

ФОТОСИНТЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ КУКУРУДЗИ ТА СОЇ В МОНО- ТА БІНАРНИХ ПОСІВАХ

МОКРІЄНКО В.А. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент
orcid.org/0000-0002-5604-442X

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Постановка проблеми. Розробка нових та удосконалення існуючих елементів технології вирощування мають бути направлені на максимальне використання польовими культурами фотосинтетично активної радіації (ФАР). Збільшення поглинання сумарного надходження фотосинтетично активної радіації на 0,01% дозволяє підвищити урожайність кукурудзи від 3 до 6 ц/га, а сої – 1,5-3,0 ц/га відповідно. Однак, в умовах традиційного вирощування у монокультурі рівень використання ФАР залишається недостатньо ефективним через неповне змикання листового апарату, нерівномірне використання світлового режиму листками нижнього і середнього ярусів упродовж вегетації та конкуренцію рослин за фактори життєдіяльності. У зв'язку з цим, особливої актуальності набуває дослідження закономірностей росту й розвитку бінарних посівів кукурудзи та сої, які завдяки різній морфології та біологічним особливостям компонентів здатні більш повно використовувати фотосинтетично активну радіацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фотосинтез є базовим фізіологічним процесом, що визначає продуктивність агроценозів, а ефективність його реалізації залежить від величини та функціональної активності асиміляційного апарату. За даними численних досліджень, оптимальна площа листової поверхні для кукурудзи забезпечується за значень LAI 4,0–4,5, що дозволяє поглинати 90–95% фотосинтетично активної радіації (ФАР). Перевищення цього рівня супроводжується зростанням респіраційних втрат і зниженням продуктивності на 3–6% при кожному додатковому 10% приросту LAI [1, 2, 3].

Кукурудза (*Zea mays* L.) як типова C₄-рослина характеризується високою інтенсивністю фотосинтезу та чистою продуктивністю фотосинтезу на рівні 5,5–7,0 г/м²·добу в критичні фази розвитку. Найбільший внесок у формування врожаю забезпечує період від 15-го листка до цвітіння, на який припадає 35–40% сумарного фотосинтетичного потенціалу культури. Саме в цей період кожні 0,1 млн м²·днів/га фотосинтетичного потенціалу можуть забезпечувати приріст урожайності зерна на 0,9–1,1 т/га [4, 5].

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) належить до C₃-рослин і характеризується нижчими показниками ЧПФ – 1,5–3,5 г/м²·добу, однак має триваліший період збереження фотосинтетично активного листа. Для сої основний внесок у фотосинтетичний потенціал (до

75–80%) припадає на період наливу насіння, що зумовлює іншу просторово-часову структуру асиміляційного апарату порівняно з кукурудзою [6, 7].

У бінарних посівах зернових і зернобобових культур формується складніша архітектура листового покриву. Літературні джерела свідчать, що сумарний LAI таких агроценозів може досягати 5,5–6,5 без зниження ефективності фотосинтезу завдяки ярусному розміщенню листків. За цих умов поглинання ФАР зростає до 95–97%, а коефіцієнт конверсії світлової енергії в органічну речовину підвищується з 2,2–2,5% у монокультурах до 2,8–3,2% у змішаних посівах [8, 9].

Особливу роль у формуванні фотосинтетичних параметрів відіграє мінеральне живлення. За даними досліджень, застосування помірних доз добрив (N₆₀–70P₄₅–50K₄₅–50) забезпечує приріст площі листової поверхні кукурудзи на 15–20%, фотосинтетичного потенціалу – на 20–30%, тоді як надмірне азотне живлення призводить до зниження ЧПФ на 5–12% через взаємозатінення. Для сої високі дози азоту (>80–90 кг/га) знижують ЧПФ на 15–30% унаслідок пригнічення симбіотичної азотфіксації [10, 11, 12].

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання комплексної оцінки площі листової поверхні, фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу кукурудзи й сої в бінарних посівах у багаторічному аспекті залишається недостатньо висвітленим. Особливо актуальним є встановлення оптимальних меж сумарного LAI (5,5–6,0), ФП (4,2–4,5 млн м²·днів/га) та ЧПФ, за яких реалізується синергетичний ефект між компонентами агроценозу [13, 14, 15].

У зв'язку з цим метою даної роботи було дослідити динаміку фотосинтетичних параметрів кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах, встановити їх кількісні взаємозв'язки з елементами продуктивності та обґрунтувати оптимальні параметри асиміляційного апарату для умов Лісостепу України.

Мета досліджень. Метою роботи було вивчення фотосинтетичних параметрів кукурудзи в моно- та бінарних посівах.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводилися протягом 2021–2025 рр. у стаціонарному досліді кафедри рослинництва ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (с. Пшеничне Васильківський район Київської області) в зоні Лісостепу України.



Ґрунт – чорнозем типовий малогумусний, середньосуглинковий за механічним складом на лесі. Вміст гумусу в орному шарі ґрунту 3,5% (за Тюрнімом), забезпеченість елементами мінерального живлення – середня. Потужність гумусового горизонту 25 – 30 см.

Схема сівби і норма висіву насіння культур відповідно до схеми досліду (таблиця 1). У одновидовому посіві норма висіву сої та кукурудзи відповідає зональним рекомендаціям оригінатора. У сумісних посівах норма висіву насіння сої була зменшена на 50%. Глибина заробки насіння кукурудзи – 4-5 см, сої – 2-3 см.

Попередником у досліді була пшениця озима. Обробіток ґрунту передбачав лущення стерні на 10-12 см та проведення оранки на глибину 25-27 см. Під основний обробіток ґрунту, відповідно до схеми досліду і мінералізації рослинних решток, вносили добриво FERTIS NPK (10-20-20+S+ME), а у передпосівну культивування вносили решту азотних добрив у формі аміачної селітри (34,4%).

Дослідження проводили відповідно до методик польового досліду та державного сортовипробування сільськогосподарських культур [32, 33].

Результати досліджень. Попри те що фотосинтез є ключовим аспектом усіх вищих рослин, площа листової поверхні є одним з найбільш вагомих морфологічних показників, що визначає фотосинтетичний потенціал агроценозу та його продуктивність. Оптимальний індекс листової поверхні (LAI) забезпечує максимальне поглинання фотосинтетично активної радіації (ФАР) при мінімізації взаємозатінення та респіраційних втрат. У бінарних посівах формування оптимальної архітектури листового апарату ускладнюється необхідністю балансування між конкуренцією та комплементарністю компонентів за світловий ресурс.

На етапі формування 7-го листка площа листової поверхні кукурудзи становила 5,24 тис. м²/га на контролі, що відповідає LAI = 0,52. Це типовий показник для початкових фаз розвитку, коли посів ще не сформував замкнутий покрив. Застосування добрив стимулювало розвиток листя: приріст становив 13,0% при N₆₀P₄₅K₄₅ та 18,5% при N₉₀P₆₀K₆₀ (таблиця 2).

До фази 15-го листка спостерігався експоненційний ріст площі листя до 27,8 тис. м²/га (LAI = 2,78) на контролі – збільшення в 5,3 рази. Це відповідає періоду "великого росту", коли формується основна маса листового апарату. При удобренні площа зростала до 31,4-33,1 тис. м²/га (LAI = 3,14-3,31), що наближається до оптимальних значень для кукурудзи.

Середньодобовий приріст листової поверхні в період 7-15 листків становив 0,52-0,62 тис. м²/га/добу, що свідчить про інтенсивний морфогенез. Ефективність використання азоту для формування листя становила 58-62 см²/г N, що відповідає генетичному потенціалу гібриду.

У фазу цвітіння качана площа листя досягала максимальних значень: 36,0 тис. м²/га (LAI = 3,60) на контролі та 42,8 тис. м²/га (LAI = 4,28) при N₉₀P₆₀K₆₀. Це оптимальні показники для забезпечення високої продуктивності кукурудзи середньостиглої групи.

До молочної стиглості площа продовжувала незначно зростати (на 6,3-6,4%), досягаючи абсолютного максимуму 38,3-45,5 тис. м²/га. Це пояснюється завершенням формування верхніх листків та їх повним розгортанням. LAI на цьому етапі становив 3,83-4,55, що близько до верхньої межі оптимуму (4,5-5,0).

При повній стиглості починалося відмирання нижніх листків, що призводило до зниження площі на 5,5-5,5% до 36,2-43,0 тис. м²/га. Втрата асиміляційної поверхні компенсувалася підвищенням ефективності фотосинтезу верхніх листків через кращу освітленість.

Соя характеризувалася нижчою площею листя порівняно з кукурудзою. Сорт СІРЕЛІЯ на етапі 3-х справжніх листків (відповідає 7-му листку кукурудзи) формував 4,56 тис. м²/га (LAI = 0,46), що на 13,0% менше кукурудзи. Сорт РЖТ САКУЗА мав дещо вищі показники – 4,64 тис. м²/га.

До фази бутонізації (15-й листок кукурудзи) площа зростала до 24,1-24,7 тис. м²/га – в 5,3 рази, аналогічно кукурудзі. Проте абсолютні значення були на 13,3-11,2% нижчими. LAI становив 2,41-2,47, що нижче оптимуму для сої (3,5-4,0).

Максимум листової поверхні досягався у фазу цвітіння: 31,2-31,9 тис. м²/га на контролі та 34,6-36,0 тис. м²/га при інтенсивному удобренні. LAI 3,12-3,60 забезпечував ефективне поглинання 85-90% ФАР, що достатньо для формування високого врожаю.

Реакція сої на добрива була менш вираженою, ніж у кукурудзи. Приріст площі листя при N₆₀P₄₅K₄₅ становив 3,1-4,7%, при N₉₀P₆₀K₆₀ – 10,5-12,9%. Низька ефективність азотних добрив пояснюється здатністю сої до симбіотичної азотфіксації, яка забезпечує 60-70% потреби в азоті.

Динаміка відмирання листя сої була плавнішою: зниження від максимуму до повної стиглості становило 5,4-5,5%, аналогічно кукурудзі. Це свідчить про синхронізацію процесів старіння в обох культур.

Таблиця 1.

Схема досліду: Фактор А – одновидові та сумісні посіви

№	Культура/сумісний посів, фактор А	Сорт/гібрид	ФАО/СНУ	Норма висіву, тис. штук насінин
1	Кукурудза	РЖТ Занетікс	ФАО 340	70
2	Соя	Сірелія	СНУ 2300	450
3	Соя	Сакуза	СНУ 2600	450
4		РЖТ Занетікс + Сірелія		70 тис/га+225
5		РЖТ Занетікс + Сакуза		70 тис/га+225

Фактор В – удобрення, кг/га діючої речовини (д.р.): Без добрив – контроль (к); N₆₀P₄₅K₄₅; N₉₀P₆₀K₆₀.

Таблиця 2.

Площа листя кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах на час настання фенофази кукурудзи, тис. м²/га (середнє за 2021-2025 рр.)

Гібрид	Система удобрення	7-й листок	15-й листок	Цвітіння качана	Молочна стиглість	Повна стиглість
Гібрид РЖТ ЗАНЕТИККС	Контроль без добрив	5,24	27,8	36,0	38,3	36,2
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	5,92	31,4	40,6	43,2	40,8
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	6,21	33,1	42,8	45,5	43,0
Сорт СІРЕЛІЯ	Контроль без добрив	4,56	24,1	31,2	33,2	31,4
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	4,70	24,9	32,2	34,3	32,4
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	5,04	26,8	34,6	36,8	34,8
Сорт РЖТ САКУЗА	Контроль без добрив	4,64	24,7	31,9	34,0	32,1
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	4,86	25,8	33,4	35,5	33,6
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	5,24	27,8	36,0	38,3	36,2
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (лише кукурудза)	Контроль без добрив	5,01	26,5	34,3	36,5	34,5
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	5,42	28,8	37,3	39,7	37,5
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	5,80	30,8	39,8	42,3	40,0
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (лише соя)	Контроль без добрив	2,83	15,0	19,4	20,6	19,5
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	3,00	15,9	20,6	21,9	20,7
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	3,19	16,9	21,9	23,3	22,0
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (сумарно)	Контроль без добрив	7,85	41,5	53,7	57,1	54,0
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8,42	44,8	57,9	61,6	58,2
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	8,99	47,7	61,7	65,6	62,0
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (лише кукурудза)	Контроль без добрив	4,97	26,4	34,1	36,3	34,3
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	5,80	30,7	39,7	42,2	39,9
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	6,01	31,9	41,3	43,9	41,5
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (лише соя)	Контроль без добрив	3,08	16,3	21,1	22,4	21,2
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	3,15	16,8	21,7	23,1	21,8
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	3,32	17,6	22,7	24,2	22,9
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (сумарно)	Контроль без добрив	8,05	42,7	55,2	58,7	55,5
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8,95	47,5	61,4	65,3	61,7
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	9,33	49,5	64,0	68,1	64,4
NIP _{0,05}		0,11	0,8	2,3	2,5	2,9

У змішаних посівах площа листя кукурудзи на початкових етапах була дещо нижчою: 4,97-5,01 тис. м²/га на 7-му листку (-4,4...-5,2% до монокультури). Це може бути пов'язано з початковою конкуренцією за поживні речовини з боку сої.

До фази 15-го листка відставання скорочувалося: 26,4-26,5 тис. м²/га (-4,7...-5,0%). Компенсаторні механізми активізувалися у відповідь на конкуренцію, стимулюючи розвиток листової поверхні.

У генеративну фазу спостерігалось практично повне вирівнювання: площа листя досягала 34,1-34,3 тис. м²/га при цвітінні (-4,7...-5,3%) та 36,3-36,5 тис. м²/га при молочній стиглості (-4,7...-5,2%). При удобренні різниця з монокультурою зменшувалася до 3,5-7,0%.

Соя в бінарних посівах формувала значно меншу листову поверхню через редуковану густоту (225 проти 450 тис./га). На етапі 3-х листків площа становила 2,83-3,08 тис. м²/га – 62,1-66,4% від монокультури. Проте в перерахунку на одну рослину листові поверхні були на 24-33% вищою.

Максимальна площа листя сої в бінарних посівах досягала 19,4-22,4 тис. м²/га при цвітінні та

20,6-24,2 тис. м²/га при молочній стиглості. Це становило 62,2-65,9% від монокультури, що пропорційно зниженню густоти.

LAI сої в змішаних посівах становив 1,94-2,42, що нижче оптимуму. Проте це компенсувалося кращою освітленістю листків через ярусне розміщення та меншим взаємозатінням.

Інтегральна оцінка показала перевагу бінарних посівів за сумарною площею листя. На контролі вона становила 41,5-42,7 тис. м²/га для комбінації з СІРЕЛІЯ та РЖТ САКУЗА відповідно. Це на 49,3-53,5% перевищує монокультуру кукурудзи та на 72,2-73,1% – монокультуру сої.

При удобренні перевага зростала: 61,7-64,0 тис. м²/га при N₉₀P₆₀K₆₀ – на 44,2-49,8% більше монокультури кукурудзи. Сумарний LAI досягав 6,17-6,40, що вище оптимуму для монокультур, але ефективно використовується завдяки ярусності.

Максимальна сумарна площа 65,6-68,1 тис. м²/га спостерігалася в молочну стиглість при інтенсивному удобренні. Це забезпечувало поглинання 95-97% ФАР – практично повне використання світлового ресурсу.

Аналіз виявив криволінійну залежність врожайності від LAI з оптимумом 4,0-4,5 для кукурудзи та 3,5-4,0 для сої в монокультурі. При перевищенні оптимуму на 10% врожайність знижувалася на 3-5% через взаємозатінення.

У бінарних посівах оптимальний сумарний LAI був вищим – 5,5-6,0, що пояснюється ярусним розміщенням листя. Кореляція врожайності з LAI була сильнішою ($r=0,78-0,82$) порівняно з монокультурами ($r=0,65-0,72$).

Критичний LAI, при якому поглинається 95% ФАР, становив 4,5 для монокультури кукурудзи, 4,0 для сої та 5,8 для бінарних посівів. Це визначає межі доцільного нарощування листової поверхні.

Показник "врожай зерна/максимальна площа листя" становив 0,19-0,23 кг/м² для монокультури кукурудзи та 0,07-0,09 кг/м² для сої. У бінарних посівах сумарний показник досягав 0,22-0,24 кг/м², що свідчить про високу ефективність асиміляційного апарату.

Тривалість життя листка (від повного розгортання до пожовтіння) становила 45-50 днів для кукурудзи та

35-40 днів для сої. У бінарних посівах вона скорочувалася на 3-5 днів через прискорене старіння в умовах конкуренції.

Моделювання показало, що оптимальна площа листя в бінарних посівах досягається при густоті 65-68 тис./га кукурудзи та 210-220 тис./га сої з удобренням N₇₀P₅₀K₅₀. Це забезпечує LAI 5,8-6,2 при мінімальному взаємозатіненні.

Фотосинтетичний потенціал (ФП) є інтегральним показником функціональної активності асиміляційного апарату агроценозу, що визначає його здатність до накопичення органічної речовини протягом вегетаційного періоду. Цей параметр відображає не лише миттєву площу листової поверхні, але й тривалість її активного функціонування, що робить його більш інформативним предиктором продуктивності порівняно зі статичними показниками.

У період від 7-го до 15-го листка ФП кукурудзи становив 0,25 млн м²·днів/га на контролі, що відображає початкове формування асиміляційного

Таблиця 3.

Фотосинтетичний потенціал кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах на час настання фенофази кукурудзи, млн. м²/га (середнє за 2021-2025 рр.)

Гібрид	Система удобрення	7 листків – 15 листків	15 листків – цвітіння качанів	Цвітіння качанів – молочна стиглість	Молочна стиглість – повна стиглість	За вегетацію
Гібрид РЖТ ЗАНЕТИККС	Контроль без добрив	0,25	0,80	0,74	0,45	2,22
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,28	0,94	0,88	0,55	2,57
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,29	1,06	0,97	0,62	2,80
Сорт СІРЕЛІЯ	Контроль без добрив	н.о.	0,97	0,35	1,26	1,58
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	н.о.	1,06	0,40	1,33	1,70
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	н.о.	1,23	0,50	1,50	1,95
Сорт РЖТ САКУЗА	Контроль без добрив	н.о.	1,02	0,40	1,52	1,79
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	н.о.	1,12	0,45	1,66	1,95
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	н.о.	1,34	0,56	1,86	2,26
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (лише кукурудза)	Контроль без добрив	0,24	0,79	0,71	0,46	2,15
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,26	0,96	0,81	0,50	2,42
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,27	1,06	0,90	0,62	2,66
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (лише соя)	Контроль без добрив	н.о.	0,62	0,24	0,82	1,02
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	н.о.	0,69	0,28	0,92	1,14
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	н.о.	0,82	0,36	1,07	1,34
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (сумарно)	Контроль без добрив	0,2	1,4	0,9	1,3	3,17
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,3	1,7	1,1	1,4	3,56
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,3	1,9	1,3	1,7	4,00
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (лише кукурудза)	Контроль без добрив	0,24	0,79	0,70	0,46	2,14
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,27	1,05	0,86	0,53	2,60
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,28	1,13	0,98	0,64	2,81
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (лише соя)	Контроль без добрив	н.о.	0,71	0,30	1,02	1,23
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	н.о.	0,81	0,34	1,06	1,33
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	н.о.	0,91	0,42	1,20	1,51
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (сумарно)	Контроль без добрив	0,2	1,5	1,0	1,5	3,37
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,3	1,9	1,2	1,6	3,92
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,3	2,0	1,4	1,8	4,32
HIP _{0,05}		0,01	0,03/0,2	0,05/0,12	0,09/0,31	0,20/0,43

н.о. – не обліковувалася

апарату. Незважаючи на експоненційне зростання площі листя в цей період, короткий інтервал (17 днів) обмежує накопичення ФП. Застосування добрив незначно підвищувало ФП до 0,28-0,29 млн м²·днів/га (+12,0-16,0%).

Критичний період "15-й листок – цвітіння качанів" характеризувався максимальним внеском у загальний ФП: 0,80 млн м²·днів/га на контролі (36,0% від сумарного). При удобренні ФП зростав до 0,94-1,06 млн м²·днів/га, що пояснюється як збільшенням площі листя, так і подовженням періоду на 2-3 дні.

У період наливу зерна (цвітіння – молочна стиглість) ФП становив 0,74-0,97 млн м²·днів/га, незначно поступаючись попередньому періоду. Високі значення забезпечувалися максимальною площею листя, незважаючи на коротший період (20-22 дні).

Завершальний етап (молочна – повна стиглість) вносив 0,45-0,62 млн м²·днів/га, що становило 20,3-22,1% загального ФП. Зниження пов'язане з відмиранням нижніх листків та скороченням фотосинтетично активної поверхні.

Загальний фотосинтетичний потенціал монокультури кукурудзи становив 2,22 млн м²·днів/га на контролі. Застосування N₆₀P₄₅K₄₅ підвищувало ФП до 2,57 млн м²·днів/га (+15,8%), а N₉₀P₆₀K₆₀ – до 2,80 млн м²·днів/га (+26,1%). Приріст досягався за рахунок збільшення площі листя (18,5-19,0%) та подовження вегетації (5-7 днів).

Ефективність формування ФП (ФП/добу вегетації) становила 18,2-21,5 тис. м²/га, що відповідає середньому LAI 1,82-2,15 протягом вегетації. Це нижче оптимальних значень (LAI 2,5-3,0), що вказує на резерви підвищення ФП.

Соя характеризувалася іншим розподілом ФП по фазах розвитку. Основний внесок вносив період від молочної до повної стиглості: 1,26-1,86 млн м²·днів/га (79,7-82,3% загального ФП). Це пояснюється тривалим збереженням зеленого листя сої під час дозрівання бобів (39-50 днів).

Період від бутонізації до цвітіння формував 0,97-1,34 млн м²·днів/га, незважаючи на інтенсивне наростання листової маси. Короткий інтервал цвітіння

Таблиця 4.

Чиста продуктивність фотосинтезу кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах на час настання фенофази кукурудзи, г. м² за добу (середнє за 2021-2025 рр.)

Гібрид	Система удобрення	15 листків – цвітіння качанів	цвітіння качанів – молочна стиглість	молочна стиглість – повна стиглість
Гібрид РЖТ ЗАНЕТИККС	Контроль без добрив	6,01	4,57	3,93
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	6,57	4,94	4,14
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	6,46	5,02	4,07
Сорт СІРЕЛІЯ	Контроль без добрив	1,53	2,95	0,43
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2,10	3,93	0,61
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,50	2,61	0,45
Сорт РЖТ САКУЗА	Контроль без добрив	1,65	3,01	0,40
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2,05	3,64	0,51
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,30	2,20	0,35
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (лише кукурудза)	Контроль без добрив	6,77	5,31	4,28
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	7,55	6,35	5,30
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	7,75	6,39	4,88
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (лише соя)	Контроль без добрив	1,93	3,52	0,53
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2,49	4,43	0,69
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,88	2,98	0,53
РЖТ ЗАНЕТИККС + СІРЕЛІЯ (сумарно)	Контроль без добрив	8,70	8,83	4,81
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	10,04	10,78	5,99
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	9,63	9,38	5,41
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (лише кукурудза)	Контроль без добрив	6,80	5,37	4,30
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	6,96	6,03	5,04
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	7,16	5,88	4,65
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (лише соя)	Контроль без добрив	1,83	3,02	0,46
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2,25	3,84	0,63
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,81	2,74	0,50
РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА (сумарно)	Контроль без добрив	8,63	8,39	4,76
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	9,21	9,87	5,67
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	8,97	8,63	5,15
НІР _{0,05}		1,1/0,3	1,8/0,4	2,2/0,5

(11-14 днів) обмежував накопичення ФП у генеративну фазу до 0,35-0,56 млн м²·днів/га.

Сорт РЖТ САКУЗА демонстрував вищий ФП: 1,79-2,26 млн м²·днів/га проти 1,58-1,95 для СІРЕЛІЯ. Різниця пояснюється довшим вегетаційним періодом (на 7-8 днів) та вищою площею листя в пізні фазі розвитку.

Приріст ФП сої при удобренні був менш вираженим, ніж у кукурудзи: 7,6-9,0% при N₆₀P₄₅K₄₅ та 23,4-26,3% при N₉₀P₆₀K₆₀. Помірна реакція пояснюється компенсаторною роллю симбіотичної азотфіксації та негативним впливом високих доз азоту на формування бульбочок.

Ефективність накопичення ФП соєю (13,9-18,5 тис. м²/га за добу) була нижчою за кукурудзу через менший розмір листків та їх горизонтальну орієнтацію, що призводить до взаємозатіннення.

Кукурудза в бінарних посівах формувала 2,14-2,15 млн м²·днів/га на контролі, що на 3,2-3,6% менше монокультури. При удобренні різниця скорочувалася: 2,42-2,60 млн м²·днів/га (-5,8...-0,8% до монокультури при N₆₀P₄₅K₄₅) та 2,66-2,81 млн м²·днів/га (-5,0...+0,4% при N₉₀P₆₀K₆₀).

Незначне зниження ФП кукурудзи компенсувалося підвищенням ефективності фотосинтезу через кращу освітленість активних листків. Модифікація архітектури листового апарату (більш вертикальна орієнтація) оптимізувала розподіл світла.

Соєв бінарних посівах формувала 1,02-1,23 млн м²·днів/га на контролі, що становило 64,6-68,7% від монокультури. Зниження пропорційне редуції густоти (50%), але в перерахунку на одну рослину ФП був на 29,1-37,4% вищим через компенсаторне збільшення листової поверхні.

Інтегральний ФП бінарних посівів досягав гарних значень: 3,17-3,37 млн м²·днів/га на контролі, що на 42,8-51,8% перевищує монокультуру кукурудзи та в 1,9-2,1 рази – монокультуру сої. При удобренні перевага зростала: 3,56-3,92 млн м²·днів/га при N₆₀P₄₅K₄₅ (+38,5-52,5%) та 4,00-4,32 млн м²·днів/га при N₉₀P₆₀K₆₀ (+42,9-54,3%).

Максимальний ФП 4,32 млн м²·днів/га досягався в комбінації РЖТ ЗАНЕТИККС + РЖТ САКУЗА при інтенсивному удобренні. Це забезпечувалося синхронізацією максимумів листової поверхні компонентів та подовженням періоду активного фотосинтезу.

Коефіцієнт використання ФП (врожай зерна/ФП) для монокультури кукурудзи становив 3,28 кг/тис. м²·днів на контролі та знижувався до 3,65-3,73 кг/тис. м²·днів при удобренні. Парадоксальне підвищення свідчить про неповне використання додаткового ФП для формування врожаю.

Соєв демонструвала нижчу ефективність: 1,43-1,42 кг/тис. м²·днів на контролі та 1,96-1,16 кг/тис. м²·днів при удобренні. Зниження при N₉₀P₆₀K₆₀ пов'язане з депресією врожайності при надлишку азоту.

Бінарні посіви показали високу ефективність використання ФП: 3,00-3,13 кг/тис. м²·днів на контролі та 3,50-3,82 кг/тис. м²·днів при удобренні. Це свідчить про оптимальне співвідношення між потужністю асиміляційного апарату та атрагуючою здатністю репродуктивних органів.

Кореляційний аналіз показав, що для кукурудзи найтісніший зв'язок з урожайністю мав ФП періоду "15-й листок – цвітіння" (r=0,82-0,85). Кожні 0,1 млн м²·днів/га ФП цього періоду забезпечували приріст врожайності на 0,95-1,12 т/га.

Для сої критичним був період "молочна – повна стиглість" (r=0,78-0,81), коли формується основна маса запасних речовин. Приріст ФП на 0,1 млн м²·днів/га підвищував урожайність на 0,18-0,22 т/га.

У бінарних посівах спостерігався синергетичний ефект: сумарний вплив ФП окремих періодів перевищував адитивний ефект на 15-18%, що свідчить про оптимізацію розподілу асимілятів між компонентами.

Аналіз світлового режиму показав, що при ФП > 3,5 млн м²·днів/га поглинається 92-95% ФАР за вегетацію. У монокультурах цей показник не перевищує 85-88%. Ефективність конверсії поглинутої ФАР у біомасу становила 2,8-3,2% для бінарних посівів проти 2,2-2,5% для монокультур.

Множинна регресія показала, що врожайність кукурудзи (Y, т/га) залежить від ФП (X₁, млн м²·днів/га) та норми добрив (X₂, кг/га д.р.):

$$Y = 2,85 + 2,42X_1 + 0,018X_2 \quad (R^2 = 0,89)$$

Для бінарних посівів модель ускладнювалася врахуванням взаємодії компонентів:

$$Y = 3,12 + 2,18X_1 + 0,015X_2 + 0,35X_1X_2 \quad (R^2 = 0,92)$$

Коефіцієнт взаємодії (0,35) підтверджує синергетичний ефект при формуванні ФП у змішаних посівах.

Подальше моделювання показало, що оптимальний ФП для максимальної рентабельності становить 2,8-3,2 млн м²·днів/га для монокультури кукурудзи та 4,2-4,5 млн м²·днів/га для бінарних посівів. Перевищення оптимуму призводить до зниження окупності через зростання респіраційних втрат.

Для досягнення цільового ФП необхідна густина 65-68 тис./га кукурудзи + 200-210 тис./га сої з удобренням N₇₀P₅₀K₅₀. Відхилення від оптимуму на ±10% знижує ефективність використання ФП на 12-15%.

У період "15-й листок – цвітіння качанів" ЧПФ кукурудзи становила 6,01 г/м²·добу на контролі. Це період максимальної фотосинтетичної активності, коли висока інтенсивність світла, оптимальна температура та достатнє водозабезпечення створюють ідеальні умови для фотосинтезу. C₄-механізм фіксації CO₂ забезпечує високу ефективність при мінімальному фотодиханні.

Застосування добрив підвищувало ЧПФ до 6,57 г/м²·добу при N₆₀P₄₅K₄₅ (+9,3%), але при N₉₀P₆₀K₆₀ спостерігалось незначне зниження до 6,46 г/м²·добу. Це явище пояснюється надмірним розвитком вегетативної маси при високих дозах азоту, що призводить до взаємозатіннення листків та зниження ефективної фотосинтетичної поверхні.

У період наливу зерна (цвітіння – молочна стиглість) ЧПФ знижувалася до 4,57-5,02 г/м²·добу через перерозподіл асимілятів на формування репродуктивних органів та посилення дихання при високих температурах. Проте саме в цей період формується основна маса

зерна, що підкреслює критичну важливість підтримання високої ЧПФ.

Завершальний період (молочна – повна стиглість) характеризувався подальшим зниженням ЧПФ до 3,93-4,14 г/м²·добу через старіння листового апарату та зменшення вмісту хлорофілу. Однак навіть на цьому етапі зберігається позитивний баланс фотосинтезу, що забезпечує дозрівання зерна.

Со́я демонструвала значно нижчу ЧПФ порівняно з кукурудзою, що типово для С₃-рослин з вищим рівнем фотодихання. У період "бутонізація – цвітіння" ЧПФ становила лише 1,53-1,65 г/м²·добу на контролі, що в 3,7-3,9 рази менше кукурудзи в аналогічний період.

Максимум ЧПФ со́ї спостерігався в період "цвітіння – молочна стиглість": 2,95-3,01 г/м²·добу на контролі. Це пояснюється оптимальним балансом між фотосинтезом та ростом бобів, коли атрагуюча здатність репродуктивних органів стимулює фотосинтетичну активність.

У завершальний період ЧПФ різко знижувалася до 0,40-0,43 г/м²·добу – практично до компенсаційного пункту. Це пов'язано з масовим відмиранням листків та переважанням процесів ремобілізації асимілятів над новим синтезом.

Помірне удобрення (N₆₀P₄₅K₄₅) підвищувало ЧПФ со́ї на 33,3-37,3% у період максимального росту, досягаючи 2,05-2,10 г/м²·добу. Проте інтенсивне удобрення (N₉₀P₆₀K₆₀) призводило до зниження ЧПФ до 1,30-1,50 г/м²·добу – нижче контрольного рівня.

Депресія ЧПФ при високих дозах азоту пояснюється пригніченням симбіотичної азотфіксації, порушенням балансу N:P:K та надмірним розвитком листової маси, що призводить до самозатіннення. Оптимальний рівень азотного живлення для максимальної ЧПФ со́ї становить 40-60 кг/га.

Кукурудза в бінарних посівах демонструвала вищу ЧПФ, ніж у монокультурі. У період "15-й листок – цвітіння" ЧПФ становила 6,77-6,80 г/м²·добу на контролі (+12,6-13,1% до монокультури). При удобренні перевага зростала: 7,55-7,75 г/м²·добу при N₆₀P₄₅K₄₅ (+14,9-17,9%) та N₉₀P₆₀K₆₀ (+10,8-19,9%).

Підвищення ЧПФ кукурудзи в бінарних посівах пояснюється комплексом факторів: покращення азотного живлення за рахунок біологічної фіксації соєю, оптимізація мікроклімату (зниження температури на 2-3°C, підвищення вологості на 8-10%), стимуляція фотосинтезу кореневими виділеннями со́ї (амінокислоти, вітаміни)

У період наливу зерна ЧПФ кукурудзи в бінарних посівах досягала 5,31-6,39 г/м²·добу, що на 16,2-27,3% вище монокультури. Це критично важливо для формування високої продуктивності, оскільки саме в цей період визначається маса 1000 зерен.

Со́я в бінарних посівах також демонструвала підвищену ЧПФ у певні періоди. У фазу "бутонізація – цвітіння" ЧПФ становила 1,83-1,93 г/м²·добу (+10,9-26,1% до монокультури). Це пояснюється адаптацією фотосинтетичного апарату до умов часткового затіннення через: збільшення вмісту хлорофілу *b* на 25-30%, зниження світлового насичення фотосинтезу з 1200 до 800 мкмоль/м²·с, підвищення квантового виходу фотосистеми II на 12-15%.

У період формування бобів ЧПФ со́ї в бінарних посівах досягала 3,02-3,52 г/м²·добу, що на 0,3-19,3% вище монокультури. Проте в завершальний період ЧПФ залишалася на рівні монокультури (0,46-0,53 г/м²·добу), що свідчить про синхронізацію процесів старіння.

Інтегральна оцінка показала синергетичний ефект формування ЧПФ у бінарних посівах. Сумарна ЧПФ у період максимальної активності досягала 8,63-8,70 г/м²·добу на контролі, що на 43,6-44,8% перевищує монокультуру кукурудзи та в 5,2-5,6 рази – монокультуру со́ї.

При помірному удобренні сумарна ЧПФ зростала до 9,21-10,04 г/м²·добу. Це одні з найвищих показників для польових культур помірної зони, порівнянні з ЧПФ тропічних С₄-трав (10-12 г/м²·добу).

У період наливу зерна сумарна ЧПФ становила 8,39-10,78 г/м²·добу, що на 83,6-117,7% вище монокультури кукурудзи. Навіть у завершальний період зберігалася висока ЧПФ (4,76-5,99 г/м²·добу), що забезпечує повноцінне дозрівання обох компонентів.

Аналіз показав тісний зв'язок між ЧПФ у критичні періоди та елементами структури врожаю. Для кукурудзи найсильніша кореляція спостерігалася між ЧПФ періоду "цвітіння – молочна стиглість" та масою 1000 зерен ($r=0,78-0,82$). Кожна одиниця приросту ЧПФ (1 г/м²·добу) забезпечувала збільшення маси 1000 зерен на 18-22 г.

Для со́ї критичною була ЧПФ періоду формування бобів, яка корелювала з кількістю насінин у бобі ($r=0,72-0,75$) та масою 1000 насінин ($r=0,68-0,71$). Підвищення ЧПФ на 1 г/м²·добу збільшувало врожайність на 0,28-0,32 т/га.

Коефіцієнт господарської ефективності фотосинтезу (Кгосп = врожай зерна/сумарний фотосинтез) становив 0,42-0,45 для монокультури кукурудзи та 0,38-0,41 для со́ї. У бінарних посівах Кгосп підвищувався до 0,48-0,52, що свідчить про ефективніший розподіл асимілятів.

Енергетична ефективність ЧПФ (калорійність врожаю/енергія ФАР × ЧПФ) досягала 2,8-3,1% у бінарних посівах проти 2,2-2,4% у монокультурах. Це наближається до теоретичного максимуму для С₃-С₄ систем (3,5-4,0%).

Динаміка ЧПФ кукурудзи описувалася поліноміальною функцією: $ЧПФ = -0,003t^2 + 0,42t - 3,8$ ($R^2 = 0,91$) де *t* – дні від сходів.

Для бінарних посівів модель ускладнювалася врахуванням взаємодії: $ЧПФ_{сум} = ЧПФ_{к} \times (1 + 0,15 \times LAI_{с}) + ЧПФ_{с} \times (1 - 0,08 \times LAI_{к})$ де LAI – індекс листової поверхні компонентів.

Моделювання показало, що максимальна інтегральна ЧПФ досягається при: густоті 66-68 тис./га кукурудзи + 205-215 тис./га со́ї, удобренні N₇₅P₅₅K₅₅ з роздрібним внесенням азоту.

Висновки. Максимальна сумарна листовка поверхня в бінарних посівах: 65,6-68,1 тис. м²/га перевищує монокультуру кукурудзи на 44,2-49,8% та со́ї на 78,3-85,0%, забезпечуючи LAI 6,56-6,81. А максимум листової поверхні досягається у фазу молочної стиглості з плавним зниженням на 5,4-5,5% до повної стиглості в усіх системах. Встановлено також приріст площі листа 18,5-19,0% у кукурудзи та 10,5-12,9% у со́ї при N₉₀P₆₀K₆₀ з вищою ефективністю в бінарних посівах.

Максимальний ФП у бінарних посівах був 4,00-4,32 млн м²-днів/га що перевищує монокультуру кукурудзи на 42,9-54,3% та сої в 2,1-2,2 рази, забезпечуючи енергетичну основу високої продуктивності.

Оптимальний розподіл ФП спостерігався у період "15-й листок – цвітіння" (36-38% загального) для кукурудзи та "молочна – повна стиглість" (79-82%) для сої забезпечує ефективне використання для формування врожаю. А досягнення оптимального ФП 4,2-4,5 млн м²-днів/га можливе при густоті 65-68 тис./га кукурудзи + 200-210 тис./га сої з N₇₀P₅₀K₅₀.

Максимальна ЧПФ у бінарних посівах: 8,63-10,78 г/м²-добу перевищує монокультуру кукурудзи на 43,6-117,7% та сої в 5,2-5,6 рази, забезпечуючи інтенсивне накопичення органічної речовини. А синергетичний ефект компонентів: підвищення ЧПФ кукурудзи на 10,8-27,3% та сої на 10,9-26,1% у бінарних посівах свідчить про взаємну стимуляцію фотосинтетичних процесів.

Оптимальна динаміка ЧПФ: максимум у період "15-й листок – цвітіння" для кукурудзи (6,77-7,75 г/м²-добу) та "цвітіння – молочна стиглість" для сої (3,02-4,43 г/м²-добу) забезпечує ефективне формування врожаю. Коли депресія при надлишку азоту: зниження ЧПФ сої при N₉₀P₆₀K₆₀ на 13,8-30,0% підтверджує недоцільність високих доз добрив для бобових культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Erenstein O., Jaleta M., Sonder K., Mottaleb K., Prasanna B.M. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Secur.* 2022;14:1295–319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>.
- Ladha J.K., Tirol-Padre A., Reddy C.K., Cassman K.G., Verma S., Powlson D.S., van Kessel C., de Richter B., Chakraborty D., Pathak D. Global nitrogen budgets in cereals: a 50-year assessment for maize, rice and wheat production systems. *Sci Rep.* 2016;6:19355. <https://doi.org/10.1038/srep19355>.
- Sieling K., Kage H. Apparent fertilizer N recovery and the relationship between grain yield and grain protein concentration of different winter wheat varieties in a long-term field trial. *Eur J. Agron.* 2021;124:126246. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126246>.
- Ali M.A., Ghazy A.I., Alotaibi K.D., Ibrahim O.M., Al-Doss A.A. Nitrogen efficiency indexes association with nitrogen recovery, utilization, and use efficiency in spring barley at various nitrogen application rates. *Agron J.* 2022;114:2290–309. <https://doi.org/10.1002/agj2.21128>.
- Zhu X., Ros G.H., Xu M., Cai Z., Sun N., Duan Y., de Vries W. Long-term impacts of mineral and organic fertilizer inputs on nitrogen use efficiency for different cropping systems and site conditions in Southern China. *Eur J. Agron.* 2023;146:126797. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126797>.
- Banger K., Yuan M., Wang J., Nafziger E.D., Pittelkow C.M. A Vision for Incorporating Environmental effects into Nitrogen Management decision support tools for U.S. Maize production. *Front Plant Sci.* 2017; 8:1270. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01270>.
- Qiao J., Wang J., Zhao D., Zhu N., Tang J., Zhou W., Schwenke G., Yan T., Yang L. Effect of continuous N fertilizer reduction on N losses and wheat yield in the Taihu Lake region, China. *J. Clean Prod.* 2022; 364:132475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132475>.
- Galindo F.S., Teixeira Filho M.C.M., Buzetti S., Pagliari P.H., Santini J.M.K., Alves C.J., Megda M.M., Nogueira T.A.R., Andreotti M., Arf O. Maize yield response to Nitrogen Rates and Sources Associated with *Azospirillum brasilense*. *Agron J.* 2019;111:1985–97. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0481>.
- Albahri G., Alyamani A.A., Badran A., Hijazi A., Nasser M., Maresca M., Baydoun E. Enhancing essential grains yield for sustainable Food Security and Bio-safe Agriculture through latest innovative approaches. *Agron.* 2023; 13:1709. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071709>.
- Galindo F.S., Da Silva E.C., Pagliari P.H., Fernandes G.C., Rodrigues W.L., Biagini A.L.C., Baratella E.B., Da Silva Júnior C.A., Moretti Neto M.J., Muraoka T., Teixeira Filho M.C.M. Nitrogen use efficiency and recovery in a wheat-corn rotation under tropical savannah conditions. *Nutr Cycl Agroecosystems.* 2021;119:291–305. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10115-4>.
- Govindasamy P., Muthusamy S.K., Bagavathiannan M., et al. Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Front Plant Sci.* 2023;14:1121073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121073>.
- Galindo F.S., Pagliari P.H., Fernandes G.C., Rodrigues W.L., Boleta E.H.M., Jalal A., Céu E.G.O., Lima B.H.D., Lavres J., Teixeira Filho M.C.M. Improving sustainable field-grown wheat production with *Azospirillum brasilense* under Tropical conditions: a potential Tool for improving Nitrogen Management. *Front Environ Sci.* 2022;10:821628. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.821628>.
- Sinha E., Calvin K.V., Kyle P.G., Hejazi M.I., Waldhoff S.T., Huang M., Vishwakarma S., Zhang X. Implication of imposing fertilizer limitations on energy, agriculture, and land systems. *J. Environ Manage.* 2022;305:114391. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114391>.
- Galindo F.S., Rodrigues W.L., Fernandes G.C., Boleta E.H.M., Jalal A., Rosa P.A.L., Buzetti S., Lavres J., Teixeira Filho M.C.M. Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. *Eur J. Agron.* 2022;134:126471. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126471>.
- Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch Biochem Biophys.* 1968;125:189–98. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).

REFERENCES:

- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B.M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Secur.* 14:1295–319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>.
- Ladha, J.K., Tirol-Padre, A., Reddy, C.K., Cassman, K.G., Verma, S., Powlson, D.S., van Kessel, C., de Richter, B., Chakraborty, D., & Pathak, D. (2016). Global nitrogen budgets in cereals: a 50-year assessment for maize, rice and wheat production systems. *Sci Rep.* 6:19355. <https://doi.org/10.1038/srep19355>.

3. Sieling, K., & Kage, H. (2021). Apparent fertilizer N recovery and the relationship between grain yield and grain protein concentration of different winter wheat varieties in a long-term field trial. *Eur J. Agron.* 124:126246. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126246>.
4. Ali, M.A., Ghazy, A.I., Alotaibi, K.D., Ibrahim, O.M., & Al-Doss, A.A. (2022). Nitrogen efficiency indexes association with nitrogen recovery, utilization, and use efficiency in spring barley at various nitrogen application rates. *Agron J.* 114:2290–309. <https://doi.org/10.1002/agj2.21128>.
5. Zhu, X., Ros, G.H, Xu, M., Cai, Z., Sun, N., Duan, Y., & de Vries, W. (2023). Long-term impacts of mineral and organic fertilizer inputs on nitrogen use efficiency for different cropping systems and site conditions in Southern China. *Eur J. Agron.* 146:126797. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126797>.
6. Banger, K., Yuan, M., Wang, J., Nafziger, E.D., & Pittelkow, C.M. (2017). A Vision for Incorporating Environmental effects into Nitrogen Management decision support tools for U.S. Maize production. *Front Plant Sci.* 8:1270. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01270>.
7. Qiao, J., Wang, J., Zhao, D., Zhu, N., Tang, J., Zhou, W., Schwenke, G., Yan, T., & Yang, L. (2022). Effect of continuous N fertilizer reduction on N losses and wheat yield in the Taihu Lake region, China. *J. Clean Prod.* 364:132475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132475>.
8. Galindo, F.S., Teixeira Filho, M.C.M., Buzetti, S., Pagliari, P.H., Santini, J.M.K., Alves, C.J., Megda, M.M., Nogueira, T.A.R., Andreotti, M., & Arf, O. (2019). Maize yield response to Nitrogen Rates and Sources Associated with *Azospirillum brasilense*. *Agron J.* 111:1985–97. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0481>.
9. Albahri, G., Alyamani, A.A., Badran, A., Hijazi, A., Nasser, M., Maresca, M., & Baydoun, E. (2023). Enhancing essential grains yield for sustainable Food Security and Bio-safe Agriculture through latest innovative approaches. *Agron.* 13:1709. <https://doi.org/10.3390/agron13071709>.
10. Galindo, F.S., Da Silva, E.C., Pagliari, P.H., Fernandes, G.C., Rodrigues, W.L., Biagini, A.L.C., Baratella, E.B., Da Silva Júnior, C.A., Moretti Neto, M.J., Muraoka, T., & Teixeira Filho, M.C.M. (2021). Nitrogen use efficiency and recovery in a wheat-corn rotation under tropical savannah conditions. *Nutr Cycl Agroecosystems.* 119:291–305. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10115-4>.
11. Govindasamy, P., Muthusamy, S.K., & Bagavathiannan, M., et al. (2023). Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Front Plant Sci.* 14:1121073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121073>.
12. Galindo, F.S., Pagliari, P.H., Fernandes, G.C., Rodrigues, W.L., Boleta, E.H.M., Jalal, A., Céu, E.G.O., Lima, B.H.D., Lavres, J., & Teixeira Filho, M.C.M. (2022). Improving sustainable field-grown wheat production with *Azospirillum brasilense* under Tropical conditions: a potential Tool for improving Nitrogen Management. *Front Environ Sci.* 10:821628. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.821628>.
13. Sinha, E., Calvin, K.V., Kyle, P.G., Hejazi, M.I., Waldhoff, S.T., Huang, M., Vishwakarma, S., & Zhang, X. (2022). Implication of imposing fertilizer limitations on energy, agriculture, and lands systems. *J. Environ Manage.* 305:114391. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114391>.
14. Galindo, F.S., Rodrigues, W.L., Fernandes, G.C., Boleta, E.H.M., Jalal, A., Rosa, P.A.L., Buzetti, S., Lavres, J., & Teixeira Filho, M.C.M. (2022). Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. *Eur J. Agron.* 134:126471. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126471>.
15. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch Biochem Biophys.* 125:189–98. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).

Мокрієнко В.А. Фотосинтетичні параметри кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах

Формування врожайності польових культур визначається ефективністю функціонування асиміляційного апарату, зокрема площею листової поверхні, фотосинтетичним потенціалом (ФП) та чистою продуктивністю фотосинтезу (ЧПФ). В умовах сучасних технологій вирощування особливого значення набувають бінарні посіви, у яких взаємодія компонентів може призводити до синергетичного підвищення фотосинтетичної активності агроценозу. Метою досліджень було встановлення особливостей формування фотосинтетичних параметрів кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах залежно від рівня мінерального живлення в умовах Лісостепу України. Методи. Дослідження проводили протягом 2021–2025 рр. на чорноземі типовому малогумусному. Вивчали динаміку площі листової поверхні, індексу листової поверхні (LAI), фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу за систем удобрень: без добрив, $N_{60}P_{45}K_{45}$ та $N_{90}P_{60}K_{60}$. Результати. Встановлено, що в монокультурі кукурудзи максимальна площа листової поверхні становила 38,3–45,5 тис. м²/га (LAI 3,83–4,55), тоді як у бінарних посівах сумарна площа зростала до 65,6–68,1 тис. м²/га, що на 44,2–49,8% перевищує монокультуру. Сумарний фотосинтетичний потенціал бінарних посівів досягав 4,00–4,32 млн м²·днів/га, перевищуючи монокультуру кукурудзи на 42,9–54,3%, а сої – у 2,1–2,2 рази. Максимальна сумарна ЧПФ у бінарних посівах становила 8,63–10,78 г/м²·добу, що на 43,6–117,7% більше, ніж у монокультурі кукурудзи. Підвищення ЧПФ кукурудзи в бінарних посівах становило 10,8–27,3%, сої – 10,9–26,1%, що свідчить про синергетичну взаємодію компонентів. Висновки. Отримані результати підтверджують, що бінарні посіви кукурудзи з соєю забезпечують істотне зростання фотосинтетичного потенціалу та ефективності використання ФАР, що є фізіологічною основою підвищення продуктивності агроценозів.

Ключові слова: кукурудза, соя, бінарні посіви, площа листової поверхні, LAI, фотосинтетичний потенціал, чиста продуктивність фотосинтезу.

Mokriienko V.A. Photosynthetic Parameters of Maize and Soybean in Monoculture and Binary Cropping Systems

The formation of field crop productivity is determined by the efficiency of the assimilation apparatus, in particular by the leaf area, photosynthetic potential (PP), and net photosynthetic productivity (NPP). Under modern cultivation technologies, binary cropping systems are of particular

importance, as the interaction between components can lead to a synergistic increase in the photosynthetic activity of the agrocenoses. The aim of the study was to determine the specific features of the formation of photosynthetic parameters of maize and soybean in monoculture and binary crops depending on the level of mineral nutrition under the conditions of the Forest-Steppe zone of Ukraine.

Methods. The research was conducted during 2021–2025 on typical low-humus chernozem soil. The dynamics of leaf area, leaf area index (LAI), photosynthetic potential, and net photosynthetic productivity were studied under the following fertilization systems: no fertilizers, $N_{60}P_{45}K_{45}$, and $N_{90}P_{60}K_{60}$. **Results.** It was established that in maize monoculture, the maximum leaf area ranged from 38.3 to 45.5 thousand m^2/ha (LAI 3.83–4.55), whereas in binary crops the total leaf area increased to 65.6–68.1 thousand m^2/ha ,

exceeding monoculture by 44.2–49.8%. The total photosynthetic potential of binary crops reached 4.00–4.32 million $m^2 \cdot days/ha$, exceeding maize monoculture by 42.9–54.3% and soybean monoculture by 2.1–2.2 times. The maximum total NPP in binary crops was 8.63–10.78 g/m^2 per day, which is 43.6–117.7% higher than in maize monoculture. The increase in NPP of maize in binary crops was 10.8–27.3%, and soybean 10.9–26.1%, indicating a synergistic interaction between components. **Conclusions.** The obtained results confirm that binary cropping of maize with soybean provides a significant increase in photosynthetic potential and efficiency of PAR (photosynthetically active radiation) utilization, which forms the physiological basis for increased productivity of agrocenoses.

Key words: maize, soybean, binary crops, leaf area, LAI, photosynthetic potential, net photosynthetic productivity.

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026