

© О. І. Присяжнюк, Н. О. Кононюк, Т. В. Шевченко, 2026
УДК 633.11“324”:581.132:631.816

DOI: 10.32636/agroscience.2026-(5)-3-8

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОТОСИНТЕТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ПІД ВПЛИВОМ МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ ТА ЕЛЕМЕНТІВ БІОЛОГІЗАЦІЇ

Олег ПРИСЯЖНЮК¹, доктор сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-4639-424X

Надія КОНОНЮК¹, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-5313-4999

Тамара ШЕВЧЕНКО², кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0001-9488-0325

¹Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна

²Національна академія аграрних наук України, вул. Омеляновича-Павленко, 9, м. Київ, 01010
e-mail: ollpris@gmail.com

Представлено результати п'ятирічних досліджень (2020–2024 рр.) активності фотосинтезу пшениці озимої (*Triticum aestivum* L.) залежно від рівня мінерального удобрення на чорноземі типовому малогумусному середньосуглинковому, від сортових особливостей, від застосування ретардантів та системи захисту рослин в умовах Правобережного Лісостепу України. Повний факторіальний експеримент включав 36 варіантів: три сорти (Легенда білоцерківська, Манера одеська, Воздвиженка), три рівні удобрення (N60P40K40, N120P60K60, N180P90K90+мікроелементи), дві системи захисту (хімічна та біологічна на основі ТАЕГРО) і два ретарданти (Квантум-Аквасил та МОДДУС 250 ЕС). Встановлено, що рівень мінерального удобрення найсильніше впливає на площу листової поверхні (ПЛП) та фотосинтетичний потенціал (ФП), забезпечуючи приріст +35 та +37 % відповідно при мінімальному впливі на чисту продуктивність фотосинтезу (ЧПФ, +1,3 %). Визначено два шляхи підвищення фотосинтетичної продуктивності: екстенсивний (удобрення – через збільшення ПЛП і ФП) та інтенсивний (сорт, ретарданти – через підвищення ЧПФ). Максимальна ПЛП досягала 41,0±3,8 тис. м²/га у фазі колосіння. Сорт Воздвиженка характеризувався найвищою ЧПФ (5,32 г/м²·добу), Легенда білоцерківська – найвищим ФП (3,18 млн м²·діб/га). МОДДУС 250 ЕС підвищував ЧПФ на 3,6 % попри зменшення ПЛП на 5 %.

Ключові слова: площа листової поверхні, хлорофіли, фотосинтетичний потенціал, чиста продуктивність фотосинтезу, мінеральне удобрення, сорт
Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

Фотосинтетична діяльність посівів є ключовим фактором формування біологічної продуктивності зернових культур. Ефективність трансформації сонячної енергії в органічну речовину визначає потенційну врожайність культури та можливості її реалізації (Petrychenko V. F., Lykhochvor V. V., 2020). За даними Zhu X. G., Long S. P., Ort D. R. (2010), теоретичний максимум ефективності перетворення сонячної радіації у біомасу C₃-рослин становить 4,6 %, тоді як реальні посіви пшениці реалізують лише 1,0–1,5 %, що свідчить про значний потенціал оптимізації фотосинтетичних процесів.

Комплексна оцінка фотосинтетичної діяльності включає аналіз площі листової поверхні (ПЛП), вмісту хлорофілів, фотосинтетичного потенціалу (ФП) та чистої продуктивності фотосинтезу (ЧПФ). За результатами досліджень Parry M. A. J., Reynolds M. P., Salvucci M. E. et al. (2011), підвищення ефективності фотосинтезу на 10–15 % може забезпечити приріст урожайності зернових на 20–30 %. Shvartau et al. (2018) встановили, що оптимізація мінерального живлення збільшує ФП посівів пшениці озимої на 30–40 % при значно меншому впливі на ЧПФ, що вказує на переважно екстенсивний характер реалізації продуктивності.

Рівень мінерального живлення суттєво впливає на параметри фотосинтетичного апарату. За даними Hospodarenko H. M. (2016), оптимізація

азотного удобрення забезпечує збільшення ПЛП пшениці озимої на 25–40 % та підвищення вмісту хлорофілів на 15–20 %. Evans J. R. (2013) показав, що до 75 % листового азоту зосереджено у хлоропластах, переважно у складі Рубіско та білків тилакоїдних мембран, що пояснює тісний зв'язок між азотним живленням та інтенсивністю фотосинтезу. Morhun V. V., Sanin Ye. Yu., Shvartau V. V. (2014) у межах програми «Клуб 100 центнерів» продемонстрували, що за збалансованого мінерального живлення ФП посівів досягав 3,5–4,0 млн м²·діб/га, що забезпечувало урожайність понад 10 т/га.

Генотипові відмінності у фотосинтетичній діяльності є важливим резервом підвищення продуктивності. Driever S. M., Lawson T., Andralojc P. J. et al. (2014) виявили суттєву генетичну варіабельність ЧПФ серед сортів пшениці (4,2–6,8 г/м²·добу), що дозволяє проводити селекцію на підвищену фотосинтетичну ефективність. Dubytska A., Kachmar O., Dubytskyi O. (2023) встановили, що за біологізованих систем удобрення ПЛП пшениці озимої в Карпатському регіоні становила 35–42 тис. м²/га, а врожайність – 4,6–5,5 т/га.

Застосування ретардантів модифікує архітектуру рослин та впливає на фотосинтетичну діяльність. Rademacher W. (2015) показав, що інгібітори біосинтезу гіберелінів (тринексапак-етил) зменшують висоту рослин на 10–20 % з одночасним

підвищенням вмісту хлорофілів на 5–8 % та покращенням світлового режиму посіву.

Незважаючи на значну кількість досліджень з окремих аспектів фотосинтетичної діяльності, комплексна оцінка впливу системи факторів (удобрення, сорт, ретардант, система захисту) на динаміку ПЛП, вміст хлорофілів, ФП та ЧПФ в рамках єдиного факторіального експерименту залишається недостатньо висвітленою (Rudavska N., Behen L., Hrecheshniuk O., 2025). Метою дослідження було встановлення закономірностей фотосинтетичної діяльності посівів пшениці озимої залежно від комплексу агротехнічних факторів в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали і методи

Дослідження проводили впродовж 2020–2024 рр. на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (Правобережний Лісостеп, Київська обл.). Ґрунт – чорнозем типовий малогумусний середньосуглинковий з вмістом гумусу 4,1–4,3 %, рухомого фосфору (за Чириковим) – 128–145 мг/кг, обмінного калію – 112–130 мг/кг, $pH_{\text{con.}}$ – 5,8–6,2.

Вегетаційний період 2020 р. характеризувався контрастними умовами: значне похолодання у травні (коефіцієнт суттєвості –2,12) на фоні підвищеної вологості (+1,54) створювало несприятливі умови для розвитку посівів у фазі кушіння – трубкування. Натомість червень був аномально спекотним (+2,67), що прискорювало проходження фаз колосіння – цвітіння. Липень і серпень за температурним режимом та кількістю опадів були близькими до норми, що забезпечило задовільні умови для наливу зерна. Загалом рік оцінюється як задовільний для формування врожаю, з компенсацією весняного стресу помірними літніми умовами.

Вегетаційний період 2021 р. відзначався помірним весняним розвитком за температурних умов, близьких до норми (квітень +0,21; травень +0,09). Критичний період настав влітку: червень був теплим (+1,64) за дефіциту опадів (–1,67), а липень — спекотним (+2,29) з продовженням посушливих умов (–1,17). Поєднання підвищених температур із дефіцитом вологи у період колосіння – цвітіння – наливу зерна обмежувало тривалість активного фотосинтезу та прискорювало старіння листового апарату. Рік характеризувався як посушливо-теплій.

Вегетаційний період 2022 р. мав нормальний весняний розвиток (квітень –0,19; травень –0,68 за температурою, опади в межах норми). Однак у червні склалися екстремальні умови: аномально висока температура (+2,18) збіглася з гострим дефіцитом опадів (–2,41), що було найбільш несприятливим поєднанням серед усіх років досліджень. Ця посуха припала на критичний період колосіння – цвітіння, що могло суттєво обмежити фотосинтетичну діяльність та озерненість колоса.

Дефіцит вологи зберігався і в липні (–1,83), хоча температурний режим нормалізувався. В серпні спостерігалось часткове відновлення вологозабезпечення.

Вегетаційний період 2023 р. був найбільш сприятливим для фотосинтетичної діяльності посівів. Квітень характеризувався підвищеною вологістю (+1,72), що забезпечило хороші запаси вологи для весняного відростання. Травень, червень і липень мали температуру та опади в межах норми (коефіцієнти суттєвості –0,12...+0,97 та –0,95...+0,02 відповідно), що створювало оптимальні умови для формування листового апарату, накопичення хлорофілів та фотосинтетичної діяльності в критичні фази трубкування – колосіння – цвітіння. Погіршення відбулося лише в серпні (аномальна спека +2,78 при дефіциті вологи –1,99), проте основні елементи продуктивності до цього часу вже сформувалися.

Вегетаційний період 2024 р. був найспекотнішим і найпосушливішим серед усіх років досліджень. Вже в квітні температура суттєво перевищувала норму (+2,53), що прискорювало фенологічний розвиток рослин. Червень (+2,36), липень (+2,49) і серпень (+2,24) характеризувалися стійкою аномальною спекою. Кількість опадів у липні мала найбільше від'ємне відхилення серед усіх місяців за п'ять років (–2,27), а в серпні дефіцит вологи зберігався (–1,38). Тривалий теплий стрес у поєднанні з посухою суттєво прискорював деградацію хлорофілів, скорочував тривалість функціонування листового апарату та знижував фотосинтетичний потенціал і чисту продуктивність фотосинтезу.

Отже, найбільш критичним для фотосинтетичної діяльності було поєднання високих температур (коефіцієнт $>+2,0$) із дефіцитом опадів (коефіцієнт $<-2,0$) у період колосіння – цвітіння (червень 2022 р., липень 2024 р.), що спричиняло передчасне старіння листків, зниження вмісту хлорофілів та скорочення фотосинтетичного потенціалу.

Схема досліду передбачала повний факторіальний експеримент із 36 варіантів. Фактор А – сорт: Легенда білоцерківська, Манера одеська, Воздвиженка. Фактор Б – рівень удобрення: мінімальний ($N_{60}P_{40}K_{40}$), середній ($N_{120}P_{60}K_{60}$), максимальний ($N_{180}P_{90}K_{90}$ +мікроелементи). Фактор В – система захисту: хімічна та біологічна (ТАЕГРО, *Bacillus subtilis*, штам 1 BS 2020). Фактор Г – ретардант: Квантум-Аквасил та МОДДУС 250 ЕС. Площа облікової ділянки – 25 м², повторність чотириразова. Попередник – соя.

Площу листової поверхні визначали методом висічок (Nichiporovich A. A., 1961) у п'яти фазах: кушіння, вихід у трубку, колосіння, цвітіння, молочна стиглість. Вміст хлорофілів (a+b) – спектрофотометрично у ацетоновому екстракті (Wellburn A. R., 1994). Фотосинтетичний потенціал та чисту продуктивність фотосинтезу розраховували

за загальноприйнятими формулами (Nichiporovich A. A., 1961). Статистичну обробку проводили методами дисперсійного аналізу (Statistica 10.0, $P < 0,05$).

Результати та обговорення

Площа листової поверхні посівів пшениці озимої демонструвала характерну одновершинну криву з максимумом у фазі колосіння (табл. 1). У фазі

кущіння ПЛП становила в середньому $11,3 \pm 1,2$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$. Найінтенсивніше наростання відбувалося у міжфазний період кущіння – трубкування, коли ПЛП зростала у 2,3 рази – до $26,1 \pm 2,8$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$. Максимальних значень ПЛП досягала у фазі колосіння – $41,0 \pm 3,8$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$ з коливаннями від 31,4 до 50,6 тис. $\text{м}^2/\text{га}$ залежно від варіанту.

Таблиця 1. Динаміка площі листової поверхні пшениці озимої, тис. $\text{м}^2/\text{га}$ (2020–2024 рр.)

Варіант	Кушіння	Трубкування	Колосіння	Цвітіння	Молочна
Середнє	$11,3 \pm 1,2$	$26,1 \pm 2,8$	$41,0 \pm 3,8$	$38,8 \pm 3,5$	$29,2 \pm 2,9$
$N_{60}P_{40}K_{40}$	$9,7 \pm 0,9$	$21,9 \pm 2,1$	$34,8 \pm 3,0$	$32,8 \pm 2,7$	$24,8 \pm 2,3$
$N_{120}P_{60}K_{60}$	$11,3 \pm 1,1$	$25,8 \pm 2,5$	$41,1 \pm 3,6$	$39,0 \pm 3,3$	$29,2 \pm 2,8$
$N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікро}$	$12,9 \pm 1,3$	$30,4 \pm 3,1$	$47,0 \pm 4,2$	$44,5 \pm 3,9$	$33,5 \pm 3,2$
Приріст, %	+33	+39	+35	+36	+35

Рівень мінерального удобрення виявив найпотужніший вплив на ПЛП серед усіх факторів. Підвищення дози добрив від $N_{60}P_{40}K_{40}$ до $N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікроелементи}$ забезпечило зростання максимальної ПЛП на 35 % – від $34,8 \pm 3,0$ до $47,0 \pm 4,2$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$. Цей ефект зумовлений стимулюванням синтезу білків та нуклеїнових кислот за підвищеного азотного живлення, формуванням більшої кількості продуктивних пагонів та подовженням періоду активного функціонування листового апарату.

Сорти суттєво відрізнялися за величиною ПЛП: Легенда білоцерківська формувала найбільшу

листову поверхню ($42,7 \pm 4,0$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$), Воздвиженка – середню ($41,5 \pm 3,9$), Манера одеська – найменшу ($38,8 \pm 3,5$). Легенда також демонструвала найповільніше зниження ПЛП після колосіння: у фазі молочної стиглості зберігалася 73 % від максимуму проти 70–71 % в інших сортів.

Вміст хлорофілів (a+b) у листках пшениці озимої демонстрував динаміку з максимумом у фазі колосіння (табл. 2). У фазі кушіння вміст хлорофілів становив $2,83 \pm 0,14$ мг/г сирої маси, а максимальних значень досягав у фазі колосіння – $3,68 \pm 0,21$ мг/г з варіюванням від 3,18 до 4,17 мг/г.

Таблиця 2. Вміст хлорофілів (a+b) у листках пшениці озимої, мг/г сирої маси (2020–2024 рр.)

Варіант	Кушіння	Трубкування	Колосіння	Цвітіння	Молочна стиглість
Середнє	$2,83 \pm 0,14$	$3,43 \pm 0,17$	$3,68 \pm 0,21$	$3,44 \pm 0,19$	$2,57 \pm 0,16$
$N_{60}P_{40}K_{40}$	$2,60 \pm 0,12$	$3,18 \pm 0,15$	$3,38 \pm 0,18$	$3,16 \pm 0,16$	$2,35 \pm 0,13$
$N_{120}P_{60}K_{60}$	$2,84 \pm 0,13$	$3,42 \pm 0,16$	$3,68 \pm 0,20$	$3,43 \pm 0,18$	$2,58 \pm 0,15$
$N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікро}$	$3,05 \pm 0,15$	$3,71 \pm 0,19$	$3,99 \pm 0,23$	$3,73 \pm 0,21$	$2,80 \pm 0,17$
Приріст, %	+17	+17	+18	+18	+19

Підвищення удобрення забезпечило приріст хлорофілів на 18 % ($+0,61$ мг/г), що суттєво менше порівняно з приростом ПЛП (+35 %). Це свідчить про переважно екстенсивний характер впливу удобрення на фотосинтетичну потужність. Сорт Воздвиженка характеризувався найвищим вмістом хлорофілів ($3,77 \pm 0,22$ мг/г), Легенда білоцерківська – проміжним ($3,70 \pm 0,20$), Манера одеська – найнижчим ($3,58 \pm 0,19$). МОДДУС 250 ЕС

підвищував концентрацію пігментів на 2,5 % порівняно з Квантум-Аквасил ($3,73$ проти $3,64$ мг/г), що пояснюється концентруванням пігментів у більш компактних листках.

Фотосинтетичний потенціал за вегетацію становив у середньому $2,99 \pm 0,38$ млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$ з варіюванням від 2,32 до 3,78 млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$ (табл. 3, рис. 3). Різниця у 63 % між крайніми варіантами свідчить про значний потенціал оптимізації.

Таблиця 3. Фотосинтетичний потенціал пшениці озимої, млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$ (2020–2024 рр.)

Варіант	Кушіння–Вихід в трубку	Трубкування–Колосіння	Колосіння–Цвітіння	Цвітіння–Молочна стиглість	За вегетацію
Середнє	$0,52 \pm 0,05$	$1,03 \pm 0,10$	$0,57 \pm 0,06$	$0,89 \pm 0,09$	$2,99 \pm 0,38$
$N_{60}P_{40}K_{40}$	$0,44 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,08$	$0,48 \pm 0,05$	$0,74 \pm 0,07$	$2,52 \pm 0,30$
$N_{120}P_{60}K_{60}$	$0,53 \pm 0,05$	$1,02 \pm 0,09$	$0,57 \pm 0,06$	$0,90 \pm 0,08$	$3,00 \pm 0,36$
$N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікро}$	$0,61 \pm 0,06$	$1,19 \pm 0,11$	$0,66 \pm 0,07$	$1,03 \pm 0,10$	$3,46 \pm 0,42$
Приріст, %	+39	+38	+38	+39	+37

Найбільшу частку ФП (34,5 %) формував період виходу в трубку – колосіння (1,03 млн м²·діб/га), а період цвітіння – молочна стиглість забезпечував 29,8 %. Легенда білоцерківська характеризується найвищим ФП

(3,18±0,40 млн м²·діб/га), Воздвиженка – 2,98±0,37, Манера одеська – 2,82±0,34.

ЧПФ демонструвала максимум у період трубкування – колосіння – 6,45±0,48 г/м²·добу (табл. 4). Середня ЧПФ за вегетацію становила 5,08±0,32 г/м²·добу.

Таблиця 4. Чиста продуктивність фотосинтезу пшениці озимої, г/м²·добу (2020–2024 рр.)

Варіант	Кушіння–Вихід в трубку	Трубкування – Колосіння	Колосіння–Цвітіння	Цвітіння–Молочна стиглість	За вегетацію
Середнє	4,71±0,31	6,45±0,48	5,11±0,38	4,05±0,30	5,08±0,32
Воздвиженка	4,92±0,33	6,76±0,51	5,35±0,40	4,26±0,32	5,32±0,34
Легенда білоц.	4,75±0,30	6,45±0,47	5,14±0,37	4,04±0,29	5,11±0,31
Манера одеська	4,46±0,28	6,14±0,44	4,84±0,35	3,84±0,27	4,80±0,29
Квантум-Аквасил	4,59±0,30	6,35±0,46	5,02±0,36	3,99±0,28	4,99±0,30
МОДДУС 250 ЕС	4,84±0,32	6,55±0,49	5,21±0,39	4,11±0,31	5,17±0,33

Аналіз впливу удобрення на ЧПФ виявив підвищення дози від мінімальної до максимальної практично не вплинуло на середню ЧПФ (4,97 проти 5,04 г/м²·добу, приріст лише 1,3 %). Це пояснюється посиленням взаємного затінення листків у густому посіві. Натомість сортовий фактор суттєво впливав: Воздвиженка перевищувала Манеру одеську на 11 % за ЧПФ, що пов'язано з оптимальною архітектонікою рослин та вищим вмістом

хлорофілів. МОДДУС 250 ЕС забезпечував ЧПФ на 3,6 % вищу за Квантум-Аквасил завдяки покращенню світлового режиму у посіві.

Регресійний аналіз, виконаний за чотирма рівнями азотного живлення з включенням абсолютного контролю без удобрення (N₀), виявив принципово різний характер залежності показників фотосинтетичної діяльності від дози азотного удобрення (рис. 1).

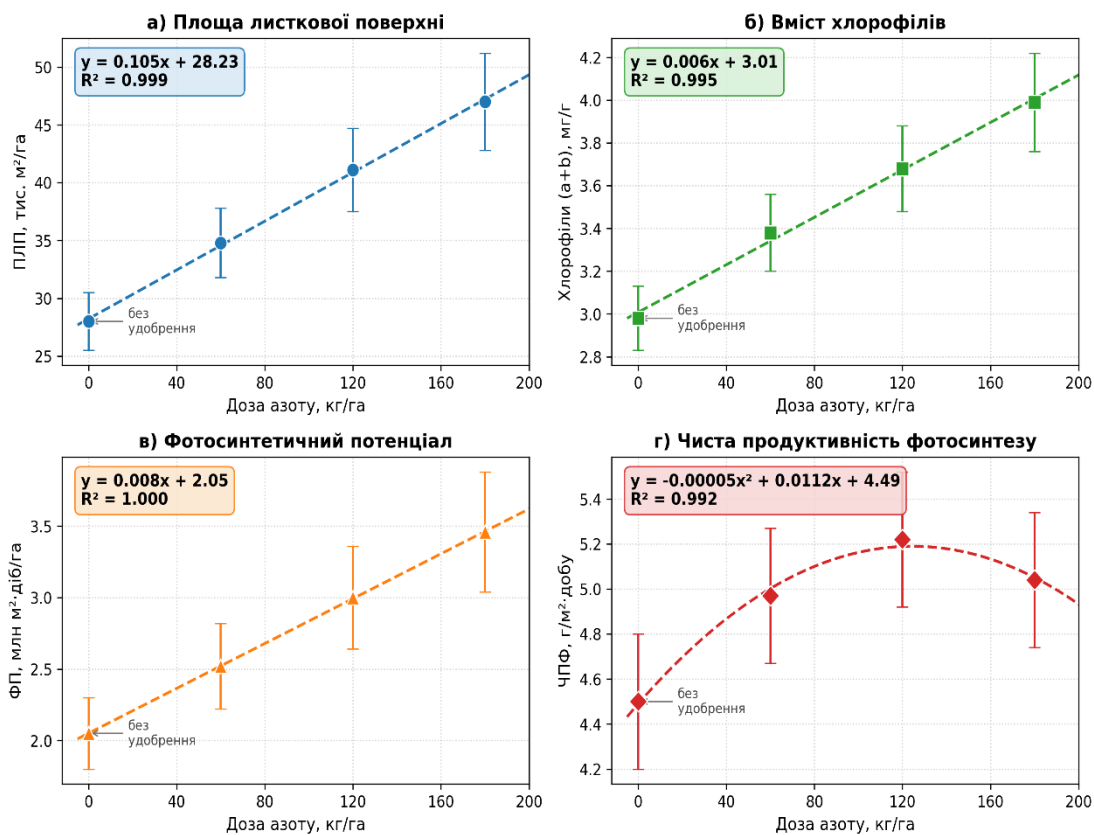


Рис. 1. Залежність параметрів фотосинтетичної активності пшениці озимої від дози азотного удобрення (за 2020–2024 рр.)

Площа листової поверхні, вміст хлорофілів та фотосинтетичний потенціал демонстрували

лінійну залежність від дози азоту з високими коефіцієнтами детермінації ($R^2 = 0,992\text{--}1,000$).

Зокрема, кожен додатковий 10 кг/га азоту забезпечували приріст ПЛП на 1,05 тис. м²/га (рис. 1а), вмісту хлорофілів — на 0,06 мг/г (рис. 1б) та ФП — на 0,08 млн м²·дб/га (рис. 1в). Лінійність цих залежностей свідчить про те, що навіть максимальна доза N₁₈₀ не досягла порогу насичення асиміляційного апарату за кількісними параметрами. Натомість ЧПФ описувалася параболічною залежністю: за відсутності удобрення вона становила лише 4,50 г/м²·добу (обмеження фотосинтетичного апарату за дефіциту азоту), зростала до максимуму при N₁₂₀ (5,22 г/м²·добу), після чого відбувалося незначне зниження до 5,04 г/м²·добу при N₁₈₀ (рис. 1г). Це підтверджує що надмірне нарощування листової поверхні посилює взаємне затінення листків і знижує середню ефективність роботи фотосинтетичного апарату. З практичної точки зору, це вказує на доцільність оптимізації не лише дози добрив, а й архітектури посіву шляхом добору сортів із вертикальною орієнтацією верхніх листків, що простежується в працях інших вчених (Zhu X. G. et al., 2010; Parry M. A. J. et al., 2011).

Комплексна оцінка впливу рівнів удобрення (рис. 2) дозволила візуалізувати диспропорції між кількісними та якісними параметрами фотосинтезу. За мінімального удобрення (N₆₀P₄₀K₄₀) показники ПЛП, хлорофілів та ФП становили лише 74–85 % від максимальних значень, тоді як ЧПФ сягала 95 % від найвищого рівня. Середнє удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) забезпечувало збалансований профіль із ЧПФ на рівні 100 % від максимуму при 87–95 % кількісних показників. Максимальне удобрення (N₁₈₀P₉₀K₉₀+мікроелементи) виводило всі кількісні показники на 100 %, проте ЧПФ знижувалася до 97 %. Збереження ПЛП у фазі молочної стиглості практично не відрізнялося між рівнями удобрення (71–73 % від максимуму фази колосіння), що свідчить про однакову інтенсивність старіння листового апарату незалежно від фону живлення. Таким чином, середній рівень удобрення забезпечує оптимальне співвідношення між кількісними та якісними параметрами фотосинтетичної діяльності, що узгоджується з концепцією збалансованого живлення.

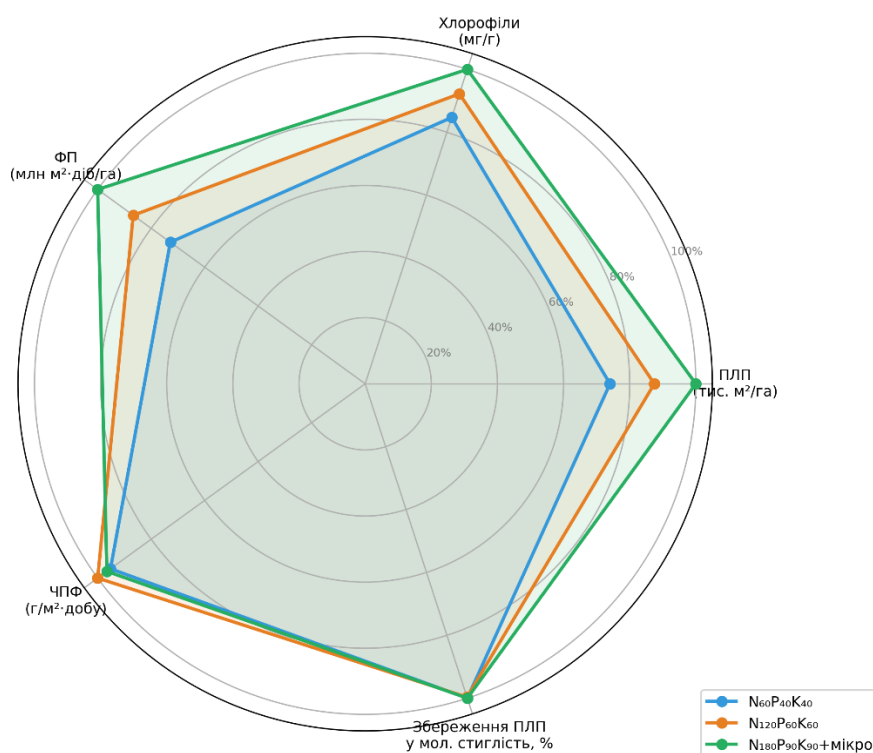


Рис 2. Радіальна діаграма порівняння трьох рівнів удобрення за показниками фотосинтетичної активності

Аналіз кореляційної матриці (рис. 3) виявив диференційований характер взаємозв'язків між показниками фотосинтетичної діяльності та рівнем азотного живлення. Найсильніші позитивні кореляції встановлено між ПЛП та ФП ($r = 0,999$), ПЛП та хлорофілами ($r = 0,965$), а також між хлорофілами та ЧПФ ($r = 0,983$). Доза азоту демонструвала високу позитивну кореляцію з ПЛП ($r = 0,704$), ФП ($r = 0,707$) та хлорофілами ($r = 0,719$), що підтверджує лінійний характер впливу

удобрення на кількісні параметри фотосинтезу. Водночас кореляція дози азоту з ЧПФ була помітно слабшою ($r = 0,559$), що кількісно характеризує вплив удобрення. Практичне значення має тісний зв'язок між вмістом хлорофілів та ЧПФ ($r = 0,983$): це дозволяє використовувати оперативне визначення хлорофілів (наприклад, хлорофілометром SPAD) як непрямий показник ефективності роботи фотосинтетичного апарату у виробничих умовах. За шкалою Чеддока зв'язки

доза азоту з ПЛП, ФП та хлорофілами кваліфікуються як високі ($r = 0,70\text{--}0,72$), тоді як із ЧПФ — лише як помітний ($r = 0,559$), що показує переважно екстенсивний механізм впливу

удобрення; натомість взаємозв'язки між власне параметрами фотосинтетичного апарату (ПЛП, хлорофіли, ФП, ЧПФ) сягають градації дуже високих ($r = 0,95\text{--}0,999$).

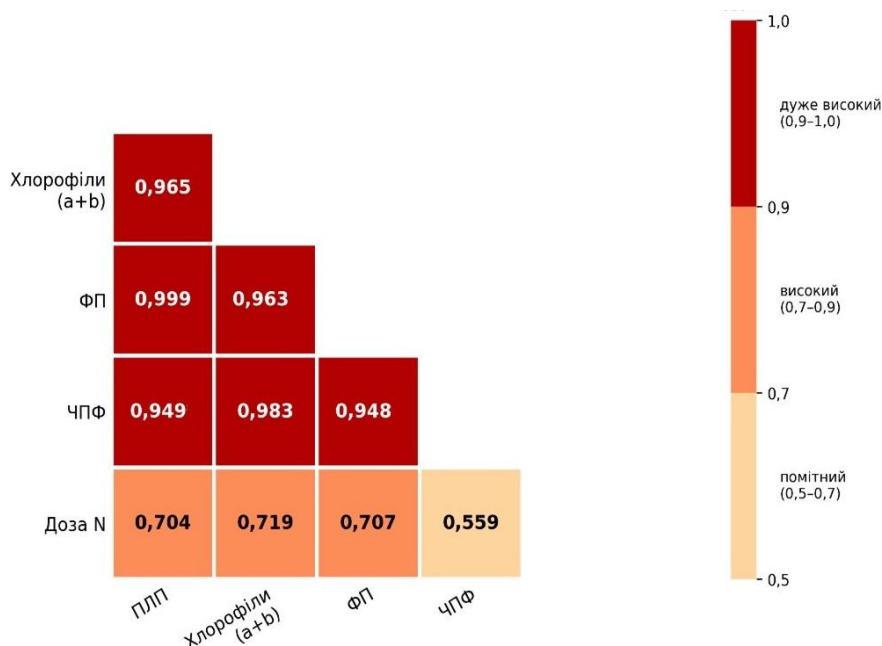


Рис. 3. Кореляційна матриця показників фотосинтетичної активності пшениці озимої (ПЛП, хлорофіли, ФП, ЧПФ, доза N) з градацією сили зв'язку за шкалою Чеддока ($n = 12$; $P < 0,05$)

Аналіз структури фотосинтетичного потенціалу за міжфазними періодами (рис. 4) засвідчив, що підвищення рівня удобрення збільшувало ФП пропорційно в усі періоди вегетації зі збереженням відносної структури. Незалежно від рівня удобрення, найбільший внесок у загальний ФП забезпечував період трубкування — колосіння (34–35 %), найменший — кушіння — трубкування (17–18 %). Період цвітіння — молочна стиглість, критичний для наливу зерна, формував 29–30 %

загального ФП. За мінімального удобрення загальний ФП становив 2,52 млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$, за середнього — 3,02, за максимального — 3,49 млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$. Приріст ФП між мінімальним та максимальним рівнями удобрення розподілявся між міжфазними періодами практично рівномірно (+37–39 %), що свідчить про стабільний позитивний вплив підвищеного мінерального живлення на тривалість та інтенсивність функціонування листового апарату впродовж усієї вегетації.

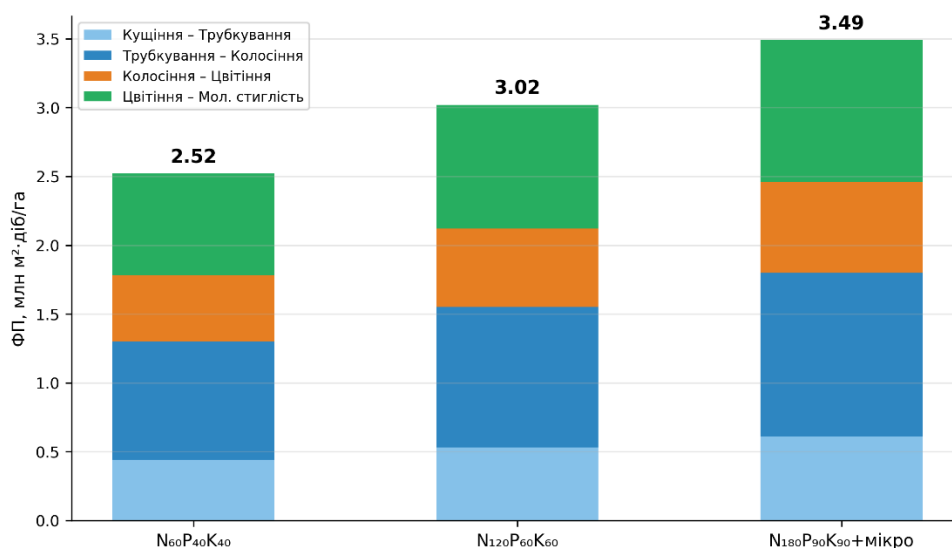


Рис. 4. Структура ФП: діаграма з накопиченням за міжфазними періодами для кожного рівня удобрення

Для формування 1 т зерна за наших умов необхідний ФП на рівні 420–490 тис. м²·діб, що відповідає літературним даним (Nichiporovich A. A., 1961; Petrychenko V. F., Lykhochvor V. V., 2020; Kleczewski & Whaley, 2018). Відтак, заходи з

Висновки

За результатами досліджень встановлено два механізми формування фотосинтетичної продуктивності посівів пшениці озимої, що визначають стратегію оптимізації технології вирощування: екстенсивний реалізується через мінеральне удобрення, яке лінійно збільшує кількісні параметри асиміляційного апарату (ПЛП на 35 % та ФП на 37 %) за мінімального впливу на якісний показник (ЧПФ, +1,3 %); та інтенсивний — реалізується через добір сорту й застосування ретарданту, які підвищують ефективність роботи листового апарату (ЧПФ на 3,6–11,0 %) без нарощування площі листя. Розмежування цих механізмів є методичною основою для диференційованого добору елементів технології вирощування під конкретну виробничу мету.

Доза мінерального живлення N₁₂₀P₆₀K₆₀ забезпечує найкраще співвідношення показників фотосинтезу посівів пшениці: ЧПФ досягає максимуму (5,22 г/м²·добу) за рівня ПЛП, хлорофілів та ФП 87–95 % від максимально удобреного варіанта. Подальше підвищення дози до N₁₈₀P₉₀K₉₀ знижує ЧПФ (до 5,04 г/м²·добу) внаслідок посилення взаємного затінення листків, через що економічно та фізіологічно виправдане лише за цілеспрямованого нарощування ФП, скажімо з метою формування високоякісного насіння.

Серед досліджених елементів технології визначено кращі варіанти за фотосинтетичною активністю: за сортом — Воздвиженка (найвищі

оптимізації фотосинтетичної діяльності необхідно спрямовувати насамперед на збільшення ФП у період трубкування — колосіння, який визначає до третини загального фотосинтетичного потенціалу посіву.

ЧПФ 5,32±0,34 г/м²·добу та вміст хлорофілів) для інтенсивного типу і Легенда білоцерківська (найвищий ФП 3,18±0,40 млн м²·діб/га) для екстенсивного; за ретардантом — МОДДУС 250 ЕС, який попри зменшення ПЛП на 5 % підвищує вміст хлорофілів на 2,5 % та ЧПФ на 3,6 % завдяки оптимізації світлового режиму посіву. Критичним для оптимізації є період трубкування — колосіння, що формує 34–35 % загального ФП і максимальні значення ПЛП (41,0±3,8 тис. м²/га) та хлорофілів (3,68±0,21 мг/г), тому агрозаходи доцільно проводити саме в цій фазі.

Установлений дуже високий кореляційний зв'язок між вмістом хлорофілів та ЧПФ ($r = 0,983$) дає змогу використовувати оперативне визначення хлорофілів (хлорофілометр SPAD) як непрямий експрес-індикатор ефективності фотосинтезу для коригування азотного живлення в системах точного землеробства. На підставі визначених кращих варіантів рекомендовано два оптимізовані комплекси елементів технології: для максимізації фотосинтетичного потенціалу — Легенда білоцерківська + N₁₈₀P₉₀K₉₀ + хімічний захист + Квантум-Аквасил (ФП = 3,78 млн м²·діб/га); для максимізації ефективності фотосинтезу за помірних витрат — Воздвиженка + N₁₂₀P₆₀K₆₀ + хімічний захист + МОДДУС 250 ЕС. Орієнтиром оптимізації фотосинтетичної активності посівів є потреба у ФП на рівні 420–490 тис. м²·діб для формування 1 т зерна.

Список використаної літератури

Driever S. M., Lawson T., Andralojc P. J., Raines C. A., Parry M. A. J. (2014). Natural variation in photosynthetic capacity, growth, and yield in 64 field-grown wheat genotypes. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4959–4973. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru253>

Dubyt'ska A., Kachmar O., Dubyt'skyi O. (2023). Influence of biologized fertilization systems on physical and chemical properties of soil under winter wheat. *Agroscience and Practice*, 2(2), 11–18. DOI: [https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-\(2\)-2-2](https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-(2)-2-2)

Dubyt'skyi O., Kachmar O., Dubyt'ska A., Vavrynovych O. (2023). Influence of biologized fertilization systems on the development of major diseases of winter wheat and its productivity. *Agroscience and Practice*, 2(3), 18–26. DOI: [https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-\(2\)-3-3](https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-(2)-3-3)

Evans J. R. (2013). Improving photosynthesis. *Plant Physiology*, 162(4), 1780–1793. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.113.219006>

Hospodarenko H. M. (2016). Fertilization of agricultural crops. Kyiv: SIK hrup UKRAINA, 276 p.

Kachmar O., Dubyt'ska A., Shcherba M., Saveryn I., Taravska O. (2023). Influence of fertilization systems on agrophysical soil state and productivity of row crops. *Agroscience and Practice*, 2(1), 21–29. DOI: [https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-\(2\)-1-3](https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-(2)-1-3)

Kleczewski, N. M., & Whaley, C. (2018). Assessing the utility of the growth regulator trinexapac-ethyl and fungicides in mid-Atlantic soft red winter wheat production systems. *Crop Protection*, 104, 60–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.011>

Li, H., Zhao, J., Feng, H., Huang, L., & Kang Z. (2013). Biological control of wheat stripe rust by an

endophytic *Bacillus subtilis* strain E1R-j in greenhouse and field trials. *Crop Protection*, 43, 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.09.008>

Morhun V. V., Sanin Ye. Yu., Shvartau V. V. (2014). Club of 100 centners. Modern varieties and systems of nutrition and protection of winter wheat. Kyiv: Lohos, 148 p.

Nichiporovich A. A. (1961). Photosynthetic activity of plants in crops. AN SSSR, 136 p.

Parry M. A. J., Reynolds M. P., Salvucci M. E., Raines C., Andralojc P. J., Zhu X. G., Price G. D., Condon A. G., Furbank R. T. (2011). Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62(2), 453–467. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq304>

Petrychenko V. F., Lykhochvor V. V. (2020). Plant production. New technologies for growing field crops. 5th ed. Lviv: Ukrainski tekhnolohii, 806 p. DOI: <https://doi.org/10.31073/roslynnytstvo5vydannya>

Rademacher W. (2015). Plant growth regulators: backgrounds and uses in plant production. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(4), 845–872. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9541-6>

Rudavska, N., Grechesnyuk, O., Begen, L. (2025). Formation of individual elements of winter wheat productivity depending on agrotechnological measures. *Agroscience and Practice*, 4(3), 27–32. [https://doi.org/10.32636/agroscience.2025-\(4\)-3-5](https://doi.org/10.32636/agroscience.2025-(4)-3-5)

Shvartau, V. V., Mykhalska, L. M., Makoveychuk, T. I. (2018). The content of trace elements in winter wheat plants under the action of retardants. *Plant Physiology and Genetics*, 50(6), 474–483. <https://doi.org/10.15407/frg2018.06.474>

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. *Journal of Plant Physiology*, 144(3), 307–313. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)

Zhu X. G., Long S. P., Ort D. R. (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 235–261. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112206>

PATTERNS OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF WINTER WHEAT AS AFFECTED BY MINERAL FERTILIZATION AND BIOLOGIZATION PRACTICES

Oleh PRYSIAZHNIUK, ORCID: 0000-0002-4639-424X

Nadiya KONONIUK, ORCID: 0000-0002-5313-4999

Tamara SHEVCHENKO, ORCID: 0000-0001-9488-0325

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets of NAAS

The results of a five-year study (2020–2024) on the photosynthetic activity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by mineral fertilization level, varietal characteristics, the application of growth retardants, and plant protection systems on a typical low-humus medium-loamy chernozem in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine are presented. The full-factorial experiment comprised 36 treatments combining three varieties ('Lehenda Bilotserkivska', 'Manera Odeska', and 'Vozdvyzhenka'), three fertilization levels ($N_{60}P_{40}K_{40}$, $N_{120}P_{60}K_{60}$, and $N_{180}P_{90}K_{90}$ supplemented with micronutrients), two plant protection systems (chemical and biological, the latter based on TAEGRO), and two growth retardants (Quantum-Aquasil and MODDUS 250 EC). Mineral fertilization had the strongest effect on leaf area and photosynthetic potential, increasing these parameters by 35 and 37%, respectively, while exerting only a minor influence on net photosynthetic productivity (+1.3%). Two pathways for enhancing photosynthetic productivity were identified: an extensive pathway, associated with fertilization and an increase in leaf area and photosynthetic potential, and an intensive pathway, associated with varietal characteristics and growth-retardant application, which increased net photosynthetic productivity. The maximum leaf area reached 41.0 ± 3.8 thousand m^2/ha at the heading stage. The variety 'Vozdvyzhenka' exhibited the highest net photosynthetic productivity (5.32 g/m^2 per day), whereas 'Lehenda Bilotserkivska' had the highest photosynthetic potential (3.18 million $m^2 \cdot days/ha$). MODDUS 250 EC increased net photosynthetic productivity by 3.6% despite reducing leaf area by 5%.

Keywords: winter wheat, photosynthetic activity, leaf area, chlorophyll, photosynthetic potential, net photosynthesis productivity, mineral fertilization, retardants, variety.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 26.2.2026

Погоджено до друку: 6.8.2026

Опубліковано: 30.9.2026