікродобрив-біостимуляторів «квантум сіамін» (на основі екстракту водоростей) або «квантум аміномакс» (з суміші амінокислот) виробництва ТОВ «НВК Квадрат» проводили двічі: наприкінці фази виходу в трубку і у фазу формування зернівки. Кількість опадів за період від фази цвітіння до воскової стиглості зерна становила 24 мм (33 % кліматичної норми), середньодобова температура досягала 21,3 °С (+1,8 °С до кліматичної норми), що відповідає значенню гідротермічного коефіцієнта Селянінова 0,38 (дуже посушливі умови). Встановлено, що у фазу цвітіння оброблені препаратами рослини незначно відрізнялися від контрольних за показниками потужності розвитку фотосинтетичного апарату та активністю хлоропластних антиоксидантних ферментів супероксиддисмутази (СОД) і аскорбатпероксидази (АПО). Однак у фазу молочно-воскової стиглості рослини дослідних варіантів мали істотно вищі значення листового і хлорофільного індексів посіву через збереження більшої площі фотоасиміляційної поверхні листків та вмісту фотосинтетичних пігментів, а також нижчу активність СОД і АПО порівняно з контрольними рослинами. Зниження активності ферментів, які беруть участь у псевдоциклічному транспорті електронів на кисень, у поєднанні з кращим збереженням фотосинтетичного апарату листків свідчить про менший ступінь стресу та ефективнішу адаптацію до несприятливих умов у дослідних рослин. Обробка препаратом сіамін підвищувала врожайність у розрахунку на одиницю площі посіву на 15 % ($p = 0,045$), а препаратом аміномакс — на 11 %, проте у цьому варіанті статистична достовірність ефекту була недостатньо високою ($p = 0,08$).

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., мікродобрива-біостимулятори, посуха, хлорофіл, листовий індекс, супероксиддисмутаза, аскорбатпероксидаза, продуктивність.

Цитування: Соколовська-Сергієнко О.Г., Кедрук А.С., Махаринська Н.М., Прядкіна Г.О., Стасик О.О. Стан фотосинтетичного апарату і продуктивність озимої пшениці за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами. *Фізіологія рослин і генетика*. 2023. 55, № 4. С. 326–343. <https://doi.org/10.15407/frg2023.04.326>

Нині перед аграрним виробництвом постав величезний виклик — забезпечити їжею зростаюче населення планети, яке за оцінками аналітиків ООН до 2030 р. досягне 8,5 млрд [1]. Попит на основні продукти харчування на сьогодні перевищує приріст урожайності, що вказує на можливу нестачу їжі вже у середині ХХІ ст. [2].

Пшениця — одна з найважливіших для продовольчої безпеки сільськогосподарських культур, яка є основою забезпечення їжею, кормами і зерновою сировиною для багатьох країн світу [3]. Для України виробництво зерна пшениці також є важливим джерелом експортних доходів. За даними Міністерства економіки у 2019/2020 маркетинговому році, Україна експортувала 20,5 млн т пшениці [4]. Експорт зернових, з яких третина припадає на пшеницю, забезпечив 19,2 % загального обсягу експортних надходжень.

Разом із тим кліматичні зміни, пов'язані з глобальним потеплінням, загрожують виробництву зерна пшениці. Останнє десятиліття було визнано найтеплішим за всю історію спостережень. В Україні, за даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, середня річна температура з початку ХХ ст. зросла більш як на 2 °С, в тому числі на 1,2 °С — за останні 30 років [5]. При цьому майже удвічі збільшилася повторюваність днів влітку з максимальними температурами понад 35 і 40 °С, що належить до екстремальних погодних явищ. На більшій частині України спостерігається тенденція до посилення посух, збільшення кількості й тривалості спекотних періодів.

Встановлено, що екстремальні температури і нестача опадів зумовлюють 40 % варіабельності виробництва пшениці [6]. Нещодавні дослідження визначили істотне підвищення ризику втрат врожаю внаслідок поєднання спеки і посухи [7]. Скорочується життєвий цикл рослин, зменшується їх фотосинтетична продуктивність та змінюється кількість, розмір і склад насіння. Сільськогосподарські рослини, зокрема пшениця, особливо вразливі до пошкоджувальної дії комбінації цих стресорів під час репродуктивного періоду розвитку, що зумовлює необхідність подальших досліджень можливостей збільшення стійкості культур до дії стресорів у цей період [8]. Крім погодних умов посіви пшениці піддаються численним впливам інших біотичних та абіотичних стресорів. Так, культурні рослини потерпають від дії гербіцидів, які застосовуються для захисту посівів від бур'янів [9].

Ключовим чинником втрат врожайності за дії різних стресорів є зниження фотосинтетичної продуктивності посівів у результаті скорочення площі асиміляційної поверхні, зменшення хлорофільного індексу (загального вмісту хлорофілу в надземній біомасі на одиницю площі посіву), а також інгібування активності фотосинтетичного апарату [10, 11]. Зниження інтенсивності асиміляції CO₂ внаслідок зменшення відкритості продихів, зумовленого потребою оптимізації водного режиму рослин, або порушень функціонування циклу Кальвіна—Бенсона спричиняє енергетичний дисбаланс у хлоропластах, надвідновлення компонентів електрон-транспортного ланцюга, що супроводжується активізацією переносу електронів на кисень і утво-

ренням супероксидного аніон-радикала та інших токсичних активних форм кисню (АФК), які можуть пошкоджувати компоненти фотосинтетичних мембран і строми хлоропластів [12, 13]. У відповідь у хлоропластах активуються елементи антиоксидантної захисної системи, найважливішим компонентом якої є система антиоксидантних ферментів — СОД і АПО [14]. У серії послідовних реакцій вони знешкоджують супероксидний аніон-радикал і пероксид водню, що утворюються в хлоропластах, і забезпечують цілісність фотосинтетичних мембран та активне функціонування електрон-транспортного ланцюга.

Водночас АФК є компонентами основних сигнальних систем, що індукують і регулюють процеси адаптації фотосинтетичного апарату та рослини загалом, у ході яких критично важливим є підтримання оптимального балансу АФК і антиоксидантних систем [15, 16]. Комплексна і різнорівнева система адаптаційних змін сприяє підтриманню активності життєвих функцій організму, зокрема збереженню високої активності фотосинтетичного апарату протягом вегетації. Для рослин озимої пшениці підтримання функціональної активності фотосинтетичного апарату листків на пізніх етапах репродуктивного розвитку забезпечує кращі умови наливання зерна і формування вагомого врожаю [17].

В останні роки активно вивчають і впроваджують у практику агро-виробництва широкий спектр фізіологічно активних препаратів-біостимуляторів, виготовлених переважно з природної сировини, які здатні активувати адаптаційні процеси і протидіяти впливу негативних чинників саме за рахунок підтримання гомеостазу АФК і антиоксидантних систем [18]. Показано, що біостимулятори поліпшують проростання, ріст і продуктивність сільськогосподарських культур, ефективність використання основних елементів мінерального живлення та якість продукції, а також підвищують стійкість до широкого діапазону абіотичних стресів (засолення, посухи, дефіциту макро- і мікроелементів у ґрунті, підвищеної температури).

Одними з найпоширеніших є препарати, виготовлені на основі екстрактів водоростей, гумінових кислот, гідролізатів білків рослинного і тваринного походження [19]. Їх зазвичай збагачують мікроелементами з огляду на те, що вони входять до складу активних центрів багатьох ферментів, беруть участь в окисно-відновних реакціях азотного й вуглецевого обміну, метаболічних реакціях, пов'язаних зі знешкодженням АФК та інших токсичних продуктів, підтриманням редокс гомеостазу в рослинних клітинах і тканинах [20, 21]. Згідно з літературними даними, за обробки рослин препаратами, до складу яких входили мікроелементи, підвищувалась активність антиоксидантних ферментів, що сприяло ліпшому захисту від АФК за несприятливих умов вирощування [22, 23]. Позакореневе підживлення посівів пшениці комплексом мікроелементів, хелатованих природними карбоновими кислотами, і біостимулятором з екстракту водоростей енерген (AV EKO-COLOR s.r.o., Чехія) істотно підвищувало чисту продуктивність фотосинтезу посіву в репродуктивний період розвитку, активність антиоксидантних ферментів у листках і зернову продуктивність озимої пшениці [24].

Метою нашої роботи було дослідити вплив обробки рослин комплексними мікродобривами-біостимуляторами сіамін та аміномакс, створеними на основі екстракту водоростей і суміші амінокислот, на стан фотосинтетичного апарату в репродуктивний період розвитку та врожайність озимої пшениці.

Методика

Дослідження проводили в умовах дрібноділянкового досліду (площа ділянки — 1,5 м²) на рослинах озимої м'якої пшениці (*Triticum aestivum* L.) сорту Малинівка, що характеризується високою посухостійкістю та екологічною пластичністю [25]. Ґрунти під посівами світло-сірі, опідзолені, легкосуглинкові. Агротехніка й догляд за посівами — загальноприйняті для цієї культури у лісостеповій агрокліматичній зоні [25]. Норма висівання насіння становила 600 зернин на м². В основне внесення і впродовж вегетації вносили 145 кг азоту та по 75 кг фосфору і калію у перерахунку на 1 га (N₁₄₅P₇₅K₇₅). Повторність триразова.

Метеорологічні умови протягом періоду вегетації пшениці озимої вирізнялися деякими особливостями порівняно з середніми багаторічними (табл. 1). Репродуктивні органи у травні формувалися за низьких температур, середньомісячна температура була на 1,1 °С нижчою від кліматичної норми. Розвиток і наливання зернівок, навпаки, відбувалося за істотно підвищених температур: у червні — на 1,8 °С, у липні — на 3,3 °С вище кліматичної норми. В окремі дні останньої декади червня (фаза воскової стиглості, ВВСН 83) максимальна температура повітря перевищувала 35 °С (7,8—8,0 °С вище кліматичної норми). Несприятливий вплив підвищених температур у червні підсилювала значна нестача опадів (33 % норми).

Значення гідротермічного коефіцієнта Селянінова [26] свідчать, що погодні умови впродовж репродуктивного періоду не були сприятливими для формування врожаю посівів. Рівень вологозабезпечення території у травні був надмірним (ГТК = 1,78), проте вже у червні, у період проходження фенологічних фаз цвітіння—воскова стиглість, умови вирощування були дуже посушливими у (0,38), а в липні, у період фаз воскова стиглість—дозрівання — посушливими (0,85). Отже, формування і наливання зернівок проходило за умов підвищених температур і нестачі вологи у ґрунті.

Позакореневу обробку дослідних рослин розчинами комплексних мікродобрив «квантум сіамін» (сіамін) або «квантум аміномакс»

ТАБЛИЦЯ 1. Відхилення метеорологічних умов від кліматичної норми та гідротермічний коефіцієнт (ГТК) Селянінова протягом весняно-літньої вегетації пшениці озимої 2021 р.

Місяць	Температура, °С		Сума опадів за місяць		Гідротермічний коефіцієнт Селянінова
	Фактична	Відхилення від норми	Фактична, мм	% норми	
Травень	14,4	-1,1	77	119	1,78
Червень	21,3	+1,8	24	33	0,38
Липень	24,6	+3,3	63	92	0,85

(аміномакс) виробництва ТОВ «НВК «Квадрат» у дозі 200 л/га проводили двічі: наприкінці фази виходу в трубку (ВВСН 39) і у фазу формування зернівки (ВВСН 71). Контрольні рослини обприскували відстояною водою.

«Квантум сіамін» — комплексне добриво-біостимулятор на основі екстракту морських водоростей, збагачене важливими елементами живлення. Містить комплекс біологічно активних речовин, які чинять стимулювальну дію на рослини. Хімічний склад: N — 7,0 % (70 г/л); P₂O₅ — 7,0 % (70 г/л); K₂O — 7,0 % (70 г/л); екстракт морських водоростей — 21 % (210 г/л) — карбогідрати (полі- та олігосахариди), макро- та мікроелементи, амінокислоти, фітогормони та гормоноподібні речовини, вітаміни; рН — 7,2—7,6; густина — 1,23—1,28 кг/л.

«Квантум аміномакс» — висококонцентрований препарат, який містить широкий спектр амінокислот, збагачений макро- і мікроелементами, гуміновими речовинами, органічними кислотами і фітогормонами для підсилення антистресового ефекту та зміцнення імунітету рослин. Хімічний склад: амінокислоти — 20,0 % (200 г/л); N — 2,4 % (24 г/л); P₂O₅ — 2,2 % (22 г/л); K₂O — 2,3 % (23 г/л); B — 0,03 % (0,3 г/л); Fe — 0,06 % (0,6 г/л); Zn — 0,05 % (0,5 г/л); Cu — 0,06 % (0,6 г/л); Mn — 0,06 % (0,6 г/л); Mo — 0,012 % (0,12 г/л); Co — 0,006 % (0,06 г/л); рН — 4,0—5,5; густина — 1,10—1,15 кг/л.

Зразки рослинного матеріалу для визначення фізіолого-біохімічних показників відбирали у фази цвітіння (ВВСН 65) і молочно-воскової стиглості (ВВСН 75). Зразок формували з рандомізовано відібраних 20 пагонів. Для визначення маси сухої речовини окремих органів рослин зразки фіксували у сушильній шафі за температури 105 °С упродовж 1 год, потім досушували до сталої маси за температури 85 °С. Площу функціонально активних листків розраховували як добуток довжини і ширини листової пластинки, що зберегла зелене забарвлення, з коефіцієнтом 0,75. Листковий індекс (ЛІ) обчислювали за стандартною методикою як добуток площі зелених листків середнього пагона (м²) та кількості пагонів на 1 м² ґрунту [27]. Хлорофільний індекс (ХІ) розраховували як добуток маси сирої речовини зелених листків середнього пагона, вмісту хлорофілу в середній пробі листків, сформованій з усіх зелених листків пагона, та кількості пагонів на 1 м² ґрунту. Вміст хлорофілу і каротиноїдів визначали спектрофотометрично після екстракції диметилсульфоксидом за Велбурном [28].

Активність антиоксидантних ферментів встановлювали у ізольованих хлоропластах класу В прапорцевих листків. Хлоропласти виділяли механічним способом як описано раніше [29]. Активність СОД вимірювали за допомогою нітротетразолієвого блакитного за довжини хвилі 560 нм [30], активність АПО — в ультрафіолетовій ділянці спектра за 290 нм методом Чена й Асади [31]. Для розрахунку активності ферментів вміст хлорофілу в суспензії хлоропластів визначали методом Арнона [32].

Структуру зернової продуктивності середнього пагона визначали на 22 відібраних підряд пагонах з кожної облікової ділянки. Вро-

жайність на окремій ділянці розраховували як добуток маси зерна з середнього пагона та кількості пагонів на 1 м² ґрунту.

На рисунках наведено значення середніх арифметичних і їх стандартних похибок. Статистичну обробку результатів проводили з використанням Microsoft Excel. Статистичну достовірність різниці між варіантами оцінювали за ANOVA-тестом при $p \leq 0,05$.

Результати та обговорення

Ріст і розвиток рослин озимої пшениці впродовж досліджуваного періоду, що охоплював дві перші декади червня, проходив за недостатньої кількості атмосферних опадів і поступового наростання середньодобових температур. У фазу цвітіння (ВВСН 65) рослини всіх варіантів практично не відрізнялися за масою сухої речовини пагона і окремих його частин (рис. 1). Маса колоса досягала у середньому трохи більше 20 % маси пагона, тоді як частка маси стебла була найбільшою — майже 62 %, а маса листків — найменшою (трохи менше 18 %).

У фазу молочно-воскової стиглості (ВВСН 75) маса сухої речовини пагона у рослин контрольного варіанта і оброблених препаратом аміномакс зростала порівняно з фазою цвітіння на 20 %, проте ці зміни не були статистично достовірними. Статистично достовірно (на 44 %) маса пагона збільшувалася лише у рослин, оброблених препаратом сіамін. За цей період найвищими темпами, у 3,4—3,7 раза, нарощувалася маса колоса, а маса листків і стебла достовірно знижувалася чи виявляла тенденцію до зниження. Зниження маси листків було наслідком їх відмирання в нижніх ярусах, а зменшення маси стебла вказує на активну ремобілізацію резервних асимілятів, насамперед, неструктурних вуглеводів, для забезпечення наливання зернівок [33]. Зменшення маси стебла у контрольних рослин та у варіанті з обробкою препаратом аміномакс було близьким (39—46 %), а у рос-

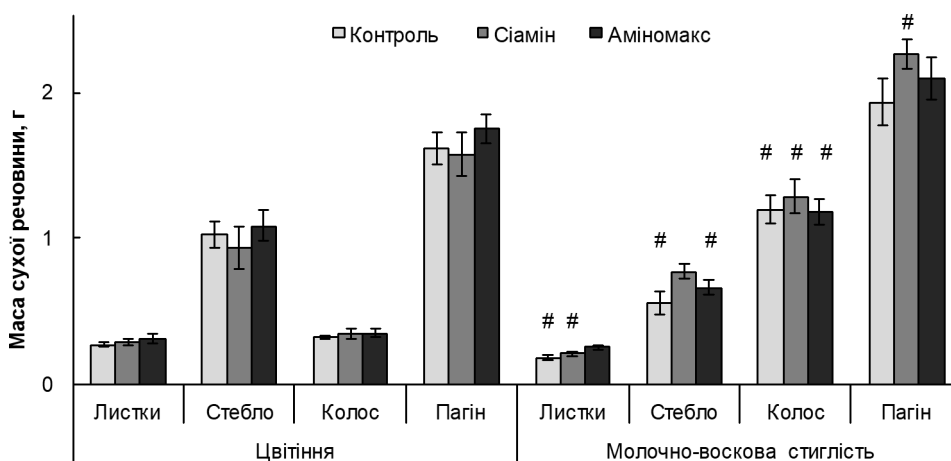


Рис. 1. Маса сухої речовини окремих органів рослин озимої пшениці сорту Малинівка за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами.

Тут і далі на рисунках і в таблицях: # — різниця зі значеннями попередньої фази достовірна за $p \leq 0,05$; * — різниця з контролем достовірна за $p \leq 0,05$

лин, обприсканих препаратом сіамін — значно меншим і статистично недостовірним (18 %).

Важливе значення для продуктивності рослин має площа асиміляційної поверхні рослини. Її величина і збереження протягом тривалого часу в репродуктивний період відіграє ключову роль в оптимізації використання фотосинтетично активної радіації, і завдяки цьому в реалізації потенціалу біологічної продуктивності. У фазу цвітіння площа прапорцевих листків рослин, підживлених мікродобривами-біостимуляторами, була дещо меншою, а сумарна площа всіх листків пагона, навпаки, трохи більшою, ніж у контрольних, проте ці відмінності не були статистично достовірними (рис. 2).

У фазу молочно-воскової стиглості загальна площа функціонально активної (зеленої) листкової поверхні пагона зменшувалася у контрольних рослин на 50 %, у варіантах з підживленням сіаміном і аміномаксом на 40 і 34 % відповідно. Зменшення площі зеленої поверхні зафіксовано також і для прапорцевого листка контрольних рослин. Як результат, рослини за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами у період активного наливання зернівок мали значно більшу площу зелених листків порівняно з контролем. Площа прапорцевого листка рослин у варіанті з сіаміном на 45 % перевищувала контроль, з аміномаксом — на 28 %. Загальна площа листків пагона у дослідних рослин перевищувала контроль на 30 і 43 % для препарату сіамін і аміномакс відповідно.

Після обробки дослідних рослин озимої пшениці сорту Малинівка комплексними мікродобривами-біостимуляторами сіамін та аміномакс концентрація хлорофілу ($a + b$) у прапорцевих листках у фазу цвітіння у контрольному і дослідних варіантах істотно не відрізнялася, хоча зафіксовано тенденцію до дещо меншого вмісту хлорофілів і каротиноїдів у варіанті з аміномаксом (табл. 2). У фазу молочно-воскової стиглості вміст хлорофілу ($a + b$) і каротиноїдів у контрольних рослин знижувався порівняно з фазою цвітіння на 27 і 22 % відповідно і практично не змінювався у дослідних. Внаслідок

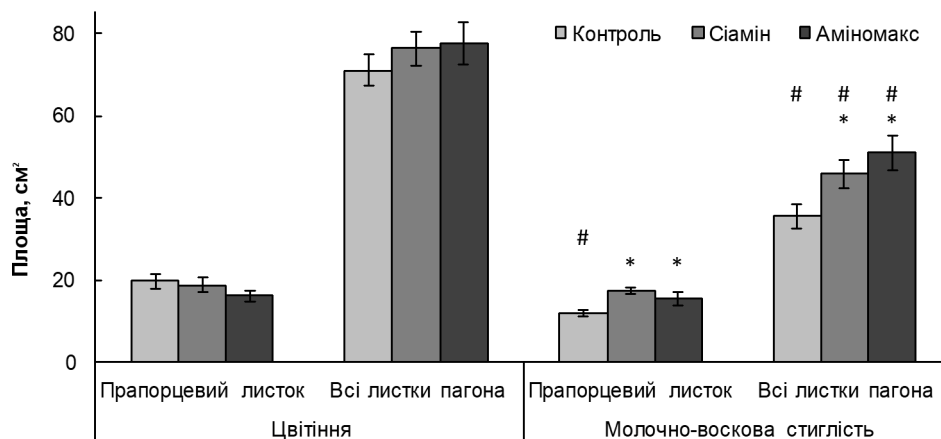


Рис. 2. Площа зеленої поверхні прапорцевого листка та всіх листків пагона рослин озимої пшениці сорту Малинівка за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами

СТАН ФОТОСИНТЕТИЧНОГО АПАРАТУ І ПРОДУКТИВНІСТЬ

ТАБЛИЦЯ 2. Вміст фотосинтетичних пігментів у прапорцевих листках озимої пшениці сорту Малинівка за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами

Варіант	Вміст, мг/г сирової речовини	
	Хлорофіл (a + b)	Каротиноїди
Фаза цвітіння		
Контроль	3,87±0,16	0,64±0,03
Сіамін	3,75±0,08	0,58±0,03
Аміномакс	3,49±0,10	0,55±0,02
Фаза молочно-воскової стиглості		
Контроль	2,97±0,07 [#]	0,50±0,01 [#]
Сіамін	3,56±0,09 [*]	0,53±0,02
Аміномакс	3,37±0,05 [*]	0,57±0,01 [*]

цього у рослин, підживлених препаратом сіамін, вміст хлорофілів був на 20 % більшим від контрольних рослин, а в оброблених препаратом аміномакс — на 13 %. В останньому варіанті також був вищим на 14 % вміст каротиноїдів.

Важливим чинником формування продуктивності посіву є густина стеблестою, яка значною мірою залежить від ступеня кушіння рослин. Водночас частина рослин або бічні пагони рослин, що формуються пізніше, можуть випасти (відмерти) через дефіцит елементів

живлення, дію зовнішніх абіотичних чинників, шкідників або хвороб. Обробка комплексними мікродобривами-біостимуляторами дещо збільшувала густоту стебел у посіві (табл. 3). За обробки сіаміном густина стеблестою посіву сорту Малинівка була вищою на 5 % порівняно з контрольними рослинами, аміномаксом — на 14 %, проте ці зміни виявлялися лише як тенденція і не були статистично достовірними. Густина стеблестою посівів усіх варіантів не змінювалася у період між фазами цвітіння і молочно-воскової стиглості.

Разом з тим показники фотосинтетичного апарату посіву, що визначають кількість поглинутої фотосинтетично активної радіації і залежать як від густоти пагонів у посіві, так і характеристик окремого пагона, — листковий і хлорофільний індекси — істотно змінювалися в ході онтогенезу. Для всіх варіантів ЛІ характеризувався більшими значеннями у фазу цвітіння та подальшим їх зменшенням у фазу молочно-воскової стиглості. При цьому зниження значень ЛІ в контрольному варіанті було істотнішим, ніж за обробки біостимулято-

ТАБЛИЦЯ 3. Густина стеблестою, листковий і хлорофільний індекси посіву озимої пшениці сорту Малинівка за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами

Варіант	Густина стеблестою, шт/м ²	Листковий індекс, м ² /м ²	Хлорофільний індекс, мг хл/м ²
Фаза цвітіння			
Контроль	569±15	4,0±0,2	2,27±0,12
Сіамін	602±21	4,6±0,3	2,51±0,15
Аміномакс	644±28	5,0±0,3 [*]	2,45±0,17
Фаза молочно-воскової стиглості			
Контроль	562±18	2,0±0,1 [#]	0,95±0,08 [#]
Сіамін	591±23	2,7±0,2 ^{**}	1,26±0,10 ^{**}
Аміномакс	642±29	3,3±0,3 ^{**}	1,39±0,14 ^{**}

рами. ЛП посіву за обробки аміномаксом значно перевищував відповідні значення контрольного варіанта протягом досліджуваного періоду, а за обробки сіаїном різниця з контролем була дещо меншою. Так, ЛП посіву у варіанті за обробки аміномаксом був більшим за відповідні значення контрольного варіанта у фазі цвітіння на 25 %, молочно-воскової стиглості — на 65 %, за обробки сіаїном — на 15 % у фазу цвітіння та на 35 % у фазу молочно-воскової стиглості.

Обробка рослин мікродобривами-біостимуляторами дещо підвищувала ХІ посівів у фазу цвітіння порівняно з контрольним варіантом. Цей показник різко знижувався у період від фази цвітіння до фази молочно-воскової стиглості внаслідок зменшення складових, що його визначають — вмісту хлорофілу і розмірів листової поверхні рослин. Зниження ХІ було істотнішим у контрольному варіанті, тому в фазу молочно-воскової стиглості у дослідних варіантах показник уже перевищував контроль на 33 % за обробки сіаїном і на 46 % за обробки аміномаксом.

Антиоксидантні ферменти хлоропластів СОД і АПО є складовими системи псевдоциклічного транспорту електронів у хлоропластах, який активується за порушень процесів асиміляції CO_2 , спричинених абіотичними стресовими чинниками [13]. Підвищення їх активності може слугувати мірою ступеня стресу, якого зазнає рослинний організм.

У фазу цвітіння активність антиоксидантних ферментів СОД і АПО у хлоропластах прапорцевих листків дослідних рослин практично не відрізнялася від контрольних (рис. 3). У фазу молочно-воскової стиглості їх активність зростала різною мірою у рослин дослідних і контрольного варіантів, найбільше у рослин контролю. Активність СОД підвищилася на 50, 19 і 10 % у контрольних рослин, оброблених сіаїном і аміномаксом відповідно, АПО — відповідно на 74, 52 і 40 %. При цьому, у рослин, підживлених сіаїном, активність СОД була меншою на 16 %, аміномаксом — майже на 24 %, ніж у контрольних, активність АПО у контрольних рослин перевищувала варіанти з обробкою сіаїном і аміномаксом на 10 і 14 % відповідно.

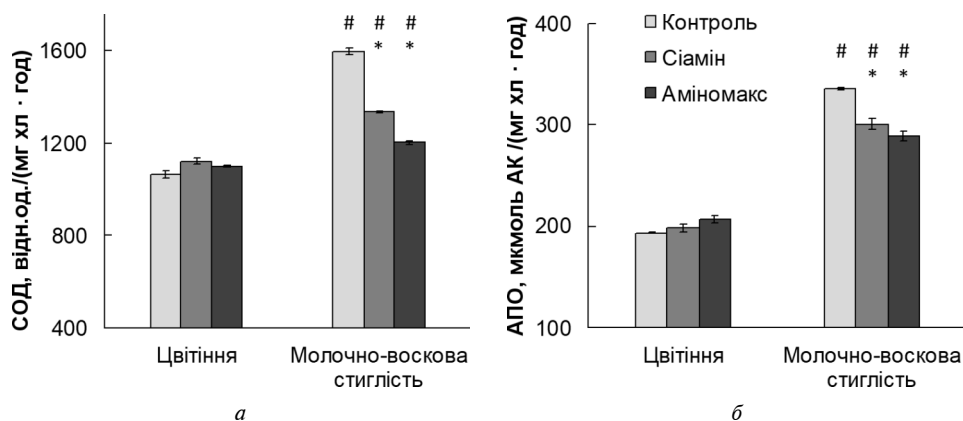


Рис. 3. Активність супероксиддисмутази (СОД) (а) та аскорбатпероксидази (АПО) (б) у хлоропластах прапорцевих листків рослин озимої пшениці сорту Малинівка за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами

Отримані результати свідчать, що обробка рослин пшениці комплексними мікродобривами-біостимуляторами позитивно впливає на процеси росту і розвитку й стан фотосинтетичного апарату в період формування і наливання зернівок, ймовірно, завдяки зменшенню негативної дії недостатнього зволоження і підвищених температур. Відомо, що ці стресори призводять до значних структурно-функціональних порушень різних систем і органів рослинного організму, зокрема й фотосинтетичного апарату, які супроводжуються розвитком вторинного окиснювального стресу [7, 34, 35]. У фазу цвітіння, яка проходила після періоду відносно сприятливих погодних умов у травні (див. табл. 1), рослини дослідних і контрольного варіантів не відрізнялися за активністю антиоксидантних ферментів. Проте у фазу молочно-воскової стиглості за умов посухи і підвищених температур у рослин, оброблених сіаміном і аміномаксом, активність ферментів була істотно нижчою, ніж у контролі, що у поєднанні з кращим збереженням фотосинтетичного апарату листків свідчить про менший ступінь стресу і спричинених ним порушень життєдіяльності. Можна припустити, що дія препаратів сприяла швидшій і ліпшій адаптації систем регуляції водного режиму і фотосинтетичного апарату до погіршення умов вирощування.

Рослини дослідних варіантів статистично достовірно не відрізнялися від контрольних за масою пагона як у фазу цвітіння, так і у фазу молочно-воскової стиглості, проте статистично достовірний приріст біомаси за досліджений період зафіксовано лише у рослин, оброблених мікродобривом-біостимулятором на основі екстракту водоростей — сіаміном (див. рис. 1). Показано, що у рослин пшениці дефіцит зволоження в репродуктивний період прискорює початок і темпи реутилізації резервних асимілятів, депонованих у стеблі, через зниження продуктивності поточного фотосинтезу [36]. Менше зниження маси стебла на фоні більшого приросту загальної маси пагона, що відображає нижчі темпи реутилізації резервних асимілятів зі стебла за обробки препаратом сіамін, було, очевидно, пов'язане з кращим збереженням фотосинтетичного апарату і забезпеченням рослин асимілятами поточного фотосинтезу.

Посуха і підвищена температура пришвидшують старіння і відмирання листків у репродуктивний період розвитку пшениці [11, 37], тому пом'якшення їх негативного впливу обробкою мікродобривами-біостимуляторами було одним із основних чинників ліпшого збереження функціонально активного фотосинтетичного апарату (площа листової поверхні — див. рис. 2, табл. 3 та вміст фотосинтетичних пігментів — див. табл. 2) і, завдяки цьому, підвищення фотосинтетичної продуктивності рослин дослідних варіантів порівняно з контролем. На найвагомішому для наливання зерна прапорцевому листку ефект був дещо виразнішим за обробки сіаміном порівняно з аміномаксом.

Позакоренева обробка комплексними мікродобривами-біостимуляторами позитивно вплинула на врожайність рослин сорту Малинівка (табл. 4). Водночас вплив препаратів на окремі компоненти структури врожайності відрізнявся. Обидва збільшували кількість продуктивних пагонів на одиницю площі посіву, за обробки сіаміном

на 5 %, аміномаксом — на 14 %. Вплив мікродобрив на густоту продуктивних пагонів у посіві в нашому досліді виявлявся лише як тенденція, проте він був доволі важливим для формування зернової продуктивності в розрахунку на площу посіву.

Обробка препаратом сіамін сильніше вплинула на озерненість колоса, що зумовило також збільшення кількості зерен з одиниці площі посіву і врожайність. У цьому варіанті зафіксовано найвищу зернову продуктивність окремого пагона. Маса зерна з колоса за обробки препаратом сіамін була на 9 % вищою за контрольний варіант, що у поєднанні з дещо більшою густотою продуктивного стеблестю забезпечило статистично достовірне зростання врожайності в розрахунку на одиницю площі посіву на 15 %.

За обробки аміномаксом дещо ліпша виживаність бічних пагонів і здатність формувати посіви з більшою густотою пагонів забезпечувала тенденцію до вищої на 11 % врожайності у розрахунку на одиницю площі посіву порівняно з контрольним варіантом. Проте статистична достовірність ефекту була недостатньо високою ($p = 0,08$).

Стрес-протекторний вплив біостимуляторів з екстрактів морських водоростей і амінокислот та їх здатність підвищувати продуктивність сільськогосподарських культур показано в багатьох дослідженнях [18, 38, 39]. Застосування екстрактів морських водоростей підвищувало ефективність використання води, стимулювало відновлення рослин після короткочасної (4—10 діб) посухи та підвищувало показники росту і продуктивності у рослин арабідопсису, томатів, сої та пшениці [40—43]. Обробка рослин екстрактами водоростей підвищувала вміст абсцизової кислоти, активувала експресію стрес-протекторних генів, антиоксидантної системи і регуляторних механізмів фотосинтетичного апарату хлоропластів, що забезпечувало краще збереження фотосинтетичної активності.

Подібні ефекти виявлено також за обробки рослин препаратами сумішей амінокислот, гідролізатів білків, гумінових кислот або біостимуляторів, створених на їх основі [44, 45]. Обприскування рослин нуту, сої і перцю біостимулятором з гідролізату рослинних білків підвищувало стабільність мембран, відносний вміст води, вміст хлорофілу та вільного проліну в листках, фотохімічну активність фотосистеми II (ФС II) за сумісної дії посухи і високої температури [46]. Результатом було збільшення біологічної і господарської продуктивності рослин та ефективніше використання води. Показано, що обробка проростків проса препаратами гумінових кислот зменшувала

ТАБЛИЦЯ 4. Зернова продуктивність рослин пшениці озимої сорту Малинівка за обробки комплексними мікродобривами-біостимуляторами

Варіант	Маса, г		Кількість зерен в колосі, шт.	Густота продуктивного стеблестю паг/м ²	Кількість зерен, тис. шт/м ²	Врожай, т/га
	зерна з колоса	1000 зерен				
Контроль	1,07±0,08	40,2±2,0	26,7±2,0	544±17	14,5±0,8	5,81±0,21
Сіамін	1,17±0,08	37,6±1,7	31,1±1,8	569±22	17,7±1,0*	6,66±0,22*
Аміномакс	1,04±0,09	38,4±2,3	27,6±2,5	622±27*	17,2±1,5	6,46±0,25*

накопичення АФК, істотно підвищувала активність асиміляції CO_2 , продихову провідність, діючий квантовий вихід ФС II і фотохімічне гасіння флуоресценції хлорофілу та знижувала концентрацію CO_2 у міжклітинниках і нефотохімічне гасіння флуоресценції за дії ґрунтової посухи [47].

Літературні дані свідчать, що біостимулятори з екстрактів водоростей та сумішей аміно- і гумінових кислот комплексно впливають на рослинний організм, активуючи широкий спектр захисних систем за стресових умов. Отримані в нашому досліді результати засвідчують швидшу і ефективнішу адаптацію до зменшення кількості атмосферних опадів (нестачі води) і підвищення температури повітря в оброблених препаратами сіамін і аміномакс рослин, що дало їм можливість зберігати фотосинтетичну активність під час наливання зерна і уникнути раннього старіння і відмирання листків.

Мікродобрива-біостимулятори сприяли активному формуванню бічних пагонів, забезпечивши їх виживаність, розвиток репродуктивних органів, формування і наливання зернівок. Дія препарату аміномакс була дещо сильнішою, що відобразилося в більшій густоті стеблестою та вищих листковому і хлорофільному індексах, ніж у контрольних рослин і варіанті з сіаміном. Дія препарату сіамін виявилася у більшій озерненості колоса, кращому збереженні фотосинтетичного апарату прапорцевого листка у період наливання зерна, що забезпечило формування вищого врожаю порівняно з контролем.

Отже, обробка рослин озимої пшениці комплексними мікродобривами-біостимуляторами сіаміном і аміномаксом, створеними з екстракту водоростей і суміші амінокислот відповідно, сприяла формуванню посівів з більшою потужністю фотосинтетичного апарату в репродуктивний період розвитку і кращому його збереженню у період наливання зерна через ефективнішу адаптацію рослин до недостатнього зволоження та підвищеної температури повітря. Обидва мікродобрива-біостимулятори підвищували врожайність пшениці, проте вплив препарату сіамін був сильніше виражений.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO. The state of food security and nutrition in the world 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. Rome: FAO, 2020. 320 p. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>
2. Fróna D., Szenderák J., Harangi-Rákos M. The challenge of feeding the world. *Sustainability*. 2019. **11**. 5816. <https://doi.org/10.3390/su11205816>
3. Моргун В.В., Рибалка О.І. Стратегія генетичного поліпшення зернових злаків з метою забезпечення продовольчої безпеки, лікувально-профілактичного харчування та потреб переробної промисловості. *Вісн. НАН України*. 2017. № 3. С. 54—64. <https://doi.org/10.15407/vsn2017.03.054>
4. Черемісіна С.Г. Ринок зернових культур в Україні: аналіз сучасного стану та перспективи розвитку. *Економіка АПК*. 2021. № 2. С. 48—58. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202102048>
5. Іванюта С.П., Коломієць О.О., Малиновська О.А., Якушенко Л.М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь. Київ: НІСД, 2020. 110 с.
6. Zampieri M., Ceglar A., Dentener F., Toreti A. Understanding and reproducing regional diversity of climate impacts on wheat yields: current approaches, challenges and data

- driven limitations. *Environ. Res. Lett.* 2018. **13**. 021001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa00d>
7. Cohen I., Zandalinas S.I., Huck C.F., Fritschi B., Mittler R. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiol. Plantar.* 2021. **171**, Iss. 1, P. 66–76. <https://doi.org/10.1111/ppl.13203>
 8. Senapati N., Stratonovitch P., Paul M.J., Semenov M.A. Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe. *J. Exp. Bot.* 2019. **70**, N 9. P. 2549–2560. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery226>
 9. Radchenko M.P., Ponomareva I.G., Pozynych I.S., Morderer Ye.Yu. Stress and use of herbicides in field crops. *Agr. Sci. Pract.* 2021. **8**, N 3. P. 50–70. <https://doi.org/10.15407/agrisp8.03.050>
 10. Прядкіна Г.О., Махаринська Н.М., Соколовська-Сергієнко О.Г. Вплив посухи на фотосинтетичні показники рослин пшениці. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. **54**, № 6. С. 463–483. <https://doi.org/10.15407/frg2022.06.463>
 11. Feller U. Drought stress and carbon assimilation in a warming climate: Reversible and irreversible impacts. *J. Plant Physiol.* 2016. **203**. P. 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.04.002>
 12. Seleiman M.F., Al-Suhaibani N., Ali N., Akmal M., Alotaibi M., Refay Y., Dindaroglu T., Abdul-Wajid H.H., Battaglia M.L. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*. 2021. **10**. P. 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
 13. Dumanović J., Nepovimova E., Natić M., Kuča K., Jačević V. The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: a concise overview. *Front. Plant Sci.* 2021. N 11. P. 552969. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>
 14. Foyer C.H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environ. Exp. Bot.* 2018. N 154. P. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>
 15. Kolupaev Yu.E., Yastreb T.O., Ryabchun N.I., Kokorev A.I., Kolomatska V.P., Dmitriev A.P. Redox homeostasis of cereals during acclimation to drought. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 2023. N 35. P. 133–168. <https://doi.org/10.1007/s40626-023-00271-7>
 16. Rane J., Singh A.K., Tiwari M., Prasad P.V.V., Jagadish S.V.K. Effective use of water in crop plants in dryland agriculture: implications of reactive oxygen species and anti-oxidative system. *Front. Plant Sci.* 2022. N 12. P. 778270. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.778270>
 17. Стасик О.О., Прядкіна Г.О., Кірізій Д.А., Соколовська-Сергієнко О.Г., Ситник С.К., Капітанська О.С., Зборівська О.В. Фотосинтез і продукційний процес високоінтенсивних сортів озимої пшениці у зв'язку з умовами мінерального живлення. Київ: Інтерсервіс, 2021. 304 с.
 18. Meddich A. Biostimulants for resilient agriculture-improving plant tolerance to abiotic stress: a concise review. *Gesunde Pflanzen*. 2023. N 75. P. 709–727. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00784-2>
 19. Roupheal Y., Colla G. Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*. 2020. N 10. P. 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>
 20. Гуральчук Ж.З., Трач В.В., Гринюк С.А. Ефективність використання мікродобрив і перспективи розробки нових їх видів. *Вісн. Львів. нац. аграр. ун-ту*. 2011. № 15 (2). С. 98–103.
 21. Tripathi D.K., Singh S., Singh S., Mishra S., Chauha D.K., Dubey N.K. Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: advances and future prospective. *Acta Physiol. Plant.* 2015. N 37. P. 139. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1870-3>
 22. Tavanti T.R., Rodrigues de Melo A.A., Moreira L.D.K., Sanchez D.E.J., Silva R.S., da Silva R.M., Rodrigues dos Reis A. Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *Plant Physiol. Biochem.* 2021. N 160. P. 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>
 23. Dhaliwal S.S., Sharma V., Shukla A.K. Impact of micronutrients in mitigation of abiotic stresses in soils and plants — a progressive step toward crop security and nutritional quality. *Adv. Agron.* 2022. N 173. P. 1–78. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.02.001>
 24. Соколовська-Сергієнко О.Г., Прядкіна Г.О., Капітанська О.С. Активність фотосинтетичного апарату та продуктивність озимої пшениці за обробки хелатованим

- мікродобривом і стимулятором росту. *Фізіологія рослин і генетика*. 2015. **47**, № 4. С. 321–329.
25. Моргун В.В., Санін Є.В., Швартау В.В. Клуб 100 центнерів. Сучасні сорти та системи живлення і захисту озимої пшениці. Видання VIII. Київ: Логос, 2014. 148 с.
 26. Ткаченко Т.Г. Агрометеорологія: навч. посіб. Харків: ХНАУ, 2015. 268 с.
 27. Bréda N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J. Exp. Bot.* 2003. N 54. P. 2403–2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>
 28. Wellburn A.P. The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.* 1994. **144**, N 3. P. 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
 29. Morgun V.V., Stasik O.O., Kiriziy D.A., Sokolovska-Sergiienko O.G. Effect of drought on photosynthetic apparatus, activity of antioxidant enzymes, and productivity of modern winter wheat varieties. *Regul. Mech. Biosyst.* 2019. **10**, N 1. P. 16–25. <https://doi.org/10.15421/021903>
 30. Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide dismutase. Occurrence in higher plants. *Plant Physiol.* 1977. **59**, N 2. P. 309–314.
 31. Chen G.-X., Asada K. Ascorbate peroxidase in tea leaves: occurrence of two isozymes and the differences in their enzymatic and molecular properties. *Plant Cell Physiol.* 1989. **30**, N 7. P. 987–998.
 32. Arnon D.I. Copper enzyme in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 1989. **24**, N 1. P. 1–15.
 33. Slewinski T.L. Non-structural carbohydrate partitioning in grass stems: a target to increase yield stability, stress tolerance, and biofuel production. *J. Exp. Bot.* 2012. **63**, N 13. P. 4647–4670. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers124>
 34. Кірізій Д.А., Стасик О.О. Вплив посухи і високої температури на фізіолого-біохімічні процеси та продуктивність рослин. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. **54**, № 2. С. 95–122. <https://doi.org/10.15407/frg2022.02.095>
 35. Yadav M.R., Choudhary M., Singh J., Lal M.K., Jha P.K., Udawat P., Gupta N.K., Rajput V.D., Garg N.K., Maheshwari C., Hasan M., Gupta S., Jatwa T.K., Kumar R., Yadav A.K., Prasad P.V.V. Impacts, tolerance, adaptation, and mitigation of heat stress on wheat under changing climates. *Int. J. Mol. Sci.* 2022. **23**. P. 2838. <https://doi.org/10.3390/ijms23052838>
 36. Тарасюк М.В., Стасик О.О. Вплив посухи у фазу цвітіння на динаміку накопичення та ремобілізації резервних водорозчинних вуглеводів у сегментах стебла контрастних за посухостійкістю сортів озимої пшениці. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. **54**, № 5. С. 429–449. <https://doi.org/10.15407/frg2022.05.429>
 37. Stasik O.O., Kiriziy D.A., Sokolovska-Sergiienko O.G., Bondarenko O.Yu. Influence of drought on the photosynthetic apparatus activity, senescence rate, and productivity in wheat plants. *Fiziol. rast. genet.* 2020. **52**, N 5. P. 371–387. <https://doi.org/10.15407/frg2020.05.371>
 38. Bhupenandra I., Chongtham S.K., Devi E.L., Choudhary A.K., Salam M.D., Sahoo M.R., Bhutia T.L., Devi S.H., Thounaojam A.S., Behera C., Kumar A., Dasgupta M., Devi Y.P., Singh D., Bhagowati S., Devi C.P., Singh H.R., Khaba C.I. Role of biostimulants in mitigating the effects of climate change on crop performance. *Front. Plant Sci.* 2022. N 13. P. 967665. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.967665>
 39. Deolu-Ajayi A.O., Meer I.M., Werf A., Karlova R. The power of seaweeds as plant biostimulants to boost crop production under abiotic stress. *Plant, Cell & Env.* 2022. N 45. P. 2537–2553. <https://doi.org/10.1111/pce.14391>
 40. Goñi O., Quille P., O'Connell S. Ascophyllum nodosum extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants. *Plant Physiol. Biochem.* 2018. N 126. P. 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.024>
 41. Santaniello A., Scartazza A., Gresta F., Loreti E., Biasone A., Di Tommaso D., Piaggese A., Perata P. Ascophyllum nodosum seaweed extract alleviates drought stress in Arabidopsis by affecting photosynthetic performance and related gene expression. *Front. Plant Sci.* 2017. N 8. P. 1362. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01362>
 42. Sharma S., Chen C., Khatri K., Rathore M.S., Pandey S.P. Gracilaria dura extract confers drought tolerance in wheat by modulating abscisic acid homeostasis. *Plant Physiol. Biochem.* 2019. N 136. P. 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.01.015>

43. Shukla P.S., Shotton K., Norman E., Neily W., Critchley A.T., Prithiviraj B. Seaweed extract improve drought tolerance of soybean by regulating stress-response genes. *AoB PLANTS*. 2018. N 10. plx051. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plx051>
44. Moreno-Hernández J.M., Benítez-García I., Mazorra-Manzano M.A., Ramírez-Suárez J.C., Sánchez E. Strategies for production, characterization and application of protein-based biostimulants in agriculture: a review. *Chilean J. Agr. Res.* 2020. **80**, N 2. P. 274–289. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000200274>
45. Hasanuzzaman M., Parvi K., Bardhan K., Nahar K., Anee T.I., Masud A.A.C., Fotopoulos V. Biostimulants for the regulation of reactive oxygen species metabolism in plants under abiotic stress. *Cells*. 2021. N 10. P. 2537. <https://doi.org/10.3390/cells10102537>
46. Mamatha B.C., Rudresh K., Karthikeyan N., Kumar M., Das R., Taware P.B., Khapte P.S., Soren K.R., Rane J., Gurumurthy S. Vegetal protein hydrolysates reduce the yield losses in off-season crops under combined heat and drought stress. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 2023. N 29. P. 1049–1059. <https://doi.org/10.1007/s12298-023-01334-4>
47. Shen J., Guo M., Wang Y., Yuan X., Wen Y., Song X., Dong S., Guo P. Humic acid improves the physiological and photosynthetic characteristics of millet seedlings under drought stress. *Plant Signal. Behav.* 2020. N 15. P. 1774212. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1774212>

Отримано 26.09.2023

REFERENCES

1. FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO (2020). The state of food security and nutrition in the world 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>
2. Fróna, D., Szenderák, J. & Harangi-Rákos, M. (2019). The challenge of feeding the world. *Sustainability*, 11, 5816. <https://doi.org/10.3390/su11205816>.
3. Morgun, V.V. & Rybalka, O.I. (2017). Strategy of cereals genetic improvement aimed at food safety, health promotion and industry needs. *Visn. NAN Ukraine*, No. 3, pp. 54-64 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/visn2017.03.054>
4. Cheremisina, S.H. (2021). Grain market in Ukraine: analysis of the current state and development prospects. *Ekonomika APK*, No. 2, pp. 48-58 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202102048>
5. Ivanuta, S.P., Kolomiets, O.O., Malynovska, O.A. & Yakushenko, L.M. (2020). Climate change: consequences and adaptation measures: analyt. report. Kyiv: NISD [in Ukrainian].
6. Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F. & Toreti, A. (2018). Understanding and reproducing regional diversity of climate impacts on wheat yields: current approaches, challenges and data driven limitations. *Environ. Res. Lett.*, 13, 021001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa00d>
7. Cohen, I., Zandalinas, S.I., Huck, C.F., Fritschi, B. & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiol. Plantar.*, 171, Iss. 1, pp. 66-76. <https://doi.org/10.1111/ppl.13203>
8. Senapati, N., Stratonovitch, P., Paul, M.J. & Semenov, M.A. (2019). Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe. *J. Exp. Bot.*, 70, No. 9, pp. 2549-2560. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery226>
9. Radchenko, M.P., Ponomareva, I.G., Pozynych, I.S. & Morderer Ye.Yu. (2021). Stress and use of herbicides in field crops. *Agric. Sci. Pract.*, 8, No. 3, pp. 50-70. <https://doi.org/10.15407/agrisp8.03.050>
10. Priadkina, G.O., Makharynska, N.M. & Sokolovska-Sergienko, O.G. (2022). Influence of drought on photosynthetic traits of wheat plants. *Fiziol. rast. genet.*, 54, No. 6, pp. 463-483 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2022.06.463>
11. Feller, U. (2016). Drought stress and carbon assimilation in a warming climate: reversible and irreversible impacts. *J. Plant Physiol.*, 203, pp. 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.04.002>

12. Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. & Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10, 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
13. Dumanović, J., Nepovimova, E., Natić, M., Kuča, K. & Jaćević, V. (2021). The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: a concise overview. *Front. Plant Sci.*, 11, 552969. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>
14. Foyer, C.H. (2018). Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environ. Exp. Bot.*, 154, pp. 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>
15. Kolupaev, Yu.E., Yastreb, T.O., Ryabchun, N.I., Kokorev, A.I., Kolomatska, V.P. & Dmitriev, A.P. (2023). Redox homeostasis of cereals during acclimation to drought. *Theor. Exp. Plant Physiol.*, 35, pp. 133-168 <https://doi.org/10.1007/s40626-023-00271-7>
16. Rane, J., Singh, A.K., Tiwari, M., Prasad, P.V.V. & Jagadish, S.V.K. (2022). Effective use of water in crop plants in dryland agriculture: implications of reactive oxygen species and antioxidant system. *Front. Plant Sci.*, 12, 778270. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.778270>
17. Stasik, O.O., Priadkina, G.O., Kiriziy, D.A., Sokolovska-Sergiienko, O.G., Sytnik, C.K., Kapitanska, O.S. & Zborivska, O.V. (2021). Photosynthesis and production process of high-intensity varieties of winter wheat in connection with the conditions of mineral nutrition. Kyiv: Interservis [in Ukrainian].
18. Meddich, A. (2023). Biostimulants for resilient agriculture-improving plant tolerance to abiotic stress: a concise review. *Gesunde Pflanzen*, 75, pp. 709-727. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00784-2>
19. Rouphael, Y. & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: from experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10, 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>
20. Guralchuk, Zh.Z., Trach, V.V. & Grinyuk, S.A. (2011). Efficiency of the use of micro-fertilizers and prospects of development of their new kinds. *Visn. L'viv. nat. agrar. un-tu*, 15, No. 2, pp. 98-103 [in Ukrainian].
21. Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, S., Mishra, S., Chauhan, D.K. & Dubey, N.K. (2015). Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: advances and future prospective. *Acta Physiol. Plant.*, 37, 139. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1870-3>
22. Tavanti, T.R., Rodrigues de Melo, A.A., Moreira, L.D.K., Sanchez, D.E.J., Silva, R.S., da Silva, R.M. & Rodrigues dos Reis, A. (2021). Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *Plant Physiol. Biochem.*, 160, pp. 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>
23. Dhaliwal, S.S., Sharma, V. & Shukla, A.K. (2022). Impact of micronutrients in mitigation of abiotic stresses in soils and plants-a progressive step toward crop security and nutritional quality. *Adv. Agr.*, 173, pp. 1-78. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.02.001>
24. Sokolovska-Sergiienko, O.G., Priadkina, G.O. & Kapitanska, O.S. (2015). Activity of photosynthetic apparatus and productivity in winter wheat treated by chelated microfertilizer and growth stimulator. *Fiziol. rast. genet.*, 47, No. 4, pp. 321-329 [in Ukrainian].
25. Morgun, V.V., Sanin, Ye.V. & Shwartau, V.V. (2014). 100 centners club. Winter wheat varieties of the Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine and Singenta protection system. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
26. Tkachenko, T.G. (2015). *Agrometeorology: textbook*. Kharkiv: Kharkiv nat. agr. un-t [in Ukrainian].
27. Bréda, N.J.J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J. Exp. Bot.*, 54, pp. 2403-2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>
28. Wellburn, A.P. (1994). The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.*, 144, No. 3, pp. 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
29. Morgun, V.V., Stasik, O.O., Kiriziy, D.A. & Sokolovska-Sergiienko, O.G. (2019). Effect of drought on photosynthetic apparatus, activity of antioxidant enzymes, and productivity of modern winter wheat varieties. *Regul. Mech. Biosyst.*, 10, No. 1, pp. 16-25. <https://doi.org/10.15421/021903>

30. Giannopolitis, C.N. & Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutase. Occurrence in higher plants. *Plant Physiol.*, 59, No. 2, pp. 309-314.
31. Chen, G.-X. & Asada, K. (1989). Ascorbate peroxidase in tea leaves: occurrence of two isozymes and the differences in their enzymatic and molecular properties. *Plant Cell Physiol.*, 30, No. 7, pp. 987-998.
32. Arnon, D.I. (1949). Copper enzyme in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, 24, No. 1, pp. 1-15.
33. Slewinski, T.L. (2012). Non-structural carbohydrate partitioning in grass stems: a target to increase yield stability, stress tolerance, and biofuel production. *J. Exp. Bot.*, 63, No. 13, pp. 4647-4670. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers124>
34. Kiriziy, D.A. & Stasik, O.O. (2022). Effects of drought and high temperature on physiological and biochemical processes, and productivity of plants. *Fiziol. rast. genet.*, 54, No. 2, pp. 95-122 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2022.02.095>
35. Yadav, M.R., Choudhary, M., Singh, J., Lal, M.K., Jha, P.K., Udawat, P., Gupta, N.K., Rajput, V.D., Garg, N.K., Maheshwari, C., Hasan, M., Gupta, S., Jatwa, T.K., Kumar, R., Yadav, A.K. & Prasad, P.V.V. (2022). Impacts, tolerance, adaptation, and mitigation of heat stress on wheat under changing climates. *Int. J. Mol. Sci.*, 23, 2838. <https://doi.org/10.3390/ijms23052838>
36. Tarasiuk, M.V. & Stasik, O.O. (2022). The effect of drought at flowering stage on the dynamics of accumulation and remobilization of reserve water-soluble carbohydrates in stem segments of winter wheat varieties contrasting in drought resistance. *Fiziol. rast. genet.*, 54, No. 5, pp. 429-449 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2022.05.429>
37. Stasik, O.O., Kiriziy, D.A., Sokolovska-Sergiienko, O.G. & Bondarenko, O.Yu. (2020). Influence of drought on the photosynthetic apparatus activity, senescence rate, and productivity in wheat plants. *Fiziol. rast. genet.*, 52, No. 5, pp. 371-387. <https://doi.org/10.15407/frg2020.05.371>
38. Bhupenandra, I., Chongtham, S.K., Devi, E.L., Choudhary, A.K., Salam, M.D., Sahoo, M.R., Bhutia, T.L., Devi, S.H., Thounaojam, A.S., Behera, C., Kumar, A., Dasgupta, M., Devi, Y.P., Singh, D., Bhagowati, S., Devi, C.P., Singh, H.R. & Khaba, C.I. (2022). Role of biostimulants in mitigating the effects of climate change on crop performance. *Front. Plant Sci.*, 13, 967665. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.967665>
39. Deolu-Ajayi, A.O., Meer, I.M., Werf, A. & Karlova, R. (2022). The power of seaweeds as plant biostimulants to boost crop production under abiotic stress. *Plant, Cell & Environ.*, 45, pp. 2537-2553. <https://doi.org/10.1111/pce.14391>
40. Goñi, O., Quille, P. & O'Connell, S. (2018). Ascophyllum nodosum extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants. *Plant Physiol. Biochem.*, 126, pp. 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.024>
41. Santaniello, A., Scartazza, A., Gresta, F., Loreti, E., Biasone, A., Di Tommaso, D., Piaggese, A. & Perata, P. (2017). Ascophyllum nodosum seaweed extract alleviates drought stress in Arabidopsis by affecting photosynthetic performance and related gene expression. *Front. Plant Sci.*, 8, 1362. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01362>
42. Sharma, S., Chen, C., Khatri, K., Rathore, M.S. & Pandey, S.P. (2019). Gracilaria dura extract confers drought tolerance in wheat by modulating abscisic acid homeostasis. *Plant Physiol. Biochem.*, 136, pp. 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.01.015>
43. Shukla, P.S., Shotton, K., Norman, E., Neily, W., Critchley, A.T. & Prithiviraj, B. (2018). Seaweed extract improve drought tolerance of soybean by regulating stress-response genes. *AoB PLANTS*, 10, plx051. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plx051>
44. Moreno-Hernández, J.M., Benítez-García, I., Mazorra-Manzano, M.A., Ramírez-Suárez, J.C. & Sánchez, E. (2020). Strategies for production, characterization and application of protein-based biostimulants in agriculture: a review. *Chilean J. Agr. Res.*, 80, 2, pp. 274-289. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000200274>
45. Hasanuzzaman, M., Parvin, K., Bardhan, K., Nahar, K., Anee, T.I., Masud, A.A.C. & Fotopoulos, V. (2021). Biostimulants for the regulation of reactive oxygen species metabolism in plants under abiotic stress. *Cells*, 10, 2537. <https://doi.org/10.3390/cells10102537>
46. Mamatha, B.C., Rudresh, K., Karthikeyan, N., Kumar, M., Das, R., Taware, P.B., Khapte, P.S., Soren, K.R., Rane, J. & Gurumurthy, S. (2023). Vegetal protein hydrolysates reduce the yield losses in off-season crops under combined heat and drought

stress. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, No. 29, pp. 1049-1059. <https://doi.org/10.1007/s12298-023-01334-4>

47. Shen, J., Guo, M., Wang, Y., Yuan, X., Wen, Y., Song, X., Dong, S. & Guo, P. (2020). Humic acid improves the physiological and photosynthetic characteristics of millet seedlings under drought stress. *Plant Signal. Behav.*, 15, 1774212. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1774212>

Received 26.09.2023

EFFECTS OF COMPLEX MICROFERTILIZERS-BIOSTIMULANTS ON PHOTOSYNTHETIC APPARATUS AND PRODUCTIVITY OF WINTER WHEAT

O.H. Sokolovska-Sergiienko, A.S. Kedruk, N.M. Makharynska, G.O. Priadkina, O.O. Stasik

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylkivska St., Kyiv, 03022, Ukraine
e-mail: sokolovska_oksana@ukr.net

The effects of complex microfertilizers-biostimulants, manufactured on the basis of seaweed extract and a mixture of amino acids, on the state of the photosynthetic apparatus during the reproductive period, which was accompanied by the scarce atmospheric precipitation and increased air temperature, as well as the productivity of plants of the Malynivka winter wheat variety was studied in a small-scale field experiment. Foliar treatment of plants with microfertilizers-biostimulants «Quantum® SeAmin» (based on seaweed extract) or «Quantum® AminoMax» (based on a mixture of amino acids of plant origin) produced by RPC «Kvadrat» (Ukraine) was carried out twice: at the end of stem elongation (BBCH 39) and at the start of grain development (BBCH 71). The amount of precipitation during the period from the flowering stage to stage of late milk was 24 mm (33 % of the climatic norm), the average daily temperature was 21.3 °C (+1.8 °C to the climatic norm), which corresponds to the value of the Selyaninov's hydrothermal coefficient of 0.38 (very arid conditions). It was found that the plants treated with the both biostimulants did not differ significantly from the control plants in terms of the photosynthetic apparatus capacity, and activities of the chloroplast antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APO) at the flowering stage. However, at the stage of late milk, treated plants had significantly higher leaf area index and chlorophyll content than control ones due to a better preservation of the leaves green area and the photosynthetic pigments content. At that time, the treated plants had significantly lower activities of chloroplastic SOD and APO, that in combination with maintaining the better state of leaf photosynthetic apparatus indicates on a lower degree of stress and more effective adaptation to adverse conditions. Treatment with SeAmin increased the yield by 15 % ($p = 0.045$), and with AminoMax by 11 %, however the statistical significance of the effect was not high ($p = 0.08$).

Key words: *Triticum aestivum* L., biostimulants, drought, chlorophyll, leaf area index, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, productivity.

ORCID

О.Г. СОКОЛОВСЬКА-СЕРГІЄНКО — O.H. Sokolovska-Sergiienko

<https://orcid.org/0000-0001-6967-8221>

А.С. КЕДРУК — A.S. Kedruk <https://orcid.org/0009-0005-9481-2687>

Н.М. МАХАРИНСЬКА — N.M. Makharynska <https://orcid.org/0000-0002-9987-6437>

Г.О. ПРЯДКІНА — G.O. Priadkina <https://orcid.org/0000-0002-4548-1747>

О.О. СТАСИК — O.O. Stasik <https://orcid.org/0000-0001-5023-2529>