

<https://doi.org/10.15407/frg2025.02.152>

УДК 581.1:631.811.98:633.11

ВПЛИВ ПОЗАКОРЕНЕВОГО ПІДЖИВЛЕННЯ ДОБРИВОМ ЕКОЛАЙН ФОСФІТНИЙ НА ФОТОСИНТЕТИЧНИЙ АПАРАТ І ПРОДУКТИВНІСТЬ ПШЕНИЦІ

Д.А. КІРІЗІЙ¹, О.О. СТАСИК¹, О.Г. СОКОЛОВСЬКА-СЕРГІЄНКО¹,
А.С. ГОЛОБОРОДА¹, М.В. ТАРАСЮК¹, О.М. КАТЕРИНЧУК²

¹Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17

²Науково-виробнича компанія ТОВ «Екоорганік»
01133 Київ, бульв. Лесі Українки, 26, оф. 902
e-mail: o_stasik@yahoo.com

Досліджували вплив позакореневого підживлення добривом еколайн фосфітний на фотосинтетичний апарат та продуктивність рослин озимої м'якої пшениці (*Triticum aestivum* L.) сортів Даринка київська і Джамала, які вирощували у вегетаційних посудинах на 10 кг ґрунту за природних температур і освітлення. Вологість ґрунту в посудинах весь час підтримували на оптимальному рівні (60—70 % повної вологості). Рослини сорту Даринка київська обробляли позакоренево препаратом еколайн фосфітний К-Аміно, а сорту Джамала — еколайн фосфітний К у розрахунку 1 л/га двічі: в кінці фази виходу в трубку (ВВСН 39) і формування зернівки (ВВСН 71). Визначення вмісту фотосинтетичних пігментів, інтенсивності газообміну та активності антиоксидантних ферментів хлоропластів прапорцевих листків проводили у фази цвітіння (ВВСН 65) і молочно-воскової стиглості (ВВСН 77), показники зернової продуктивності — у фазу повної стиглості зерна. Показано, що позакоренева обробка рослин озимої пшениці препаратами еколайн фосфітний К і еколайн фосфітний К-Аміно стимулювала фотосинтетичну активність прапорцевого листка, уповільнювала її зниження в ході онтогенетичного розвитку, сприяючи ліпшому забезпеченню асимілятами наливання зернівок, та оптимізувала роботу фотосинтетичного апарату (зниження витрат вуглецю на фотодихання). Виявлені ефекти обробки препаратами можуть бути пов'язані як з праймувальним ефектом фосфіту, зокрема, підвищенням активності антиоксидантних ферментів, що посилює стійкість рослин до дії несприятливих абіотичних і біотичних чинників довкілля, так і з кращим розвитком кореневої системи рослин, а отже — поліпшенням засвоєння елементів мінерального живлення.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., фосфіт калію, фотосинтез, фотодихання, транспірація, супероксиддисмутаза, аскорбатпероксидаза, зернова продуктивність.

Нестача продуктів харчування викликає серйозне занепокоєння в усьому світі через зростання населення, збільшення попиту та зміни

Цитування: Кірізій Д.А., Стасик О.О., Соколовська-Сергієнко О.Г., Голоборода А.С., Тарасюк М.В., Катеринчук О.М. Вплив позакореневого підживлення добривом еколайн фосфітний на фотосинтетичний апарат і продуктивність пшениці. *Фізіологія рослин і генетики*. 2025. 57, № 2. С. 152—166. <https://doi.org/10.15407/frg2025.02.152>

клімату [1]. Одним із напрямів вирішення цієї проблеми є застосування препаратів, що покращують врожайність провідних сільськогосподарських культур. Саме такими є біостимулятори, що набули популярності завдяки потенціалу підвищення продуктивності, якості врожаю, стійкості до абіотичних і біотичних стресорів.

Новим біостимулятором, який використовується в садівництві та агрономії, є фосфіт. Він являє собою відновлену форму фосфату (H_3PO_3), в якому один із атомів водню з'єднується безпосередньо із атомом фосфору. Фосфіти легко поглинаються листками, і препарати на їх основі пропонуються для позакореневої обробки рослин з метою підвищення стійкості рослин до збудників грибних хвороб, посилення росту кореневої системи та підвищення врожайності, особливо за дії несприятливих чинників довкілля. Встановлено, що фосфіти практично не засвоюються рослинами як джерело фосфору, але чинять певний регуляторний ефект, механізм якого поки що мало досліджений.

Так, у дослідях із пшеницею показано, що позакореневе підживлення фосфітом покращує архітектоніку коренів і збільшує їхню біомасу [2]. Біохімічні та фізіологічні аналізи виявили, що обробка фосфітом значно підвищує активність нітратредуктази, фотосинтез листків і продихову провідність, а отже, поліпшує засвоєння азоту й вуглецю, відповідно. Ці відмінності були вираженішими за впливу високої температури або посухи (фотосинтез і стабільність фотосистеми II) та дефіциту поживних речовин (галуження коренів й активність нітратредуктази). Автори дійшли висновку, що обробка фосфітом підвищує здатність рослин витримувати абіотичні стреси внаслідок посилення асиміляції азоту й вуглецю в поєднанні з поліпшенням росту коренів, що може збільшити біомасу та врожайність.

Польові й тепличні експерименти з використанням чотирьох сортів картоплі показали, що після обробки фосфітом продуктивність рослин, включно з деякими фізіолого-біохімічними ознаками, врожайністю і якістю, значно покращилася [3]. Секвенування РНК контрольних і оброблених фосфітом рослин упродовж 24 год виявило значні зміни в профілях експресії генів. Загалом було ідентифіковано 2856 диференційно експресованих генів. Це свідчить, що численні шляхи первинного й вторинного метаболізму, такі як біосинтез флавоноїдів, метаболізм крохмалю та сахарози, а також біосинтез фенілпропаноїдів, зазнали сильного впливу позакореневого застосування фосфіту. Виявлено значний вплив фосфіту на безліч захисних механізмів. Ці результати свідчать, що фосфіт діяв як біостимулятор шляхом праймування рослин, тобто спричинюючи динамічні зміни в експресії генів і модулюючи метаболічні потоки таким чином, щоб покращити функціонування рослин.

У дослідях з пшеницею і ріпаком показано, що позакореневе внесення фосфіту збільшує біомасу коренів у середньому на 30 % [4]. Як для ріпаку, так і для пшениці виявлено сортову специфічність відповіді на обробку фосфітом, водночас реакція пшениці на фосфіт була сильніше виражена, ніж ріпаку. Як на пшениці, так і на ріпаку ефект фосфіту краще проявлявся за помірного стресу (обмежений водний режим або знижена концентрація поживних речовин). Поза-

кореневе внесення фосфіту поліпшувало асиміляцію вуглецю та ефективність використання води. У коренях істотно підвищувався рівень фітогормону цис-зеатину, що сприяло спрямуванню потоків ауксину до зачатків бічних коренів і, таким чином, галуженню кореневої системи.

Дослідники з Інституту фітопатології Кільського університету імені Крістіана Альбрехта показали, що обробка фосфітом індукуює нітратредуктазу — ключовий фермент, який бере участь у засвоєнні азоту. Ці результати були підтверджені в Ноттінгемі як для пшениці, так і для ріпаку [5].

У дослідах із чайотом (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) було оцінено вплив позакореневої обробки фосфітом (Phi) на висоту рослини, довжину і ширину листків, діаметр стебла, довжину кореня, об'єм кореня, а також на концентрацію білків, хлорофілів, гліцинбетаїну та проліну [6]. Обробка не спричинила пошкодження листків, але найвища доза (25 мкМ Phi) негативно вплинула на деякі ознаки росту. Застосування 20 мкМ Phi збільшувало об'єм кореня, тоді як за 5 мкМ Phi спостерігалось більше утворення сухої біомаси стебла порівняно з контролем. Діапазон Phi 15—25 мкМ підвищував концентрацію проліну. Загалом застосування доз, що дорівнюють або нижчі за 15 мкМ Phi, покращувало параметри росту та метаболізму, тоді як дози, вищі за 15 мкМ Phi, чинили деякий негативний вплив. Зроблено висновок, що Phi може відігравати вирішальну роль як неорганічний біостимулятор у вирощуванні чайоту, якщо застосовувати його належним чином.

Для рослин томатів також був показаний позитивний вплив позакореневого підживлення фосфітом калію на ріст і врожайність завдяки збільшенню кількості листків, індексу листкової площі, чистої продуктивності фотосинтезу та кількості плодів на рослині [7].

Препарати, що містять фосфіт, привертають увагу через їхню протигрибну дію [8, 9]. Останнім часом фунгіциди на основі фосфіту широко інтегровані в програми боротьби з хворобами сільськогосподарських рослин. Фосфіти виявляють протигрибні властивості, особливо щодо грибів Oomycetes (*Phytophthora*, *Pythium*).

Метою нашого дослідження було з'ясувати ефективність позакореневого підживлення добривами еколайн фосфітний К і еколайн фосфітний К-Аміно, виробництва науково-виробничої компанії «Екоорганік» (Київ, Україна), для підвищення активності фотосинтетичного апарату і продуктивності рослин озимої пшениці.

Методика

Досліджували рослини озимої м'якої пшениці (*Triticum aestivum* L.) сортів Даринка київська і Джамала (оригіатор — Інститут фізіології рослин і генетики НАН України), які вирощували у вегетаційних посудинах на 10 кг ґрунту, удобреного 10 г нітроамофоски, за природного освітлення. В посудинах вирощували по 20 рослин. Добрива вносили в однакових кількостях (5+5 г) під час наповнення посудин ґрунтом і в середині фази виходу в трубку (ВВСН 34). Вологість ґрунту в посудинах упродовж вегетації підтримували на оптимальному рівні (60—70 % повної вологоємності).

Рослини сорту Даринка київська обробляли позакоренево препаратом еколайн фосфитний К-Аміно, а сорту Джамала — препаратом еколайн фосфитний К в дозі 1 л/га два рази: в кінці фази виходу в трубку (ВВСН 39) і формування зернівки (ВВСН 71). Вміст фотосинтетичних пігментів, інтенсивності газообміну та активності антиоксидантних ферментів хлоропластів прапорцевих листків визначали у фази цвітіння (ВВСН 65) і молочно-воскової стиглості (ВВСН 77).

Вміст хлорофілів і каротиноїдів визначали спектрофотометрично після екстракції диметилсульфоксидом за Велбурном [10] у триразовій повторності.

Інтенсивність фотосинтезу, фото- і темнового дихання реєстрували за контрольованих умов на установці, змонтованій на базі оптико-акустичного інфрачервоного газоаналізатора ГІАМ-5М, увімкненого за диференційною схемою. Середні частини інтактних прапорцевих листків головного пагона (по 2 паралельно) вміщували в камеру з контрольованою температурою (25 °С) і освітлювали світлодіодним прожектором ТА-11 потужністю 50 Вт з колірною температурою 5200 К. Освітленість на рівні камери становила 1500 мкмоль/(м² · с) ФАР. Кондиціоноване повітря (вологість 10—11 мбар) продувалось через камеру зі швидкістю 1 л/хв. Інтенсивність асиміляції CO₂ розраховували за зниженням його концентрації у повітрі на виході з камери порівняно з атмосферним, фотодихання — за викидом CO₂ із листка впродовж 1 хв після вимкнення світла, темнового дихання — за підвищенням концентрації CO₂ у повітрі через 10 хв перебування у темряві. Інтенсивність транспірації реєстрували за контрольованих умов газоаналізатором EGM-5 (PP Systems, США) і обчислювали за різницею вологості повітря на вході та виході з листової камери. Параметри газообміну розраховували за стандартними протоколами [11]. Повторність визначень показників газообміну чотириразова.

Активність антиоксидантних ферментів — супероксиддисмутази (СОД) і аскорбатпероксидази (АПО) — визначали у хлоропластах прапорцевих листків. Хлоропласти виділяли механічним способом за температури 0—4 °С. Середню наважку (2 г) прапорцевих листків пшениці гомогенізували в семикратному об'ємі буферного розчину такого складу: 0,33 М сорбітол, 5 мМ MgCl₂, 0,1 % БСА, 4 мМ аскорбінова кислота та 50 мМ *трис*-HCl (pH 7,5). Гомогенат фільтрували крізь два шари капронової тканини та центрифугували на центрифугі К-24D за 80 g та температури 0—4 °С впродовж 5 хв для осадження важких часточок. Надосадову рідину зливали в інші попередньо охолоджені центрифужні пробірки та центрифугували за 2000 g 10 хв для отримання фракції хлоропластів. Осад хлоропластів ресуспендували в ізотонічному середовищі з 4 мМ аскорбінової кислоти, 50 мМ *трис*-HCl (pH 7,5) об'ємом 2 мл і в подальшому використовували для визначення активності СОД та АПО.

Активність СОД визначали спектрофотометрично за допомогою нітротетразолієвого блакитного за довжини хвилі 560 нм [12]. Активність АПО вимірювали в ультрафіолетовій області спектра за 290 нм [13].

Для визначення показників зернової продуктивності рандомізовано відбирали по 20 рослин з кожного варіанта у фазу повної стиглості зерна.

Повторність досліду — 5 посудин на варіант. Дані були статистично оброблені з використанням ANOVA та критерію достовірних відмінностей Тьюкі для середніх значень. Результати на діаграмах і в таблиці виражені як середнє значення та стандартна похибка ($\bar{x} \pm SE$). Відмінності між варіантами вважали достовірними за $p \leq 0,05$.

Результати та обговорення

Обробка рослин пшениці препаратами еколайн фосфітний К-Аміно і еколайн фосфітний К у фазу виходу в трубку неістотно впливала на загальний вміст хлорофілів і каротиноїдів у прапорцевому листку в фазу цвітіння (табл. 1 і 2). Проте виявлено статистично вірогідне підвищення вмісту хлорофілу *b* в сорту Даринка київська за обробки препаратом еколайн фосфітний К-Аміно і тенденцію до підвищення його вмісту в сорту Джамала за обробки препаратом еколайн фосфітний К.

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно на вміст хлорофілу в прапорцевому листку у фазі цвітіння і молочно-воскової стиглості

Варіант	Хлорофіл <i>a</i>	Хлорофіл <i>b</i>	Хлорофіл <i>a+b</i>	Каротиноїди
Фаза цвітіння (ВВСН 65)				
Контроль	2,90±0,05	0,65±0,02	3,55±0,08	0,60±0,01
Дослід	3,10±0,04	0,75±0,03*	3,85±0,09	0,64±0,01
% контролю	106,9	115,4	108,5	106,7
Фаза молочно-воскової стиглості (ВВСН 77)				
Контроль	2,05±0,02	0,55±0,03	2,61±0,04	0,42±0,01
Дослід	2,35±0,01*	0,67±0,03*	3,02±0,04*	0,44±0,01
% контролю	114,6	121,8	115,7	104,8

Примітка. Тут і в табл. 2—4: * — різниця з контролем вірогідна за $p \leq 0,05$.

ТАБЛИЦЯ 2. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на вміст хлорофілу в прапорцевому листку у фазі цвітіння і молочно-воскової стиглості

Варіант	Хлорофіл <i>a</i>	Хлорофіл <i>b</i>	Хлорофіл <i>a+b</i>	Каротиноїди
Фаза цвітіння (ВВСН 65)				
Контроль	2,84±0,11	0,62±0,02	3,47±0,11	0,64±0,03
Дослід	2,75±0,13	0,73±0,07	3,48±0,18	0,59±0,02
% контролю	96,8	117,7	100,3	92,2
Фаза молочно-воскової стиглості (ВВСН 77)				
Контроль	1,65±0,01	0,53±0,01	2,18±0,01	0,29±0,01
Дослід	1,86±0,04*	0,57±0,02	2,43±0,05*	0,37±0,01*
% контролю	112,7	107,5	111,5	127,6

Двократна обробка обома препаратами спричиняла вірогідне підвищення порівняно з контролем сумарного вмісту хлорофілів у прапорцевих листках сортів у фазу молочно-воскової стиглості (ВВСН 77). Вплив препарату еколайн фосфітний К-Аміно на рослини сорту Даринка київська був виражений дещо сильніше — загальний вміст хлорофілу зростав на 15,7 % відносно контрольного варіанта, тоді як за обробки препаратом еколайн фосфітний К рослин сорту Джамила — на 11,5 %. Прикметно, що в першому випадку знову спостерігалось сильніше підвищення вмісту хлорофілу *b*, ніж хлорофілу *a*, а в другому, навпаки — перевищення відносно контролю вмісту хлорофілу *a* було більшим, ніж хлорофілу *b*.

Важливо відзначити, що відмінності між рослинами дослідного і контрольного варіантів у фазу молочно-воскової стиглості спостерігалися на фоні старіння листка і онтогенетично зумовленого зниження вмісту хлорофілу. Отже, отримані дані свідчать, що обробка препаратами сприяла кращому збереженню фотосинтетичного апарату прапорцевого листка під час репродуктивного розвитку рослин. У контрольних рослин сорту Даринка київська зниження вмісту хлорофілу за період від цвітіння до молочно-воскової стиглості становило 26,5 %, а в дослідних — 21,4 %. У сорту Джамила вміст хлорофілу знижувався на 37,2 і 30,2 %, відповідно.

Оскільки, на відміну від хлорофілу *a*, який залучений до складу як реакційних центрів фотосистем, так і світлозбиральних пігмент-білкових комплексів [14], хлорофіл *b* входить лише до складу останніх, отримані результати свідчать, що обробка препаратом еколайн фосфітний К-Аміно сприяла збільшенню вмісту світлозбиральних комплексів у прапорцевому листку рослин сорту Даринка київська і поліпшенню поглинання сонячної енергії.

Результати вимірювань показників газообміну прапорцевих листків виявили, що обробка рослин обома дослідженими препаратами у фазу ВВСН 39 вірогідно підвищила інтенсивність фотосинтезу у фазу цвітіння в обох сортів (рис. 1). У сорту Даринка київська це підвищення становило 8,7 %, у сорту Джамила — 16,2 % порівняно з необробленими рослинами. Після повторної обробки позитивний вплив препаратів на фотосинтез у фазу молочно-воскової стиглості був виражений сильніше. Так, у рослин сорту Даринка київська в цей період перевищення дослідних рослин над контрольними за інтенсивністю асиміляції CO_2 становило 37,8 %, у сорту Джамила — 34,4 %.

Іншими авторами також було виявлено, що залучення фосфіту до складу фосфорних добрив при позакореновому підживленні рослин пшениці підвищувало фотосинтетичну активність, стійкість фотосинтетичного апарату до несприятливих чинників довкілля та уповільнювало зниження фотосинтетичної активності прапорцевого листка в ході онтогенезу [15].

В наших дослідях, у рослин, оброблених фосфітними добривами, спостерігалось вірогідне зниження інтенсивності фотодихання в обидва строки вимірювання (рис. 2). Варто відзначити, що у рослин сорту Даринка київська цей ефект був сильніше виражений у фазу молочно-воскової стиглості, ніж в період цвітіння (зниження порівняно

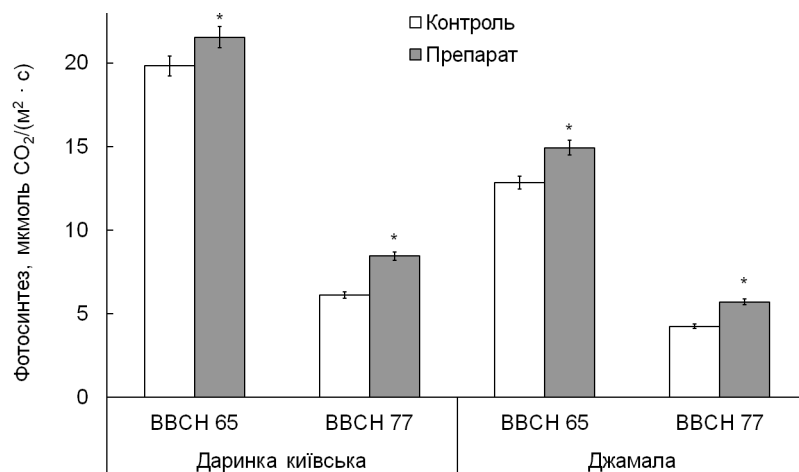


Рис. 1. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно і сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на інтенсивність фотосинтезу в прапорцевому листку у фази цвітіння (ВВСН 65) і молочно-воскової стиглості (ВВСН 77). (Тут і на рис. 2–4, 6, 7: * — різниця з контролем вірогідна за $p \leq 0,05$)

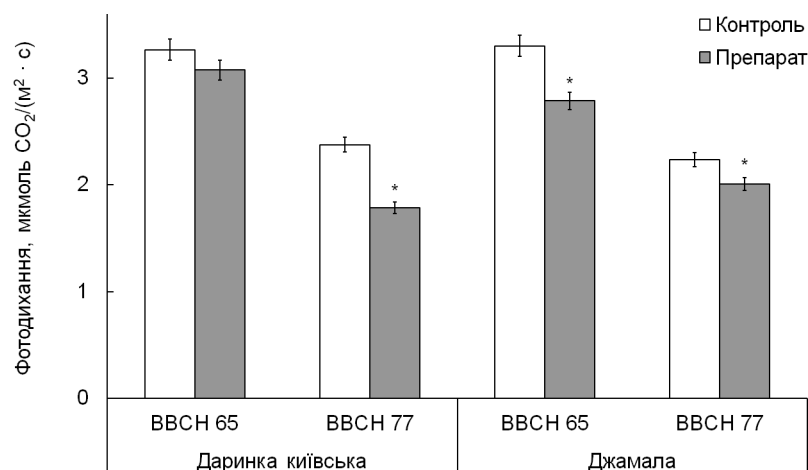


Рис. 2. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно і сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на інтенсивність фотодихання в прапорцевому листку у фази цвітіння (ВВСН 65) і молочно-воскової стиглості (ВВСН 77)

з контролем на 15,8 і 5,8 %, відповідно), а у сорту Джамала — навпаки (на 9,9 і 25,3 %, відповідно).

Загалом, у C_3 -рослин (до яких належить пшениця) фотодихання розглядають як непродуктивні витрати асимільованого у процесі фотосинтезу вуглецю. Разом з тим, за несприятливих умов, особливо посухи, цей процес відіграє захисну роль стосовно фотосинтетичного апарату, зменшуючи вірогідність утворення надлишкової кількості активних форм кисню, запобігаючи, таким чином, окиснювальному стресу [16]. Зазвичай, за нормальних умов в силу того, що в листку на світлі фотодихання і фотосинтез відбуваються одночасно, знижен-

ня першого приводить до підвищення показника видимої асиміляції CO_2 . Однак обговорюване підвищення інтенсивності видимого фотосинтезу у дослідних рослин не можна пояснити лише одночасним зниженням інтенсивності фотодихання, оскільки в абсолютних одиницях перше було значно більшим, ніж друге. Так, в середньому підвищення інтенсивності фотосинтезу в оброблених рослин обох сортів порівняно з контрольними становило $1,90 \text{ мкмоль } \text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, тоді як середнє зниження інтенсивності фотодихання — лише $0,38 \text{ мкмоль } \text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

У рослин сорту Даринка київська обробка препаратом еколайн фосфітний К-Аміно призвела до зменшення інтенсивності темного дихання (рис. 3). При цьому в перший термін вимірювання спостерігалась лише тенденція до зменшення (ефект неістотний), а в другий воно становило 11 % порівняно з контролем. За обробки препаратом еколайн фосфітний К у рослин сорту Джамала, навпаки, реєстрували досить значне підвищення цього показника як у фазу цвітіння, так і молочно-воскової стиглості (на 60 і 48,4 %, відповідно). Такі розбіжності за реакцією темного дихання на обробку рослин дослідженими препаратами можуть бути зумовлені як генотипними особливостями, так і відмінностями дії препаратів. Варто зазначити, що порівняно з інтенсивністю фотосинтезу інтенсивність темного дихання була на порядок меншою, проте очевидно, що в сорту Джамала за обробки препаратом еколайн фосфітний К значно більша кількість асимілятів витрачалася на дихання і виводилася із пластичного обміну, тим самим зменшувалась чиста продуктивність фотосинтезу.

Досліджені препарати підвищували інтенсивність транспірації прапорцевих листків рослин пшениці обох сортів і в обидва терміни вимірювання (рис. 4). Так, у сорту Даринка київська це підвищення становило 10,1 і 17,0 % у фазу цвітіння і молочно-воскової стиглості, відповідно, проте в першому випадку воно не було статистично вірогідним за $p \leq 0,05$. У сорту Джамала за обробки препаратом еколайн фосфітний К збільшення інтенсивності транспірації у перший і другий терміни вимірювання становило, відповідно, 16,9 і 38,5 %. Посилення транспіраційного потоку свідчить про ліпший розвиток кореневої системи, а також сприяє кращому транспорту елементів живлення з кореневої системи до надземної частини рослин.

Інтенсивність транспірації — важливий показник газообміну листка, який характеризує стан продихового апарату та пов'язаний із кількістю продихів на одиницю площі листка й ступенем їх відкритості. Продихи не тільки регулюють водний режим рослини, а й забезпечують надходження CO_2 всередину листка, який потім асимілюється у хлоропластах клітин мезофілу. Тому між інтенсивністю фотосинтезу і провідністю продихів зазвичай простежується досить тісний зв'язок, який у нашому досліді виявився практично функціональним ($R^2 = 0,99$) (рис. 5). Отже, інтенсифікація асиміляції CO_2 в листку супроводжувалась адекватним збільшенням провідності продихів, що свідчить про збереження узгодженості функціонування фотосинтетичного і продихового апаратів. Це підтверджується також розрахунками концентрації CO_2 у міжклітинниках листка, яка становила $328 \pm 3 \text{ ppm}$ без істотної різниці між варіантами.

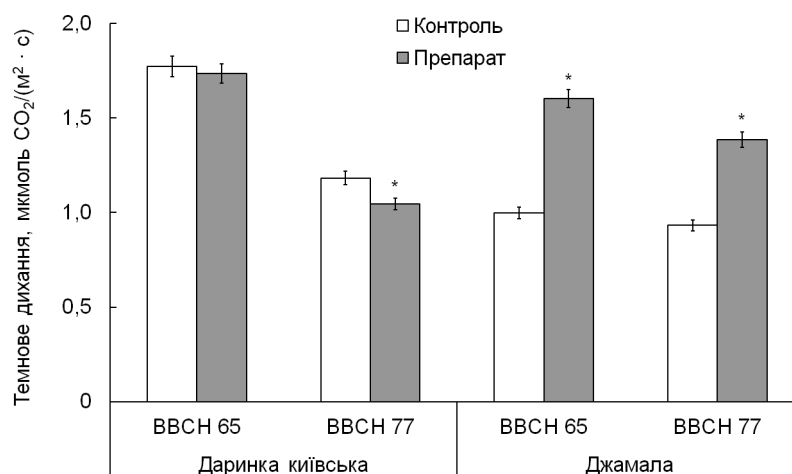


Рис. 3. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно і сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на інтенсивність темного дихання в прапорцевому листку у фазі цвітіння (BBCH 65) і молочно-воскової стиглості (BBCH 77)

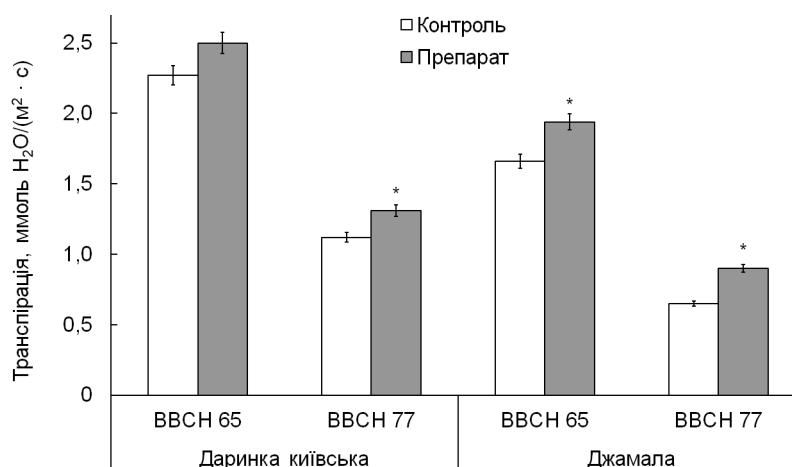


Рис. 4. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно і сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на інтенсивність транспірації в прапорцевому листку у фазі цвітіння (BBCH 65) і молочно-воскової стиглості (BBCH 77)

Фоліарна обробка препаратами, що містять фосфіт, істотно підвищила активність СОД хлоропластів у прапорцевих листках озимої пшениці обох сортів (рис. 6). В середньому по всіх варіантах це підвищення становило 20 ± 4 % порівняно з необробленими рослинами, що було істотним за $p \leq 0,05$. Цей ефект був досить стійкий і спостерігався як у фазу цвітіння, так і молочно-воскової стиглості. Варто звернути увагу на односпрямованість змін активності СОД та інтенсивності фотосинтезу дослідних рослин (див. рис. 1). Річ у тім, що навіть за нормальних умов функціонування фотосинтетичного апарату супроводжується утворенням певних кількостей активних форм кисню (АФК), які треба знешкоджувати. Зокрема, за функціонуван-

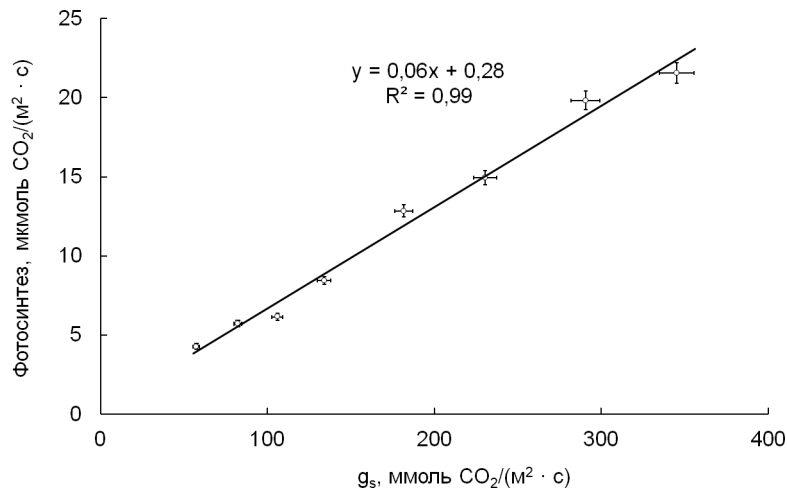


Рис. 5. Зв'язок між продиговою провідністю (g_s) та інтенсивністю фотосинтезу прапорцевих листків озимої пшениці сортів Даринка київська і Джамала за фоліарної обробки препаратами еколайн фосфітний К і К-Аміно

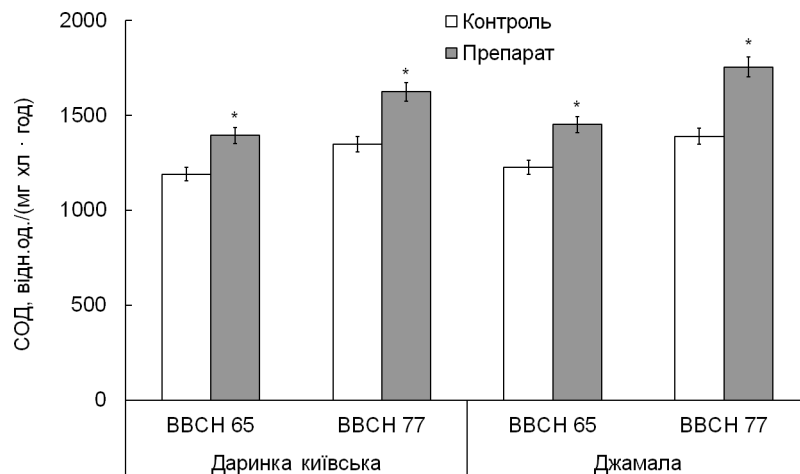


Рис. 6. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно і сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на активність супероксиддисмутази (СОД) хлоропластів у прапорцевому листку у фази цвітіння (BBCH 65) і молочно-воскової стиглості (BBCH 77)

ня електрон-транспортного ланцюга (ЕТЛ) хлоропластів частина електронів може переноситися безпосередньо на молекулярний кисень з утворенням супероксидного аніон-радикалу (реакція Мелера) [17]. Останній є дуже небезпечною АФК, детоксикація якої здійснюється СОД. За несприятливих умов (наприклад, посухи), коли гальмується використання продуктів ЕТЛ (АТФ і НАДФН) у темнових реакціях циклу Кальвіна-Бенсона, реакція Мелера значно посилюється, що зазвичай супроводжується підвищенням активності СОД [18].

Внаслідок реакції, що каталізується СОД, утворюється пероксид водню, який також є АФК. У його детоксикації в хлоропластах бере участь АПО, яка відновлює H_2O_2 до води. Тобто, дані ферменти пра-

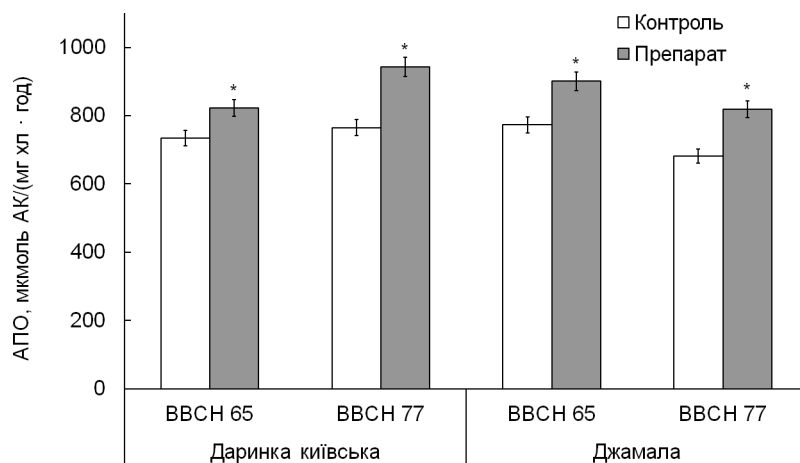


Рис. 7. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка кийвська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно і сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на активність аскорбатпероксидази (АПО) хлоропластів у прапорцевому листку у фази цвітіння (BBCH 65) і молочно-воскової стиглості (BBCH 77) (АК — аскорбінова кислота)

цюють у зв'язці, чим пояснюється подібність динаміки активності АПО хлоропластів до такої СОД (рис. 7). Отже, фоліарна обробка рослин пшениці фосфітом істотно підвищила активність головних антиоксидантних ферментів хлоропластів листків, які захищають фотосинтетичний апарат від надмірних кількостей АФК. Тому цей ефект можна розглядати як позитивний, тобто як праймування рослин до дії несприятливих чинників довкілля.

Крім того, активність ферментів СОД і АПО в хлоропластах також розглядають як один із шляхів переносу електронів в ЕТЛ хлоропластів — так званий цикл вода-вода (ЦВВ) або цикл Асада-Галівела, який виконує регуляторні і захисні функції [19]. Як і циклічний транспорт електронів, ЦВВ сприяє захисту фотосистем від фотопошкоджень і збільшенню швидкості синтезу АТФ відносно відновлення НАДФН. Вважається, що за стаціонарного освітлення активність ЦВВ невисока порівняно з основним лінійним транспортом електронів навіть за стресових умов [20]. Водночас відносна активність і фізіологічна значимість ЦВВ істотно зростають за змінного освітлення, зокрема за переходу від темряви чи затінення до яскравого світла, коли внаслідок різної швидкості індукції інтенсивність транспорту електронів може значно перевищувати потреби асиміляції CO_2 [19, 21]. Завдяки активізації ЦВВ за переходу від затінення до яскравого освітлення прискорюється синтез АТФ, що сприяє збільшенню активності Рубіско-активази і синтезу фосфорильованих цукрів-інтермедіатів циклу Кальвіна-Бенсона. У сортів пшениці виявлені істотні відмінності за швидкістю світлової індукції фотосинтезу за переходу від темряви до яскравого світла, як за оптимальних, так і за стресових умов [22]. Можна припустити, що зростання активності СОД і АПО в хлоропластах за дії фосфітних препаратів прискорювало процеси індукції фотосинтезу за мінливого освітлення, поліпшувало регуляцію енергетичного балансу в хлоропластах, чим сприяло кра-

щому і тривалішому збереженню функціональної активності фотосинтетичного апарату.

Позакоренева обробка рослин пшениці досліджуваними препаратами вплинула на зернову продуктивність. Фоліарна обробка рослин сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно статистично вірогідно збільшувала загальну масу надземної частини і зернову продуктивність цілої рослини — на 18,1 і 17,5 %, відповідно (табл. 3). Зростання продуктивності відбулося переважно через збільшення кількості зерен внаслідок підвищення на 15,1 % кількості продуктивних бічних пагонів (кущистості). Водночас спостерігалася певна тенденція до збільшення продуктивності головного пагона, у рівних частках завдяки невеликому зростанню кількості і маси зернівок.

Фоліарна обробка рослин сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К спричинювало тенденцію до зростання зернової продуктивності цілої рослини і окремих елементів (маси 1000 зерен) зернової продуктивності головного пагона (табл. 4). Маса зерна з однієї рослини за обробки препаратом збільшувалася на 12,3 % порівняно

ТАБЛИЦЯ 3. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Даринка київська препаратом еколайн фосфітний К-Аміно на зернову продуктивність

Варіант	Маса пагона(ів), г	Маса зерна, г	Кількість зерен, шт.	Маса 1000 зерен, г	К _{госп}	Продуктивна кущистість, шт.
Головний пагін						
Контроль	3,24±0,13	1,87±0,07	40,1±1,3	46,5±0,6	0,58±0,01	—
Дослід	3,55±0,17	2,02±0,10	41,3±1,4	48,7±1,1	0,57±0,01	—
% контролю	109,5	108,3	103,2	103,3	99,1	—
Ціла рослина						
Контроль	4,55±0,26	2,58±0,14	58,9±3,0	43,7±0,6	0,57±0,01	1,89±0,11
Дослід	5,37±0,28	3,03±0,16	66,6±2,8	45,3±1,0	0,56±0,01	2,18±0,08
% контролю	118,1*	117,5*	113,1	103,7	99,5	115,2

ТАБЛИЦЯ 4. Вплив фоліарної обробки рослин озимої пшениці сорту Джамала препаратом еколайн фосфітний К на зернову продуктивність

Варіант	Маса пагона(ів), г	Маса зерна, г	Кількість зерен, шт.	Маса 1000 зерен, г	К _{госп}	Продуктивна кущистість, шт.
Головний пагін						
Контроль	3,31±0,10	1,80±0,05	44,2±1,4	41,1±0,8	0,55±0,01	—
Дослід	3,42±0,09	1,83±0,06	42,9±1,6	43,7±0,8	0,53±0,01	—
% контролю	103,3	101,5	97,2	106,3	97,9	—
Ціла рослина						
Контроль	5,15±0,22	2,73±0,12	74,6±3,3	36,8±0,7	0,53±0,01	2,06±0,11
Дослід	5,97±0,33	3,07±0,17	78,5±3,1	40,4±1,6	0,52±0,01	2,53±0,16
% контролю	116,0	112,3	105,3	109,9	97,0	123,2*

з контролем. Проте статистично вірогідним в досліді було лише збільшення продуктивної кущистості рослин, яке становило 23,2 % контролю.

Прикметно, що за подібного підвищення інтенсивності фотосинтезу в дослідних рослин обох сортів (див. рис. 1) у рослин сорту Джамала за обробки препаратом еколайн фосфітний К зростала інтенсивність дихання на відміну від рослин сорту Даринка київська, оброблених препаратом еколайн фосфітний К-Аміно (див. рис. 3). Це могло бути чинником зниження чистої продуктивності фотосинтезу і меншого підвищення врожайності в сорту Джамала.

Характерно, що за дії обох препаратів відзначалося трохи більше зростання загальної маси надземної частини рослин, ніж маси зерна, і відповідно невелика тенденція до зниження $K_{\text{госп}}$. Це свідчить, що вплив препаратів на продуктивність зумовлений інтенсифікацією фотосинтезу (донора асимілятів) за відсутності або значно меншого безпосереднього впливу на розвиток репродуктивних органів (акцепторів асимілятів).

Таким чином, отримані результати засвідчують, що позакоренева обробка рослин озимої пшениці препаратами еколайн фосфітний К і еколайн фосфітний К-Аміно стимулювала фотосинтетичну активність прапорцевого листка, уповільнювала її зниження під час онтогенетичного розвитку, поліпшувала забезпечення асимілятами наливання зернівок та оптимізувала роботу фотосинтетичного апарату (зниження витрат вуглецю на фотодихання). Виявлені ефекти обробки препаратами можуть бути пов'язані як з праймувальним ефектом фосфіту (зокрема, підвищенням активності антиоксидантних ферментів), що посилює стійкість рослин до дії несприятливих абіотичних і біотичних чинників довкілля, так і з кращим розвитком кореневої системи рослин, а отже — поліпшенням засвоєння елементів мінерального живлення.

REFERENCES

1. Verma, K.K., Song, X.-P., Kumari, A., Jagadesh, M., Singh, S. K., Bhatt, R., Singh, M., Seth, C.S. & Li, Y.-R. (2025). Climate change adaptation: Challenges for agricultural sustainability. *Plant Cell Environ.*, 48, pp. 2522-2533. <https://doi.org/10.1111/pce.15078>
2. Mohammed, U., Davis, J., Rossall, S., Swarup, K., Czyzewicz, N., Bhosale, R., Foulkes, J., Murchie, E.H. & Swarup, R. (2022). Phosphite treatment can improve root biomass and nutrition use efficiency in wheat. *Front. Plant Sci.*, 13, 1017048. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1017048>
3. Xiaoyun, H., Xi, Y., Zhang, Z., Mohammadi, M.A., Joshi, J., Borza, T. & Wang-Pruski, G. (2021). Effects of phosphite as a plant biostimulant on metabolism and stress response for better plant performance in *Solanum tuberosum*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 210, 111873. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111873>
4. Rossall, S., Qing, C., Paneri, M., Bennett, M. & Swarup, R. (2016). A 'growing' role for phosphites in promoting plant growth and development. *Acta Hort.*, 1148, pp. 61-68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1148.7>
5. Swarup, R., Mohammed, U., Davis, J. & Rossall, S. (2020). Role of phosphite in plant growth and development. School of University of Nottingham, Biosciences, White paper, April. Retrieved from <https://www.nottingham.ac.uk/research/swarup...>
6. Pacheco-Narcizo, A., Trejo-Tellez, L.I., Hidalgo Contreras, J., Pastrana, R. & Gómez-Merino, F. (2022). Biostimulation of chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Sw.] in response

- to the application of phosphite. *Rev. fitotec. mex. publ. por la Sociedad Mexicana de Fitogenetica*, 45, No. 4, pp. 483-492. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.4.483>
7. Mayen-Villa, R.I., Morales-Rosales, E.J., Morales-Morales, E.J. & Lopez-Sandoval, J.A. (2023). Rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum*) en función de fosfito de potasio como fertilizante foliar. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10 (2), e3543. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3543>
 8. Adaskaveg, J.E., Förster, H., Hao, W. & Gray M. (2017). Potassium Phosphite Resistance and New Modes of Action for Managing Phytophthora Diseases of Citrus in the United States. In Deising, H.B., Fraaije, B., Mehl, A., Oerke, E.C., Sierotzki, H. & Stammer, G. (Eds), *Modern Fungicides and Antifungal Compounds*, Vol. VIII, (pp. 205-210), Braunschweig: Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft.
 9. Havlin, J.L. & Schlegel, A.J. (2021). Review of phosphite as a plant nutrient and fungicide. *Soil Syst.*, 5, 52. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5030052>
 10. Wellburn, A.R. (1994). The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.*, 144, pp. 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
 11. Busch, F.A., Ainsworth, E.A., Amtmann, A., Cavanagh, A.P., Driever, S.M., Ferguson, J.N., Kromdijk, J., Lawson, T., Leakey, A.D.B., Matthews, J.S.A., Meacham-Hensold, K., Vath, R.L., Viallet-Chabrand, S., Walker, B.J. & Papanatsiou, M. (2024). A guide to photosynthetic gas exchange measurements: Fundamental principles, best practice and potential pitfalls. *Plant Cell Environ.*, 47 (9), pp. 3344-3364. <https://doi.org/10.1111/pce.14815>
 12. Giannopolitis, C.N. & Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutase. Occurrence in higher plants. *Plant Physiol.*, 59, No. 2, pp. 309-314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
 13. Chen, G.-X. & Asada, K. (1989). Ascorbate peroxidase in tea leaves: occurrence of two isozymes and the differences in their and molecular properties. *Plant Cell Physiol.*, 30, No. 7, pp. 987-998. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a077844>
 14. Pessarakli, M. (Ed.). (2024). *Handbook of Photosynthesis* (4th Edition). CRC Press.
 15. Kovalyshyn, I.B., Shevchenko, V.V. (2020). Phosphate and phosphite: influence on the state of wheat photosynthetic apparatus. *Fiziol. rast. genet.*, 52 (6), pp. 507-517. <https://doi.org/10.15407/frg2020.06.507>
 16. Walker, B., Schmiede, S.C. & Sharkey, T.D. (2024). Re-evaluating the energy balance of the many routes of carbon flow through and from photorespiration. *Plant Cell Environ.*, 47, No. 9, pp. 3365-3374. <https://doi.org/10.1111/pce.14949>
 17. Krieger-Liszkay, A., Krupinska, K. & Shimakawa, G. (2019). The impact of photosynthesis on initiation of leaf senescence. *Physiol. Plant.*, 166, pp. 148-164. <https://doi.org/10.1111/ppl.12921>
 18. 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, pp. 16-25. <https://doi.org/10.15421/021903>
 19. Endo, T. & Asada, K. (2008). Photosystem I and Photoprotection: Cyclic Electron Flow and Water-Water Cycle. In Demmig-Adams, B., Adams, W.W. & Mattoo, A.K. (Eds.), *Photoprotection, Photoinhibition, Gene Regulation, and Environment* (pp. 205-221), Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/1-4020-3579-9_14
 20. Walker, B.J., Kramer, D.M., Fisher, N. & Fu, X. (2020). Flexibility in the energy balancing network of photosynthesis enables safe operation under changing environmental conditions. *Plants*, 9 (3), 301. <https://doi.org/10.3390/plants9030301>
 21. Sun, H., Yang, Y.-J. & Huang, W. (2020). The water-water cycle is more effective in regulating redox state of photosystem I under fluctuating light than cyclic electron transport. *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.*, 1861 (9), 148235. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2020.148235>
 22. Kedruk, A.S., Kiriziy, D.A., Stasik, O.O., Sokolovska-Sergiienko, O.G. & Tarasiuk, M.V. (2024). Effects of drought on photosynthetic induction in leaves of different wheat genotypes under dark-to-light transition. *Regul. Mech. Biosyst.*, 15 (3), pp. 504-513. <https://doi.org/10.15421/022471>

Received 26.03.2025

EFFECTS OF FOLIAR TREATMENT WITH ECOLINE PHOSPHITE FERTILIZER
ON THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS AND PRODUCTIVITY OF WHEAT

D.A. Kiriziy¹, O.O. Stasik¹, O.G. Sokolovska-Sergiienko¹, A.S. Holoboroda¹, M.V. Tarasiuk¹,
O.M. Katerynychuk²

¹Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine

²Research and Production Company «Ecoorganic» Ltd.

26 Lesia Ukrainka Boulevard, office 902, 01133 Kyiv, Ukraine

e-mail: o_stasik@yahoo.com

The study was conducted on winter bread wheat plants (*Triticum aestivum* L.) of the Darynka Kyivska and Jamala varieties, which were grown in pots with 10 kg of soil at natural temperature and light. Soil moisture in the pots was maintained at an optimal level (60–70 % of field capacity) all the time. Plants of the Darynka Kyivska variety were treated foliarly with the preparation ECOLINE Phosphite (K-Amino), those of the Jamala variety were treated with the preparation ECOLINE Phosphite (K) at a rate of 1 L/ha twice: at the end of the stem elongation stage (BBCH 39) and the milk growth stage (BBCH 71). The content of photosynthetic pigments, the gas exchange rate, and the chloroplasts antioxidant enzymes activity in flag leaves were determined at the anthesis stage (BBCH 65) and the late milk stage (BBCH 77), grain productivity indices were determined at the full grain ripeness stage. It was shown that foliar treatment of winter wheat plants with the preparations ECOLINE Phosphite (K) and ECOLINE Phosphite (K-Amino) stimulated the photosynthetic activity of the flag leaf, slowed its decline during ontogenetic development, contributed to a better supply of assimilates for grain filling, and optimized the functioning of the photosynthetic apparatus by reducing carbon loss due to photorespiration. The observed effects of treatment with the preparations can be attributed to both the priming effect of phosphite — particularly an increase in the activity of antioxidant enzymes, which enhances plant resistance to adverse abiotic and biotic environmental factors — and improved development of the plant root system, leading to better absorption of mineral nutrients.

Key words: *Triticum aestivum* L., potassium phosphite, photosynthesis, photorespiration, transpiration, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, grain productivity.

ORCID

Д.А. КІРІЗІЙ — D.A. Kiriziy <https://orcid.org/0000-0001-6079-893X>

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

О.Г. СОКОЛОВСЬКА-СЕРГІЄНКО — O.G. Sokolovska-Sergiienko <https://orcid.org/0000-0001-6967-8221>

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

М.В. ТАРАСЮК — M.V. Tarasiuk <https://orcid.org/0000-0001-5914-7208>

О.М. КАТЕРИНЧУК — O.M. Katerynychuk <https://orcid.org/0009-0001-5660-9697>