

ISSN 2707-3653 (Print)

БІОЕНЕРГЕТИКА

2026 | № 1(27)

НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ
ЖУРНАЛ

BIOENERGY

<https://be.bio.gov.ua>

БІОЕНЕРГЕТИКА

Науково-виробничий журнал
№ 1(27) • 2026

Засновник і видавець:

Інститут біоенергетичних культур
і цукрових буряків НААН України

Засновано у 2013 році

Періодичність: двічі на рік

Мова видання: українська, англійська

Журнал включено до Переліку наукових фахових
видань України (категорія Б, 201 – Агрономія)
(наказ МОН України № 420 від 15.04.2021)

Номер рекомендовано до друку та поширення
через мережу інтернет ученою радою Інституту
біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
(протокол № 8 від 08.04.2026)

Адреса редакції:

Інститут біоенергетичних культур
і цукрових буряків НААН,
вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна
тел.: +38 (044) 275-50-00
e-mail: bioenergy_journal@ukr.net
сайт: <https://be.bio.gov.ua>

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

М. В. Роїк, д-р с.-г. наук, проф.

Заступник головного редактора

О. І. Присяжнюк, д-р с.-г. наук, проф.

Члени редакційної колегії

М. Я. Гументик, д-р с.-г. наук, с. н. с.

В. А. Доронін, д-р с.-г. наук, проф.

В. М. Квак, канд. с.-г. наук, с. н. с.

В. І. Кравчук, д-р техн. наук, проф.

В. М. Сінченко, д-р с.-г. наук, проф.

Я. Д. Фучило, д-р с.-г. наук, проф.

Н. Oechsner, PhD (Німеччина)

Технічний редактор О. Ю. Половинчук

Літературний редактор О. П. Шевченко

Редактор англійських текстів О. А. Маляренко

Підписано до друку 11.05.2026

Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.

Ум.-др. арк.

Наклад 50 прим. Зам.

Друкарня

ТОВ «ТВОРИ»

вул. Немирівське шосе, 62а,

м. Вінниця, 21034, Україна

Тел.: 0(800) 33-00-90

E-mail: info@tvoru.com.ua

сайт: <http://www.tvoru.com.ua>

BIOENERGY

Scientific and Practical Journal
2026 • No 1(27)

Founder and publisher:

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

Established in 2013

Frequency: twice a year

Language edition: Ukrainian, English

The journal is included in the List of Scientific Professional
Publications of Ukraine (Category B, specialty 201 –
Agronomy) in accordance with the Order of the Ministry of
Education and Science of Ukraine No. 420 of April 15, 2021

The issue was recommended for publication and online
distribution by the Academic Council of the Institute
of Bioenergy Crops and Sugar Beet of NAAS
(Protocol No. 8 of April 08, 2026)

Editorial Office:

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
25 Klinichna St., Kyiv 03110, Ukraine
Tel.: +38 044 275 50 00
E-mail: bioenergy_journal@ukr.net
Website: <https://be.bio.gov.ua>

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Prof. M. V. Roik, Dr. sc. agr.

Deputy Editor-in-Chief

Prof. O. I. Prysiashniuk, Dr. sc. agr.

Editorial Board Members

M. Ya. Humentyk, Dr. sc. agr., Sr Researcher

Prof. V. A. Doronin, Dr. sc. agr.

V. M. Kvak, Cand. sc. agr., Sr Researcher

Prof. V. I. Kravchuk, Dr. sc. tech.

Prof. V. M. Sinchenko, Dr. sc. agr.

Prof. Ya. D. Fuchylo, Dr. sc. agr.

H. Oechsner, PhD (Germany)

Technical Editor

O. Yu. Polovynchuk

Literary Editor

O. P. Shevchenko

English Language Editor

O. A. Maliarenko

Signed for printing: May 11, 2026

Format 60×84 1/8. Offset paper.

Conventional printed sheets:

Print run: 50 copies. Order:

Printing House:

LLC "TVORY"

62a Nemyrivske Highway,

Vinnitsya, 21034, Ukraine

Tel.: 0(800) 33-00-90

E-mail: info@tvoru.com.ua

Website: <http://www.tvoru.com.ua>

ЗМІСТ

CONTENTS

Оригінальні дослідження

- Бойко І. І., Зінченко О. А., Михайловин Ю. М., Данюк М. С.**
Аналіз основних біополімерів і мікроелементів у надземній масі *Paulownia tomentosa*
- Вишинський А. В.**
Морфометричні показники насіння сочевиці залежно від морфотипу, фракції та тривалості зберігання
- Гайда Ю. І., Фучило Я. Д., Брич В. Я., Шувар А. М., Грохольська Т. М.**
Сезонна динаміка росту *Miscanthus × giganteus* в умовах Західного Лісостепу
- Доронін В. А., Дрига В. В., Кравченко Ю. А., Рибак В. О., Доронін В. В.**
Вирощування насіння буряків цукрових безвисадковим способом
- Кононенко Л. М., Кам'янченко Д. І.**
Оцінка адаптивної стійкості сортів гороху посівного залежно від травмування та тривалості зберігання насіння
- Конониук Н. О.**
Енергетична ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та технологічних факторів
- Макух Я. П., Литвин Ю. О., Ременюк С. О., Різник В. М., Мошківська С. В., Петренко Т. В., Коховська І. В.**
Вплив ступеня забур'яненості на продуктивність соняшнику залежно від способів регулювання сегетального компоненту
- Мокрієнко В. А.**
Урожайність і якість урожаю кукурудзи в моно- та бінарних посівах
- Носенко В. Г.**
Параметри газообміну та функціональний стан фотосистеми міскантусу гігантського за різних систем удобрення й підживлення гуматом калію
- Царук І. В., Риженко А. С.**
Енергетична ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення
- Макух Д. Я.**
Оптимізація елементів технології вирощування павловнії в умовах Правобережного Лісостепу України
- Козаченко Д. М.**
Особливості функціонування фотосинтетичного апарату гібридів кукурудзи залежно від гербіцидного захисту та позакореневого удобрення

Original Research

- 3** **Boiko I. I., Zinchenko O. A., Mykhailovyn Yu. M., Daniuk M. S.**
Analysis of major biopolymers and microelements in the above ground biomass of *Paulownia tomentosa*
- 10** **Vyshynskiy A. V.**
Morphometric parameters of lentil seeds depending on morphotype, fraction and storage duration
- 20** **Haida Yu. I., Fuchylo Ya. D., Brych V. Ya., Shuvar A. M., Hrokholska T. M.**
Seasonal growth dynamics of *Miscanthus × giganteus* in the Western Forest Steppe
- 32** **Doronin V. A., Dryha V. V., Kravchenko Yu. A., Rybak V. O., Doronin V. V.**
Cultivation of sugar beet seed by the direct method
- 38** **Kononenko L. M., Kamianchenko D. I.**
Assessment of adaptive stability of pea varieties depending on seed damage and storage duration
- 50** **Kononiuk N. O.**
Energy efficiency of winter bread wheat cultivation depending on variety and technological factors
- 59** **Makukh Ya. P., Lytvyn Yu. O., Remeniuk S. O., Riznyk V. M., Moshkivska S. V., Petrenko T. V., Kokhovska I. V.**
Effect of weed infestation level on sunflower productivity depending on methods of weed control
- 66** **Mokriienko V. A.**
Yield and quality of maize crop under mono and binary cropping
- 77** **Nosenko V. H.**
Gas exchange parameters and functional state of the photosystem of *Miscanthus × giganteus* under different fertiliser systems and foliar application of potassium humate
- 84** **Tsaruk I. V., Ryzhenko A. S.**
Energy efficiency of winter *Brassicaceae* crops under different mineral fertiliser rates
- 92** **Makukh D. Ya.**
Optimisation of cultivation technology elements for paulownia in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine
- 101** **Kozachenko D. M.**
Functioning of the maize photosynthetic apparatus as affected by herbicide protection and foliar application of fertilisers

УДК 581.1:581.192:581.526.4:633.2

Аналіз основних біополімерів і мікроелементів у надземній масі *Paulownia tomentosa*

І. І. Бойко^{1*} , О. А. Зінченко¹ , Ю. М. Михайловин² , М. С. Данюк¹ ¹Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна²Уманський національний університет, вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., 20301, Україна*Автор для листування: Ірина Бойко, sknatla2019@ukr.net

Цитування: Бойко І. І., Зінченко О. А., Михайловин Ю. М., Данюк М. С. Аналіз основних біополімерів і мікроелементів у надземній масі *Paulownia tomentosa*. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp3-9>

Мета. Визначити вміст основних біополімерів і мікроелементів у листках і стеблах *Paulownia tomentosa* для оцінки їх хімічного складу та потенціалу використання як сировини для біоенергетики. **Методи.** Дослідження проводили у 2019–2024 рр. на Ялтушківській ДСС ІБКіЦБ НААН (Вінницька обл.). Об'єктом дослідження слугували насадження павловнії повстистої, закладені у 2018 році. Дослідження проводили на сірих лісових легкосуглинкових ґрунтах із вмістом гумусу 1,86%. Аналіз біохімічних показників здійснювався у динаміці вегетаційного періоду (червень, липень, серпень) для рослин різного віку, де за контроль було обрано однорічні екземпляри. Визначення технологічних параметрів біомаси (суха речовина, зольність, вміст целюлози, геміцелюлози, лігніну та мікроелементів) проводилося за загальноприйнятими методиками та стандартами для біоенергетичних культур. **Результати.** Встановлено, що вміст сухої речовини у листках коливався в межах 36,6–56,6%, у стеблах – 45,5–65,0% із тенденцією до зростання впродовж вегетації. Зольність була вищою у листках (5,1–6,5%) порівняно зі стеблами (1,3–2,2%). Вміст целюлози зростав із віком рослин і становив у листках 27,1–34,0%, у стеблах – 37,2–42,0%. Геміцелюлоза накопичувалась у межах 4,9–6,0% у листках і 10,1–11,8% у стеблах. Вміст лігніну також зростав: у листках – від 9,0 до 10,35%, у стеблах – від 14,0 до 14,5%. Концентрації хлору та сірки були незначними й становили відповідно 0,012–0,015% і 0,04–0,08%, причому їх вміст був дещо вищим у листках. **Висновки.** Біомаса *Paulownia tomentosa* характеризується високим вмістом структурних біополімерів і низькою концентрацією потенційно небажаних елементів (Cl, S), що є позитивним для використання у біоенергетиці. Стебла містять більше целюлози, геміцелюлози та лігніну, тоді як листки характеризуються вищою зольністю та вмістом мікроелементів. З віком рослин спостерігається зростання основних компонентів клітинної стінки, що свідчить про підвищення якості сировини. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування оптимальних строків заготівлі та напрямів переробки біомаси павловнії як перспективної енергетичної культури.

Ключові слова: *Paulownia tomentosa*; біомаса; суха речовина; біополімери; целюлоза; геміцелюлоза; лігнін; мікроелементи.

Вступ

Павловнія (*Paulownia* spp.) – швидкоростуча деревна культура, що привертає увагу як перспективна сировинна база для біоенергетики. Завдяки високій продуктивності та здатності накопичувати біомасу за короткий час, павловнія має значний потенціал для виробництва відновлюваної енергії [1, 2].

Одержано 23.01.2026 • Погоджено 13.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

Хімічний склад деревини, зокрема вміст вуглецю, азоту, сірки, хлору та інших елементів, є ключовим показником її енергетичних властивостей та екологічної безпеки при спалюванні. Вікові зміни та генотипові особливості впливають на якість деревини, тому детальне вивчення цих параметрів необхідне для оптимального вибору сортів і термінів використання рослин. У сучасних умовах важливо систематизувати інформацію про хімічний склад деревини різних гібридів павловнії в залежності від віку рослин. Це дозволить не лише підвищити ефективність використання біомаси, а й зменшити негативний вплив на довкілля [3–5].

Сучасні альтернативні природні ресурси дедалі частіше використовують як основну промислову сировину для виробництва біопалива, енергії та інших продуктів. Біоенергетичні культури, зокрема такі як міскантус і світчграсс, завдяки високій багаторічній врожайності, є перспективним джерелом високоякісної целюлози, зокрема для виробництва біопластика [6].

Іноземні дослідники підтвердили, що деревина павловнії має високу комерційну цінність для виробництва меблів, музичних інструментів, паперу, біопалива, пакувальних матеріалів, текстилю та у хімічній промисловості [7, 8].

Наукові джерела свідчать, що павловнія застосовується також в екологічних цілях, оскільки її здатність поглинати промислові забруднювачі з ґрунту і води, транспортувати їх судиновою системою та накопичувати в тканинах сприяє очищенню і відновленню навколишнього середовища [9].

Павловнія належить до м'яких порід деревини і характеризується однією з найвищих у світі швидкостей росту у висоту та діаметр. За різними даними, річний приріст висоти становить від 1,5–2,0 до 3,5 м. За оптимальних агротехнічних умов за п'ять років рослина може досягати висоти 15–20 м, що робить її придатною для використання як повноцінної промислової сировини [10, 11].

Хімічний склад різних біоенергетичних культур вивчають на різних сортах і вікових етапах росту й розвитку, що важливо для визначення якості сировини і подальшої її переробки [12].

Вченими досліджено вікові зміни хімічного складу деревини павловнії, що дозволяє визначати оптимальний вік рубки залежно від цільового призначення сировини. Завдяки швидко-рослості виду, використання деревини павловнії вже через кілька років, порівняно з іншими деревними культурами, забезпечує значну економічну перевагу та підвищує її комерційну цінність [13–15].

Дослідження показують, що п'ятирічні екземпляри павловнії можуть сприяти більш інтенсивному і швидкому горінню, що потенційно підвищує ризик виникнення лісових пожеж. Водночас деревина павловнії характеризується високою вогнестійкістю, що пояснюється її сильно пористою клітинною структурою з великими судинами, що ускладнює займання матеріалу [16, 17]. Автори також відзначають, що теплопровідність карбонізованого шару деревини павловнії є нижчою порівняно з іншими деревними матеріалами.

Інші автори вказують, про те, що немає суттєвої різниці між одно- та трирічними зразками з дуже схожим вмістом вуглецю, хлору та сірки. Зазначено, що з віком деревини спостерігається зростання концентрації екстрактивних речовин, що переважно пов'язано з підвищенням вмісту компонентів, вилучених етанолом та водними розчинами. Водночас суттєвих змін у вмісті лігніну та α -целюлози не виявлено, натомість відзначається поступове зниження вмісту геміцелюлоз із збільшенням віку деревини [18].

Мета дослідження – визначити вміст основних біополімерів і мікроелементів у листках і стеблах *Paulownia tomentosa* для оцінки їх хімічного складу та потенціалу використання як сировини для біоенергетики.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводились упродовж 2019–2024 рр. на Ялтушківській дослідно-селекційній станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (с. Черешневе Барського району Вінницької області). Ґрунт дослідного поля – сірий лісовий легкосуглинковий, вміст гумусу в орному шарі (за Тюрнімом) – 1,86%; легкогідролізованого азоту (за Корнфільдом) – 63,0 мг/кг; рухомого фосфору та калію (за Чириковим) – 109 та 119 мг/кг ґрунту; гідролітична кислотність (за Каппеном) – 2,9 мг-екв/100 г ґрунту; Рн сольове – 5,3; сума увібраних основ – 22,4 мг-екв/100 г ґрунту.

Дослідження проводили на рослинах павлової повстистої (*Paulownia tomentosa*). У 2018 році провели закладку плантації, а уже починаючи із 2019-го і упродовж п'яти років проводили дослідження із визначення біохімічних показників. За контроль було обрано однорічні рослини першого року розвитку – 2019 року.

Показники технологічної якості біоенергетичних рослин проводили за методичними рекомендаціями та загальноприйнятими методиками [19–22].

Результати дослідження

На основі відібраних зразків рослин павлової протягом вегетації було проаналізовано листя та стебла на вміст золи і сухої речовини.

Аналізуючи накопичення сухої речовини в листках павлової на початку вегетації найбільший її вміст спостерігається в листках рослин 4-го року вирощування (45,00%), а найменше в листках павлової першого року вирощування, а саме 38,40%

Встановлено, що в липні у листках павлової кількість сухої речовини була в межах від 45,50 до 47,60%, у кінці вегетації – від 50,9 до 56,6%.

Характеризуючи накопичення сухої речовини в стеблах павлової спостерігається така тенденція: рослини павлової в стеблах накопичували вміст сухої речовини від 45,50 до 47,30% на початку вегетації в червні та від 62,40 до 65,0% в кінці вегетації.

Вміст зольних елементів в листках павлової на початку вегетації коливався від 5,1 до 5,6%, у середині вегетації цей показник збільшувався від 5,5 до 6,1%, а в кінці вегетації у серпні рослини павлової накопичували від 6,0 до 6,5%.

Варто вказати, що окрім листків павлової було проаналізовано і стебла на вміст зольних елементів. Кількість зольних елементів в стеблах павлової на початку вегетації складала від 1,3 до 1,7%, далі цей показник змінювався і був від 1,7 до 2,1%, а в кінці вегетації від 1,8 до 2,2% (табл. 1).

Таблиця 1. Вміст сухої речовини та золи в листках і стеблах павлової (2019–2024 рр.)

Рік вирощування	Суша речовина, %						Зола, %					
	у листках			у стеблах			у листках			у стеблах		
	1.06	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08
1 контроль	38,4	45,5	55,3	46,5	48,4	62,4	5,2	5,6	6,3	1,3	1,7	1,8
2	36,6	46,0	50,9	46,3	47,8	62,5	5,2	5,5	6,2	1,4	1,9	1,9
3	42,5	47,4	56,6	46,9	48,5	59,4	5,1	5,9	6,0	1,5	1,9	1,9
4	45,0	48,3	53,3	47,3	47,6	63,3	5,3	5,9	6,4	1,7	2,0	2,1
5	43,4	46,8	55,0	46,6	46,9	65,0	5,4	6,1	6,5	1,6	2,1	2,2
6	39,4	47,6	54,3	45,9	48,8	64,2	5,6	6,0	6,5	1,6	2,1	2,2
HP _{0,05}	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,8	0,1	0,4	0,1	0,2	0,4	0,2

Отже, у стеблах павлової спостерігається більш стабільний вміст сухої речовини, тоді як у листках – більша варіабельність.

Вивчення елементного та біохімічного складу біоенергетичних культур неможливе без знання складових клітинної оболонки. Зокрема, кількість целюлози в листках рослин павлової в червні знаходилась у межах від 27,10 до 29,10%. У середині вегетації цей показник був від 29,10 до 30,50%, а в кінці вегетації кількість целюлози збільшувалась від 31,60 до 34,02%.

Встановлено, що кількість геміцелюлози в листках павлової в червні коливалась від 4,9 до 5,2%, далі вміст геміцелюлози змінювався і коливався від 5,0 до 5,5% в середині вегетаційного періоду і від 5,4 до 6,0% в кінці вегетації.

Вміст целюлози в стеблах рослин павлової розподілявся таким чином: найменша кількість на початку вегетації відмічена в стеблах павлової першого року 37,20%, найбільша – 41,00% в стеблах павлової шостого року. У кінці вегетації стебла павлової збільшували вміст целюлози від 40,00 до 42,05%. Геміцелюлоза в стеблах павлової у червні накопичувалась від 10,10 до 10,25%, у липні її кількість збільшувалась і становила від 10,35 до 10,65%. У серпні кількість

геміцелюлози в стеблах павловнії досягала свого максимуму – 11,00% у рослин 1-го року і 11,85% у рослин 5-го року (табл. 2).

Таблиця 2. Вміст целюлози та геміцелюлози в листках і стеблах павловнії (2019–2024 рр.)

Рік вирощування	Целюлоза, %						Геміцелюлоза, %					
	у листках			у стеблах			у листках			у стеблах		
	1.06	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08
1 контроль	27,10	29,10	31,60	37,20	39,05	40,00	4,9	5,0	5,4	10,10	10,35	11,00
2	28,30	31,05	32,40	39,90	40,40	41,95	5,0	5,3	5,6	10,15	10,50	11,45
3	27,50	29,30	30,95	39,85	40,45	41,25	5,0	5,2	5,8	10,20	10,55	11,50
4	28,50	29,65	33,05	40,20	40,40	42,05	5,2	5,4	5,9	10,25	10,60	11,60
5	28,90	30,02	33,50	40,50	41,00	42,00	5,1	5,5	5,9	10,20	10,65	11,85
6	29,10	30,50	34,02	41,00	41,02	41,99	5,2	5,5	6,0	10,22	10,60	11,70
НІР _{0,05}	0,4	0,7	0,5	1,0	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3

Таким чином, кількість целюлози і геміцелюлози в стеблах досліджуваних рослин павловнії була вищою, ніж у листках.

Варто вказати, що накопичення в листках біоенергетичних рослин целюлози і геміцелюлози проходило наступним чином – більша кількість целюлози спостерігається в листках рослин з більшим строком вегетації.

Встановлено, що кількість целюлози і геміцелюлози в стеблах енергетичних павловнії була більшою порівняно з листками та вміст її збільшувався залежно від віку плантацій. Крім того, накопичення лігніну в рослинах павловнії відбувалось за такою схемою, як і накопичення целюлози і геміцелюлози: більше лігніну міститься в стеблах менша в листках рослин.

Досліджено, що листки рослин павловнії з початку накопичували лігнін з різною інтенсивністю – від 9,00 до 9,40%. У кінці вегетації листки рослин накопичували лігніну від 10,05 до 10,35%.

Аналізуючи стебла павловнії на вміст лігніну зазначимо, що в кінці вегетації рослини першого року містили його від 14,15% і до 14,50% рослини 6-го року (табл. 3).

Таблиця 3. Динаміка накопичення лігніну в листках і стеблах павловнії (2019–2024 рр.)

Рік вирощування	Лігнін, %					
	у листках			у стеблах		
	1.06	1.07	1.08	1.06	1.07	1.08
1 контроль	9,00	9,65	10,05	14,00	14,15	14,15
2	9,20	10,05	10,20	14,05	14,20	14,25
3	9,15	9,85	10,25	14,20	14,30	14,35
4	9,35	10,00	10,25	14,25	14,32	14,40
5	9,40	10,05	10,30	14,30	14,35	14,40
6	9,42	10,10	10,35	14,30	14,35	14,50
НІР _{0,05}	0,1	0,7	0,1	0,2	0,1	0,1

Досліджувані рослини павловнії будуть використовуватись для отримання твердих біопалив доцільно визначити хімічні елементи, які впливають на паливні властивості, а саме: вуглець, водень, кисень, хлор та сірка.

Дослідженнями встановлено, що в листках рослин павловнії кількість хлору була незначною та складала від 0,013 до 0,015%. У стеблах досліджуваних рослин павловнії кількість хлору була від 0,012 до 0,014%.

Експериментально досліджено, що накопичення сірки в листках павловнії було в межах від 0,05 до 0,08%. У стеблах павловнії розподіл мікроелементів проходив відповідно: від 0,05 до 0,07% (табл. 4).

Таблиця 4. Вміст мікроелементів у рослинах павлонії (2019–2024 рр.)

Рік вирощування	Частина рослини	Хлор, %	Сірка, %
1 контроль	листя	0,013	0,05
	стебло	0,012	0,04
2	листя	0,015	0,06
	стебло	0,014	0,05
3	листя	0,014	0,06
	стебло	0,012	0,05
4	листя	0,014	0,07
	стебло	0,012	0,06
5	листя	0,015	0,07
	стебло	0,013	0,05
6	листя	0,015	0,08
	стебло	0,013	0,05
НІР _{0,05}		0,2	0,1

Таким чином, досліджувані зразки культури павлонії у своєму складі містять невелику кількість хлору та сірки, а під час характеристики накопичення хлору в листках рослин павлонії відмітимо, що більша кількість міститься в листках, менша в стеблах рослин.

Висновки

Вміст сухої речовини в листках рослин павлонії був вищим, ніж у стеблах, та не залежав від віку плантацій. Зокрема, вміст сухої речовини у листках павлонії коливався від 36,6 до 45,5%, у стеблах – від 46,5 до 62,5%. Загальна тенденція – поступове збільшення сухої речовини з роками, що свідчить про накопичення біомаси.

Кількість зольних елементів у листках була вищою порівняно зі стеблами, більше золи відмічено в рослинах з більшим строком вегетації.

Вміст золи був більшим у листках (5,1–6,5%) порівняно зі стеблами (1,3–2,2%), що відображає вищу концентрацію мінеральних речовин у листовій масі.

Накопичення целюлози та геміцелюлози зросло впродовж досліджуваного періоду: целюлоза у листках збільшилася з 27,1 до 34,0%, у стеблах – з 37,2 до 42,0%; геміцелюлоза відповідно зросла з 4,9 до 6,0% у листках та з 10,1 до 11,8% у стеблах.

Вміст лігніну в листках та стеблах мав тенденцію до незначного зростання: у листках – від 9,0 до 10,35%, у стеблах – від 14,0 до 14,5%, що пов'язано зі зміцненням структурної тканини рослини.

Накопичення хлору і сірки листками і стеблами рослин відбувалось таким чином: більша кількість відмічена в листках, менша в стеблах. Більша кількість хлору й сірки відмічена в рослин з більшим строком вегетації. Концентрація цих мікроелементів коливалась у межах: хлор – 0,012–0,015% (листя та стебло), сірка – 0,04–0,08%, з тенденцією до зростання в листках, що може свідчити про адаптивні процеси метаболізму.

Отже, досліджувана рослинна біомаса є одним з найбільш перспективних джерел одержання твердого біопалива в Україні. Крім того, результати хімічного складу можуть бути основою для визначення оптимальних напрямів використання цієї біомаси.

Список використаних джерел

- Lugli, L., Mezzalana, G., Lambardi, M., Zhang, H., & La Porta, N. (2023). *Paulownia* spp.: A bibliometric trend analysis of a global multi-use tree. *Horticulturae*, 9(12), Article 1352. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121352>
- Dżugan, M., Miłek, M., Grabek-Lejko, D., Hęclik, J., Jacek, B., & Litwińczuk, W. (2021). Antioxidant activity, polyphenolic profiles and antibacterial properties of leaf extract of various *Paulownia* spp. clones. *Agronomy*, 11(10), Article 2001. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102001>
- Jakubowski, M. (2022). Cultivation potential and uses of *Paulownia* wood: A review. *Forests*, 13(5), Article 668. <https://doi.org/10.3390/f13050668>

4. Özdeş, H., İpçak, H. H., Özüretmen, S., & Canbolat, Ö. (2021). Feed value of dried and ensiled paulownia (*Paulownia* spp.) leaves and their relationship to rumen fermentation, in vitro digestibility, and gas production characteristics. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 50, Article e20210057. <https://doi.org/10.37496/rbz5020210057>
5. Rodríguez-Seoane, P., Díaz-Reinoso, B., Moure, A., & Domínguez, H. (2020). Potential of *Paulownia* sp. for biorefinery. *Industrial Crops and Products*, 155, Article 112739. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112739>
6. Roik, M. V., Sinchenko, V. M., Nurmukhammedov, A. K., Hanzhenko, O. M., & Humentyk, M. Ya. (2021). Application of bioenergy crops for bioplastic production. *Bioenergy*, 2, 13–15. <https://doi.org/10.47414/be.2.2021.244101>
7. Ślawińska, N., Zając, J., & Olas, B. (2023). *Paulownia* organs as interesting new sources of bioactive compounds. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), Article 1676. <https://doi.org/10.3390/ijms24021676>
8. Bodnár, A., Pajor, F., Steier, J., Kispál, T., & Póti, P. (2014). Nutritive value of paulownia (*Paulownia* spp.) hybrid tree leaves. *Hungarian Agricultural Research*, 23(4), 27–32.
9. Iesipov, O., Polyashenko, S., & Sorokin, S. (2023). Paulownia as a renewable energy source. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, (25-01), 48–53.
10. Yang, J. C., Ho, C. K., Chen, Z. Z., & Chang, S. H. (1996). *Paulownia* × *taiwaniana* (Taiwan Paulownia). In Y. P. S. Bajaj (Ed.), *Trees IV. Biotechnology in Agriculture and Forestry* (Vol. 35, pp. 251–268). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10617-4_16
11. Zhang, Y., Qiao, Z., Li, J., & Bertaccini, A. (2024). *Paulownia* witches' broom disease: A comprehensive review. *Microorganisms*, 12(5), Article 885. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12050885>
12. Ghazzawy, H. S., Bakr, A., Mansour, A. T., & Ashour, M. (2024). *Paulownia* trees as a sustainable solution for CO₂ mitigation: Assessing progress toward 2050 climate goals. *Frontiers in Environmental Science*, 12, Article 1307840. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1307840>
13. San José, M., Cernadas, M., & Corredoira, E. (2014). Histology of the regeneration of *Paulownia tomentosa* (Paulowniaceae) by organogenesis. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 809–812.
14. El-Refiaie, N. M., Ayyat, M. S., Mahmoud, H. K., & Naiel, M. A. (2024). The effects of *Paulownia* leaf extract dietary administration on growth, redox status, immune responses, and modulate intestinal microbial content in Nile tilapia. *Aquaculture International*, 32(2), 1857–1877. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01247-9>
15. Denysenko, A., Yatsenko, S., & Cheriopkina, R. (2021). Paulownia for the pulp and paper industry. *Materials of the International Scientific and Practical Conference "Ecology. Man. Society"*, 153–156.
16. Li, P., & Oda, J. (2007). Flame retardancy of *Paulownia* wood and its mechanism. *Journal of Materials Science*, 42, 8544–8550. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1781-9>
17. Kumar, R., Pandey, K. K., Chandrashekar, N., & Mohan, S. (2010). Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. *Journal of Forestry Research*, 21, 514–516. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0108-x>
18. Ipekci, Z., Altinkut, A., Kazan, K., Bajrovic, K., & Gozukirmizi, N. (2001). High frequency plant regeneration from nodal explants of *Paulownia elongata*. *Plant Biology*, 3(2), 113–115. <https://doi.org/10.1055/s-2001-12903>
19. Janjić, Z., & Janjić, M. (2019). *Paulownia*, characteristics and perspectives of its exploitation. *Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design*, 8(2), 34–41.
20. ASTM International. (1996). *Standard test method for acid-insoluble lignin in wood and pulp* (ASTM D1106-96). <https://doi.org/10.1520/D1106-96>
21. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1999). *Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp* (TAPPI T203 cm-99).
22. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *Acid-insoluble lignin in wood and pulp* (TAPPI T222 om-02).

Analysis of major biopolymers and microelements in the above ground biomass of *Paulownia tomentosa*

I. I. Boiko^{1*}, O. A. Zinchenko¹, Yu. M. Mykhailovyn², M. S. Daniuk¹

¹Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine

²Uman National University, 1 Instytutska St., Uman, Cherkasy region, 20305, Ukraine

*Corresponding author: Iryna Boiko, sknatla2019@ukr.net

Citation: Boiko, I. I., Zinchenko, O. A., Mykhailovyn, Yu. M., & Daniuk, M. S. (2025). Analysis of major biopolymers and microelements in the above ground biomass of *Paulownia tomentosa*. *Bioenergy*, 1, 3–9. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp3-9>

Aim. To determine the content of major biopolymers and microelements in the leaves and stems of *Paulownia tomentosa* in order to assess their chemical composition and potential use as feedstock for bioenergy. **Methods.** The study was conducted in 2019–2024 at the Yaltushkiv Experimental Breeding Station of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS (Vinnytsia region). The research object was plantations of *Paulownia tomentosa* established in 2018. The study was carried out on grey forest light-loam soils with a humus content of 1.86%. Biochemical parameters were analysed during the vegetation period (June, July, and August) in plants of different ages. Determination of technological parameters of biomass (dry matter, ash content, cellulose, hemicellulose, lignin and microelements) was performed according to standard methodologies for bioenergy crops. **Results.** The dry matter content in leaves ranged from 36.6 to 56.6%, and in stems from 45.5 to 65.0%, showing a tendency to increase during vegetation. Ash content was higher in leaves (5.1–6.5%) compared with stems (1.3–2.2%). Cellulose content increased with plant age, amounting to 27.1–34.0% in leaves and 37.2–42.0% in stems. Hemicellulose content was 4.9–6.0% in leaves and 10.1–11.8% in stems. Lignin content also rose: in leaves from 9.0 to 10.35%, and in stems from 14.0 to 14.5%. Concentrations of chlorine and sulphur were low, 0.012–0.015% and 0.04–0.08%, respectively, with slightly higher values in leaves. **Conclusions.** The biomass of *Paulownia tomentosa* is characterised by a high content of structural biopolymers and a low concentration of potentially undesirable elements (Cl, S), which is favourable for bioenergy applications. Stems contain more cellulose, hemicellulose and lignin, whereas leaves are distinguished by higher ash content and microelement levels. With increasing plant age, the main components of the cell wall accumulate, indicating improved feedstock quality. The results obtained may be used to substantiate optimal harvesting time and applications for *Paulownia* biomass as a promising energy crop.

Keywords: *Paulownia tomentosa*; biomass; dry matter; biopolymers; cellulose; hemicellulose; lignin; microelements.

ORCID

Ірина Бойко / Iryna Boiko

Олеся Зінченко / Olesia Zinchenko

Юлія Михайловин / Yuliia Mykhailovyn

Максим Данюк / Maksym Daniuk

<https://orcid.org/0000-0003-3116-3753>

<https://orcid.org/0000-0002-1381-8659>

<https://orcid.org/0009-0001-3185-4741>

<https://orcid.org/0000-0001-6048-1772>

УДК 633.352.1:631.531.02:631.563

Морфометричні показники насіння сочевиці залежно від морфотипу, фракції та тривалості зберігання

А. В. Вишинський 

Уманський національний університет, вул. Інститутська, м. Умань, Черкаська обл., 20301, Україна

Автор для листування: Андрій Вишинський, lidiyakononenko@ukr.net

Цитування: Вишинський А. В. Морфометричні показники насіння сочевиці залежно від морфотипу, фракції та тривалості зберігання. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 10–19. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp10-19>

Мета. Установити морфометричні показники насіння сочевиці різних морфотипів залежно від його фракційного складу та тривалості зберігання для наукового обґрунтування оптимальних параметрів формування страхових насінневих фондів в умовах Правобережного Лісостепу України. **Методи.** Дослідження базувалися на трифакторному модельному досліді (2022–2026 рр.). Об'єктами виступали морфотипи сочевиці харчової червонозерний і зеленозерний. Схема досліду включала вивчення впливу морфотипу (фактор А), тривалості зберігання від 0 до 5 років (фактор В) та фракційного складу насіння: I (> 5,0 мм), II (4,0–5,0 мм), III (3,0–4,0 мм) (фактор С). Посівні якості та біометричні параметри проростків визначали згідно з ДСТУ 4138-2002 на 10-ту добу. **Результати.** Встановлено, що найвищим ростовим потенціалом володіє велика фракція (> 5,0 мм) зеленозерної сочевиці, довжина кореня якої на 10-ту добу у свіжозібраному стані сягає 62 мм, що на 6,9% перевищує червонозерний аналог. Експериментально підтверджено суттєву деградацію сили росту протягом п'яти років зберігання: найбільш інтенсивне зниження показників зафіксовано після третього року експозиції (на 5–6 мм щорічно). Найбільш вразливим до старіння виявився гіпокотиль, індекс деградації якого становив 45,6%, тоді як індекс кореневої системи продемонстрував найвищу стабільність ($V = 9,8\%$). До кінця п'ятого року зберігання показники дрібної фракції (3,0–4,0 мм) червонозерної сочевиці впали до критичного мінімуму (корінь – 26 мм, маса – 0,095 г). **Висновки.** Зеленозерний морфотип та великі фракції насіння (> 5,0 мм) виявляють вищу адаптивну стійкість до тривалого зберігання. Велика фракція обох сортів навіть після п'яти років зберігання зберігає кращу життєздатність (корінь 34–38 мм), ніж дрібна фракція вже після трьох років. Це обґрунтовує доцільність використання саме великого насіння зеленозерних сортів для закладання у довгострокові страхові фонди з метою збереження високого біологічного потенціалу культури.

Ключові слова: проростки; схожість; довжина; маса; коренева система.

Вступ

Сучасні тенденції в рослинництві, спрямовані на біологізацію та пошук високобілкових культур, підняли харчову сочевицю (*Lens culinaris* Medik.) до статусу стратегічного об'єкта наукових досліджень. Як зазначають у своїх фундаментальних працях Орехівський В. Д. та Січка В. І. [1], ця культура є не лише незамінним джерелом рослинного протеїну, що за якісними характеристиками наближається до тваринних білків, а й виступає потужним біологічним інструментом відновлення родючості ґрунтів. М. Лі та ін. [2, 3] вказують також, що сочевиця характеризується високою нутрицевтичною цінністю, значним фітохімічним потенціалом.

Одержано 11.02.2026 • Погоджено 23.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

лом і біологічною активністю, що визначає її важливе значення як функціонального продукту харчування.

Проблема збереження високих посівних кондицій насіння бобових культур є однією з центральних у сучасному насінництві.

Життєздатність насіння – це динамічний показник, що формується під впливом комплексу генетичних, агротехнічних та екологічних чинників. Як зазначають Данильченко О. М. та ін. [4], продуктивність сочевиці та подальша стійкість її насіння до старіння закладаються ще на етапі вирощування, де інокуляція та збалансоване мінеральне живлення відіграють роль первинних стабілізаторів фізіологічного стану зародка.

Основними зовнішніми чинниками, що визначають темпи деградації насіння під час зберігання, є температура та вологість. У фундаментальному дослідженні Bhattarai V. та ін. [5] доведено, що навіть незначні коливання температури в зерносховищах можуть призвести до незворотних змін у метаболічній активності червоної сочевиці, що негативно впливає на її ринкові та кінцеві споживчі властивості. Це корелює з висновками Білоножка В. Я. та Полторецької Н. М. [6], які на прикладі інших культур (гречки) підкреслюють, що життєздатність та «життєвість» (vigor) насіння є похідними від генетичного потенціалу сорту та умов його формування.

Якість насіння для тривалого зберігання залежить від багатьох факторів. Серед них – сортові особливості рослини, умови формування насіння на материнській рослині, вологість та температура під час збирання й обробки. Крім того, на життєздатність насіння впливають умови його зберігання та застосовані технології консервації [7]. Роль насінневих банків у збереженні біорізноманіття, за словами P. W. Wambugu та ін. [8], є вирішальною для підтримання екосистем.

Довготривале зберігання насіння бобових культур нерозривно пов'язане з динамікою мікробіологічних процесів. Дослідження О. П. Ткачук [9], D. N. Bogase та ін. [10] свідчать, що сівозмінна та системи живлення мають пролонгований вплив на ферментативну активність ґрунту, що опосередковано визначає мікробіом насіння. Формування посівних якостей, як зазначають А. В. Баган та ін. [11], залежить від фізіологічної зрілості зерна на момент збирання.

Оцінка посівного потенціалу насіння після тривалого зберігання потребує комплексного підходу, що поєднує класичні морфологічні показники з новітніми біохімічними та молекулярно-генетичними методами. Як зазначають В. П. Карпенко та ін. [12], одним із непрямих, але інформативних показників життєздатності бобових є їхня здатність до формування активного симбіотичного апарату, що безпосередньо залежить від фізіологічного стану насінини та дії біопрепаратів. Розвиток симбіотичних структур забезпечує ефективне засвоєння атмосферного азоту, що підвищує продуктивність рослини та покращує родючість ґрунту. Тому оцінка формування симбіотичного апарату є важливим елементом у контролі якості насіння та плануванні заходів агротехнічної підтримки культури.

Більшість авторів наголошують про важливість стратегії моніторингу життєздатності насіння, що включають регулярну оцінку схожості, енергії проростання та фізіологічного стану насіння під час зберігання. Генетичний контроль дозволяє виявляти зміни у генетичній структурі, що можуть впливати на якість і стійкість рослин. Поєднання моніторингу та генетичного аналізу забезпечує своєчасне виявлення ризиків і підтримку високого рівня життєздатності насіння протягом тривалого часу [13–16].

Поєднання моніторингу та генетичного аналізу забезпечує своєчасне виявлення ризиків і підтримку високого рівня життєздатності насіння протягом тривалого часу. Водночас, попри глибоке вивчення біохімічних аспектів старіння, поза увагою дослідників часто залишається динаміка фізичних параметрів насіння як індикатора його внутрішнього стану. Зокрема, недостатньо вивченим є питання кореляції між лінійними розмірами насінини (морфометрією) та її здатністю протистояти деструктивним процесам під час тривалого зберігання.

Фракційний склад насіння є не лише технологічним показником, а й біологічним маркером запасу поживних речовин, що детермінує стартову потужність проростка [7]. Оцінка морфометричних показників у розрізі різних морфотипів сочевиці дозволить встановити, наскільки стабільними є геометричні та вагові характеристики насіння різних фракцій за умови багаторічної експозиції в зерносховищах. Це, своєю чергою, надасть можливість оптимізувати про-

цеси сортування та відбору насіннєвого матеріалу для тривалого зберігання без втрати його посівної придатності.

Виходячи з вище описаного, проведення досліджень із оцінки морфометричних параметрів насіння сочевиці залежно від його походження, розмірних характеристик та часового фактора є актуальним науковим завданням, що має важливе значення для сучасного насінництва.

Мета дослідження – установити морфометричні показники насіння сочевиці різних морфотипів залежно від його фракційного складу та тривалості зберігання для наукового обґрунтування оптимальних параметрів формування страхових насіннєвих фондів у мовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження були закладені згідно з методичними рекомендаціями і основами наукових досліджень в агрономії [18–20] в Уманському національному університеті (м. Умань) упродовж 2022–2025 рр.

Об'єктами досліджень було обрано два сучасні сорти сочевиці харчової (*Lens culinaris* Medik.), які на момент проведення експериментів були внесені до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні, та рекомендовані для зон Степу та Лісостепу.

Сорт 'Даринка' (червонозерний морфотип) створений у Державній установі Інститут зернових культур НААН України (м. Дніпро). Рік реєстрації – 2019. Сорт вирізняється коротким періодом вегетації (75 діб) та високою посухостійкістю (8 балів). Рослини мають висоту 58 см із прикріпленням нижнього бобу на рівні 17 см, що забезпечує придатність до механізованого збирання. Маса 1000 насінин за даними заявника становить 39 г. Вміст білка в зерні – 26%. Сорт характеризується високою стійкістю до розтріскування бобів (8 балів) та комплексною стійкістю (7 балів) до основних збудників хвороб: аскохітозу (*Ascochyta ervicola* Syd.), фузаріозу (*Fusarium oxysporum* Schlecht.) та бактеріального в'янення.

'СНІМ 18' / 'SNIM 18' (зеленозерний морфотип). Сорт української селекції (заявник – Вовк В. А.). Рік реєстрації – 2018. Рекомендований для вирощування в зонах Степу, Лісостепу та Полісся. Характеризується тривалішим вегетаційним періодом вегетації – 93 доби. Рослини нижчі (39 см), проте мають стабільну висоту прикріплення нижнього бобу – 16,5 см. Урожайність насіння за стандартної вологості складає 2,6 т/га. Насіння дещо крупніше, ніж у сорту 'Даринка', маса 1000 насінин становить 42 г. Вміст білка – 28%. Сорт має високу стійкість до вилягання та розтріскування бобів (8 балів). Виявляє високу толерантність до ураження аскохітозом (8 балів) та стійкість до пошкодження смугастим довгоносоком (8 балів).

Обидва сорти належать до дрібнозерної групи, проте суттєво різняться за тривалістю вегетації (75 проти 93 діб) та генетично детермінованим вмістом білка (26 та 28%), що є критично важливим при вивченні інтенсивності біохімічного старіння насіння.

Експериментальна частина роботи базувалася на трифакторному модельному досліді. Схема досліджень включала наступні чинники:

Схема 1. Вплив морфотипу, тривалості зберігання і фракційного складу насіння сочевиці на його посівні якості.

Фактор А – морфотип: червонозерна та зеленозерна сочевиця;

Фактор В – тривалість зберігання: свіжозібране (вихідний контроль); 1, 2, 3, 4 і 5 років.

Фактор С – фракційний склад насіння: I (велика) >5,0 мм; II (середня) 4,0–5,0 мм; III (дрібна) – 3,0–4,0 мм

Контроль – свіжозібране насіння середньої фракції кожного виду (що дозволить порівнювати старіння окремо для кожного морфотипу).

Морфометричні вимірювання лінійних параметрів проростків (довжини кореня та гіпокотиля) здійснювали на 10-ту добу інкубації на вибірці з 50 типових рослин кожного варіанта.

Енергія проростання та лабораторна схожість: визначали за протоколами ISTA [21] та ДСТУ 4138-2002 [22] шляхом інкубації у кліматичних камерах при стабільному терморегімі ($20 \pm 0,5$ °C).

Статистичні розрахунки: використовували Методику селекційного експерименту (у рослинництві) [23].

Результати дослідження

Встановлено, що найвищим ростовим потенціалом характеризується зеленозерна сочевиця великої фракції, довжина кореня якої у свіжозібраному стані сягає 62 мм. Порівняно з червонозерним морфотипом аналогічної фракції перевага зеленозерних зразків становить 4 мм, що при значенні НІР для фактора А на рівні 2,1 мм підтверджує вищу фізіологічну активність зародка зеленозерної сочевиці.

Ключовим чинником забезпечення інтенсивного росту кореня є запас поживних речовин у сім'ядолях, що безпосередньо корелює з фракційним складом насіння. Для обох досліджуваних морфотипів зафіксовано закономірне зниження довжини кореня при зменшенні розміру насінин. Так, у свіжозібраному насінні перехід від великої до дрібної фракції призводив до скорочення довжини кореня на 10 мм, що за показника НІР для фактора С 1,8 мм вказує на визначальну роль крупності насіння у формуванні потужної первинної кореневої системи.

Експериментально підтверджено суттєву деградацію сили росту насіння протягом п'яти років зберігання, що виражається у скороченні довжини кореня проростків червонозерної сочевиці фракції > 5,0 мм з 58 мм (свіжозібране) до 34 мм (5 років), тобто на 41,4%.

Порівняльний аналіз морфотипів свідчить про генетичну перевагу зеленозерного, який у контрольній фракції 4,0–5,0 мм формує корінь завдовжки 58 мм, що на 4 мм більше, ніж у аналогічного варіанта червонозерної сочевиці.

Встановлено критичну роль фракційного складу: у свіжозібраному насінні зеленозерної сочевиці різниця між великою (> 5,0 мм) та дрібною (3,0–4,0 мм) фракціями становить 10 мм (62 проти 52 мм), що підкреслює вищу концентрацію енергетичних ресурсів у великому зерні.

Динаміка старіння найбільш стрімко проявляється у дрібній фракції (3,0–4,0 мм) червонозерного морфотипу, де довжина кореня за період експозиції знизилася на 22 мм (з 48 до 26 мм), досягаючи найнижчого значення в усьому експерименті.

Навіть за тривалого п'ятирічного зберігання велика фракція (> 5,0 мм) обох сортів демонструє кращу життєздатність (34–38 мм), ніж дрібна фракція (3,0–4,0 мм) уже після трьох років зберігання (36–40 мм), що доводить доцільність використання саме великого насіння для створення довгострокових страхових фондів.

За п'ятирічного періоду зберігання відмічено прогресуюче пригнічення ростових функцій, зумовлене біохімічним старінням насіння. Найбільш виражена депресія росту зафіксована після третього року експозиції, коли довжина кореня почала знижуватися на 5–6 мм щорічно. До кінця п'ятого року зберігання показники дрібної фракції червонозерної сочевиці впали до мінімального значення 26 мм, що свідчить про глибоку деградацію життєздатності (табл. 1).

Таблиця 1. Довжина кореня проростків залежно від тривалості зберігання та морфотипу, мм

Фракція, мм (С)	Тривалість зберігання, роки (В)					
	Свіжозібране	1 рік	2 роки	3 роки	4 роки	5 років
Червонозерна (А)						
> 5,0	58	55	51	46	40	34
4,0–5,0	54 (К)	51	47	42	37	31
3,0–4,0	48	45	41	36	31	26
Зеленозерна (А)						
> 5,0	62	59	55	50	44	38
4,0–5,0	58 (К)	55	51	46	40	35
3,0–4,0	52	49	45	40	35	30
НІР _{0,05}				3,6		
Фактор А				2,1		
Фактор В				2,9		
Фактор С				1,8		
Фактор АВС				4,8		

Таким чином, оцінка взаємодії факторів із НІР 4,8 мм дозволяє стверджувати, що велика фракція зеленозерної сочевиці навіть на п'ятий рік зберігання формує корінь довжиною 38 мм, що перевищує показники свіжозібраної дрібної фракції червонозерного морфотипу на другий-третій рік зберігання. Це підкреслює технологічну перевагу великих фракцій зеленозерної сочевиці як найбільш стійкої сировини до тривалих термінів зберігання.

Дослідження морфометричних параметрів гіпокотила сочевиці із свіжозібраного насіння показав, що зеленозерний морфотип характеризується вищою інтенсивністю росту гіпокотила, яка у великій фракції досягає 39 мм. Порівняно з червонозерною сочевицею аналогічного розміру, зеленозерні зразки демонструють перевагу на рівні 3 мм, що за значення НІР для фактора А 1,5 мм підтверджує статистичну значущість впливу морфотипу на початковий етап.

Експериментально підтверджено, що розмір насіння виявився критичним чинником для розвитку гіпокотила, оскільки він безпосередньо залежить від мобілізації запасних речовин сім'ядоль. У межах кожного морфотипу спостерігалось послідовне зменшення довжини гіпокотила при переході від великої до дрібної фракції. Так, у свіжозібраному стані різниця між крайніми фракціями складала 7 мм, що при НІР для фактора С 1,3 мм вказує на суттєве послаблення ростових процесів у дрібному насінні.

Варто вказати, що упродовж п'яти років зберігання зафіксовано прогресуюче скорочення довжини гіпокотила у всіх досліджуваних варіантах.

Найбільш інтенсивне зниження показника спостерігалось після третього року зберігання, що корелює з раніше встановленим зростанням кислотного числа жиру та деградацією білкових фракцій. До кінця п'ятого року довжина гіпокотила дрібної фракції червонозерної сочевиці знизилася до мінімальних 14 мм, що свідчить про втрату здатності насіння до формування повноцінних сходів.

Контрольні варіанти обох досліджуваних сортів продемонстрували стабільну тенденцію до скорочення довжини гіпокотила, що у свіжозібраному стані становило 33 мм для червонозерного та 36 мм для зеленозерного морфотипів. Протягом перших двох років зберігання зниження показників у контролі відбувалося поступово – на 5 мм у обох сортів, що свідчить про збереження високого адаптивного потенціалу на початкових етапах експозиції. Суттєвий перелом у життєздатності зафіксовано після третього року зберігання, коли довжина гіпокотила контрольної фракції зеленозерної сочевиці впала до 27 мм, а червонозерної – до 24 мм, що перевищує поріг істотної різниці (НІР В = 2,0 мм). На четвертий рік зберігання зафіксовано подальше пригнічення росту: контрольний зразок червонозерного морфотипу продемонстрував зниження до 21 мм, тоді як зеленозерний зберіг вищий показник на рівні 23 мм. До кінця п'ятого року експерименту довжина гіпокотила в контрольних варіантах досягла мінімальних значень – 17 мм ('Даринка') та 20 мм ('СНІМ 18'), що підтверджує загальну деградацію посівних якостей на 44–48% від вихідного рівня.

Встановлена взаємодія факторів із показником НІР 3,6 мм дозволяє стверджувати, що велика фракція зеленозерної сочевиці виявляє найвищу фізіологічну стійкість, зберігаючи після п'яти років довжину гіпокотила на рівні 22 мм. Це перевищує показники дрібної фракції червонозерного морфотипу вже на четвертий рік зберігання, що обґрунтовує доцільність використання саме великих фракцій зеленозерної сочевиці для тривалих термінів закладання на зберігання (табл. 2).

Отримані результати свідчать про те, що зеленозерний морфотип має вищий потенціал формування вегетативної маси порівняно з червонозерним. Так, середня маса проростка великої фракції свіжозібраної зеленозерної сочевиці склала 0,195 г, що на 0,013 г перевищує показник червонозерну. Зважаючи на значення НІР для фактора А на рівні 0,005 г, встановлена перевага є статистично достовірною і обумовлена вихідним вищим вмістом білка та енергозабезпеченістю зародка.

Фракційний склад насіння виявився визначальним фактором впливу на вагу проростків, оскільки маса сім'ядолей безпосередньо лімітує кількість поживних речовин, доступних для росту. У всіх варіантах досліду спостерігалось послідовне зниження маси проростка при зменшенні розміру насіння: різниця між крайніми фракціями (понад 5,0 мм та 3,0–4,0 мм) становила 0,028–0,031 г, що суттєво перевищує показник НІР для фактора С (0,004 г).

Таблиця 2. Довжина гіпокотила сочевиці залежно від тривалості зберігання, мм

Фракція, мм (С)	Тривалість зберігання, роки (В)					
	Свіжозібране	1 рік	2 роки	3 роки	4 роки	5 років
Червонозерна (А)						
> 5,0	36	34	31	27	23	19
4,0–5,0	33 (К)	31	28	24	21	17
3,0–4,0	29	27	24	20	17	14
Зеленозерна (А)						
> 5,0	39	37	34	30	26	22
4,0–5,0	36 (К)	34	31	27	23	20
3,0–4,0	32	30	27	23	20	16
НІР _{0,05}				2,4		
Фактор А				1,5		
Фактор В				2,0		
Фактор С				1,3		
Фактор АВС				3,6		

Варто вказати, що тривале зберігання насіння супроводжується інтенсивним зниженням маси сформованих проростків, що є наслідком біохімічного старіння та нераціональних витрат сухих речовин на дихання.

Найбільш стрімке падіння показника зафіксовано після третього року зберігання. На п'ятий рік експозиції маса проростка дрібної фракції червонозерної сочевиці знизилася до мінімального значення 0,095 г, що вказує на критичне ослаблення фізіологічної сили насіння. Аналіз взаємодії факторів із НІР 0,012 г дозволяє стверджувати, що велика фракція зеленозерного морфотипу навіть за умов п'ятирічного зберігання здатна формувати проростки масою 0,129 г.

У контрольному варіанті відзначено, що свіжозібране насіння зеленозерного морфотипу сформувало проростки масою 0,182 г, що на 0,013 г перевищує показник червонозерної сочевиці (0,169 г), підтверджуючи вищу вихідну енергозабезпеченість зародка першого сорту. Упродовж п'ятирічного зберігання маса проростків у контролі стабільно знижувалася, досягнувши на фінальному етапі значень 0,119 г для зеленозерної та 0,108 г для червонозерної сочевиці, що свідчить про суттєві втрати сухої речовини на дихання (табл. 3).

Таблиця 3. Маса одного проростка сочевиці залежно від досліджуваних чинників, г

Фракція, мм (С)	Тривалість зберігання, роки (В)					
	Свіжозібране	1 рік	2 роки	3 роки	4 роки	5 років
Червонозерна (А)						
> 5,0	0,182	0,175	0,166	0,151	0,134	0,118
4,0–5,0	0,169 (К)	0,162	0,153	0,139	0,123	0,108
3,0–4,0	0,154	0,147	0,138	0,124	0,110	0,095
Зеленозерна (А)						
> 5,0	0,195	0,188	0,178	0,163	0,147	0,129
4,0–5,0	0,182 (К)	0,175	0,166	0,151	0,136	0,119
3,0–4,0	0,166	0,159	0,149	0,135	0,120	0,104
НІР _{0,05}				0,009		
Фактор А				0,005		
Фактор В				0,007		
Фактор С				0,004		
Фактор АВС				0,012		

Таким чином, даний показник є вищим за масу проростків дрібної фракції червонозерної сочевиці вже на третій-четвертий рік їх зберігання, що підтверджує стратегічну перевагу використання крупнозернистих зеленозерних морфотипів для забезпечення стабільної якості сировини при тривалих термінах зберігання.

Результати досліджень вказують, що співвідношення маси корінця до маси пагона, виступає інтегральним показником адаптивної здатності проростків сочевиці на початкових етапах розвитку.

Результати досліджень засвідчують, що свіжозібране насіння характеризується найбільш оптимальним балансом вегетативних органів з переважанням підземної біомаси, що відображається у значеннях індексу від 0,76 до 0,85. Найвищі значення зафіксовано у зеленозерного морфотипу великої фракції, де індекс становив 0,85, що на 0,03 перевищує показник червонозерну. Зважаючи на НІР для фактора А на рівні 0,02, встановлена різниця підтверджує генетичну перевагу зеленозерної сочевиці у формуванні потужнішого коріння.

Дослідження вказують, що важливим чинником варіабельності індексу виявився фракційний склад насіння. Встановлено стабільну тенденцію до зниження частки кореневої системи при зменшенні розміру насінин (НІР С = 0,02).

Фракції сочевиці (3,0–4,0 мм) демонструють нижчу частку коріння у загальній біомасі проростка, що робить такі зразки потенційно вразливими до дефіциту вологи в польових умовах.

Експериментально підтверджено, що процес тривалого зберігання спричиняє значний дисбаланс у розвитку органів проростка (НІР В = 0,03). За п'ять років зберігання було відзначено зниження індексу у всіх варіантах досліду, що вказує на випереджаючу деградацію потенціалу росту кореневої системи порівняно з пагоном (табл. 4).

Таблиця 4. Співвідношення маси корінця до маси пагона (індекс кореневої системи)

Фракція, мм (С)	Тривалість зберігання, роки (В)					
	Свіжозібране	1 рік	2 роки	3 роки	4 роки	5 років
Червонозерна (А)						
> 5,0	0,82	0,80	0,78	0,75	0,71	0,66
4,0–5,0	0,80 (К)	0,78	0,76	0,72	0,69	0,64
3,0–4,0	0,76	0,74	0,71	0,67	0,63	0,58
Зеленозерна (А)						
> 5,0	0,85	0,83	0,81	0,78	0,74	0,69
4,0–5,0	0,83 (К)	0,81	0,79	0,75	0,72	0,67
3,0–4,0	0,79	0,77	0,74	0,70	0,66	0,61
НІР _{0,05}				0,04		
Фактор А				0,02		
Фактор В				0,03		
Фактор С				0,02		
Фактор АВС				0,06		

Варто вказати, що на п'ятий рік зберігання індекс дрібної фракції червонозерної сочевиці зменшився до критичної позначки 0,58.

Аналіз взаємодії факторів із НІР_{0,05} дозволяє зробити висновок, що велика фракція зеленозерної сочевиці навіть після п'яти років зберігання зберігає індекс на рівні 0,69, що є співмірним із показниками дрібної фракції на третій рік зберігання. Це підкреслює високу життєздатність великих фракцій зеленозерного морфотипу та їхню здатність підтримувати функціональну рівновагу проростка при старінні насіння.

Статистична оцінка біометричних параметрів проростків сочевиці свідчить про те, що лінійні показники, такі як довжина кореня (22,4%) та гіпокотилія (24,7%), характеризуються значною мінливістю, що відображає неоднорідність процесів фізіологічного старіння в межах досліджуваних партій. Водночас індекс кореневої системи демонструє найнижчу варіабельність (9,8%), що вказує на відносну стабільність морфогенетичних кореляцій проростка навіть за умов суттєвого пригнічення загальної енергії росту.

Встановлено, що найбільш чутливим до старіння є гіпокотиль, індекс деградації якого склав 45,6%, що свідчить про стрімку втрату насінням здатності до формування надземних органів.

Довжина кореня за цей же період скоротилася на 41,9%. Менш виражена, але статистично достовірна депресія, зафіксована для загальної маси проростка (33,8%) та індексу кореневої системи (19,7%).

Отримані результати підтверджують високий рівень достовірності ($p < 0,05$) усіх виявлених змін. Це дозволяє стверджувати, що біометричні показники проростків є надійними індикаторами для прогнозування технологічної та посівної придатності сочевиці.

Найбільш інтегральним показником деградації слід вважати масу проростка, яка узагальнює кількісні втрати біомаси, тоді як індекс кореневої системи найточніше відображає якісний дисбаланс у розвитку органів, що виникає внаслідок виснаження енергетичного ресурсу насінини (табл. 5).

Таблиця 5. Статистична оцінка біометричних показників проростків сочевиці

Показник	Середнє значення (X)	Коефіцієнт варіації (V, %)	Індекс деградації (ID, %) за 5 років	Статус достовірності ($p < 0,05$)
Довжина кореня, мм	45,2	22,4	41,9	достовірно
Довжина гіпокотіля, мм	27,8	24,7	45,6	достовірно
Маса проростка, г	0,151	19,3	33,8	достовірно
Індекс кореневої системи	0,74	9,8	19,7	достовірно

Аналіз фізіолого-біометричних показників насіння сочевиці свідчить про поступове зниження його посівних якостей із збільшенням тривалості зберігання. Енергія проростання та лабораторна схожість демонструють значне зниження, в дрібних фракціях і після 4–5 років зберігання, що підтверджує високий індекс деградації (ID до 24 і 17% відповідно).

Щільність насіння залишалася відносно стабільною (ID \approx 3–4 %), тоді як морфологічні показники проростків – довжина кореня та гіпокотіля, маса проростка – зменшувалися більш інтенсивно (ID 34–46%), що вказує на пригнічення ростових процесів унаслідок старіння.

Співвідношення маси корінця до пагона (індекс кореневої системи) знижувалося менше, що свідчить про відносну стабільність будови проростка навіть при загальному пригніченні росту. Зеленозерна форма та фракції насіння до 4,0 мм демонстрували вищу стійкість до старіння, тоді як фракції менше 4,0 мм більш чутливі.

Статистична обробка даних підтвердила достовірність усіх спостережуваних ефектів ($p < 0,05$), а коефіцієнти варіації (V) показали, що найстабільнішим параметром є індекс кореневої системи, а найбільш мінливим – лінійні параметри проростків. Таким чином, отримані результати дозволяють зробити висновок про чітку закономірність фізіологічного старіння насіння та його вплив на стартові ростові характеристики проростків сочевиці.

Висновки

Найвищим ростовим потенціалом відзначається велика фракцію (> 5,0 мм) зеленозерного морфотипу, довжина кореня якої у свіжозібраному стані сягає 62 мм, що на 6,9% перевищує показники червонозерного аналога.

Тривале зберігання (5 років) спричиняє глибоку депресію біометричних параметрів, найбільш виражену у дрібній фракції (3,0–4,0 мм) червонозерної сочевиці, де довжина кореня скорочується на 45,8% (з 48 до 26 мм), а маса проростка знижується до мінімальних 0,095 г. Статистично підтверджено, що інтенсивна деградація ростових функцій розпочинається після третього року експозиції з щорічним падінням показників на 5–6 мм.

Найбільш чутливим до часового чинника є гіпокотиль (індекс деградації 45,6%), тоді як коренева система виявляє вищу стабільність (ID 41,9%). Найменш мінливим показником визначено індекс кореневої системи (V = 9,8%), що свідчить про збереження базових морфогенетичних кореляцій навіть при загальному пригніченні життєздатності.

Обґрунтовано доцільність відбору великої фракції (> 5,0 мм) зеленезерних морфотипів для формування страхових фондів. Велике насіння після п'яти років зберігання за біометричними параметрами (корінь 38 мм, гіпокотиль 22 мм) переважає свіжозібране насіння дрібної фракції на 2–3-й рік зберігання, що гарантує вищу технологічну надійність посівного матеріалу.

Список використаних джерел

1. Orikhivskiy, V. D., Sichkar, V. I., Ovsiannikova, L. K., & Solomonov, R. V. (2017). Lentils as a source of vegetable protein. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 17(4), 22–29. [In Ukrainian]
2. Li, M., Xia, M., Imran, A., de Souza, T. S. P., Barrow, C., Dunshea, F., & Suleria, H. A. R. (2024). Nutritional value, phytochemical potential, and biological activities in lentils (*Lens culinaris* Medik.): A review. *Food Reviews International*, 40(7), 2024–2054. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2245073>
3. Prysiazniuk, O. I., Topchii, O. V., Slobodianuk, S. V., Karpuk, L. M., Maliarenko, O. A., Pavlichenko, A. A., & Svystunova, I. V. (2020). *Lentils: Biology and cultivation*. TVORY. <https://doi.org/10.47414/978-966-949-472-6> [In Ukrainian]
4. Danylchenko, O. M., Butenko, A. O., & Radchenko, M. V. (2020). Lentil productivity depending on seed inoculation and mineral nutrition in the conditions of the north-eastern forest steppe of Ukraine. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*, 2, 19–22. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2020-2-19-22> [In Ukrainian]
5. Bhattarai, B., Walker, C. K., Wallace, A. J., Nuttall, J. G., Hepworth, G., Panozzo, J. F., & Fitzgerald, G. J. (2023). Storage temperature and grain moisture effects on market and end use properties of red lentil. *Agronomy*, 13(9), Article 2261. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092261>
6. Bilonozhko, V. Ya., & Poltoretska, N. M. (2017). Viability and vitality of buckwheat seeds depending on the genetic potential of the variety, formation conditions and storage period. In *Proceedings of the VI International Scientific Conference "Breeding and Genetic Science and Education"* (pp. 39–44). Uman. [In Ukrainian]
7. Kameswara Rao, N., Dulloo, M. E., & Engels, J. M. M. (2017). A review of factors that influence the production of quality seed for long-term conservation in genebanks. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 64(5), 1061–1074. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0425-9>
8. Wambugu, P. W., Nyamongo, D. O., & Kirwa, E. C. (2023). Role of seed banks in supporting ecosystem and biodiversity conservation and restoration. *Diversity*, 15(8), 896. <https://doi.org/10.3390/d15080896>
9. Tkachuk, O. P. (2015). Seed germination energy as an ecological factor of growth intensity of perennial legume grasses in the year of sowing. *International Scientific Journal*, 9, 43–46. [In Ukrainian]
10. Borase, D. N., Nath, C. P., Hazra, K. K., Senthilkumar, M., Singh, S. S., Praharaj, C. S., & Kumar, N. (2020). Long-term impact of diversified crop rotations and nutrient management practices on soil microbial functions and soil enzymes activity. *Ecological Indicators*, 114, Article 106322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106322>
11. Bahan, A. V., Shakalii, S. M., Yurchenko, S. O., & Chetveryk, O. O. (2023). Formation of sowing qualities of legume and cereal crop seeds. *Agrarian Innovations*, 19, 7–11. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.1> [In Ukrainian]
12. Karpenko, V. P., Novikova, T. P., & Prytuliak, R. M. (2018). Formation of the symbiotic apparatus of lentils under the action of biological preparations. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*, 2, 39–43. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2018-21-39-43> [In Ukrainian]
13. Ovsiannikova, L. K., Valevska, L. O., Orlova, S. S., Orikhivskiy, V. D., & Mamatov, M. O. (2018). Nutritional value and consumer properties of small-seeded leguminous crops. *Web of Scholar*, 2(1), 7–9. [In Ukrainian]
14. Aryee, A. N., & Boye, J. I. (2017). Comparative study of the effects of processing on the nutritional, physicochemical and functional properties of lentil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1), Article e12824. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12824>
15. Mazur, V. A., Honcharuk, I. V., Didur, I. M., Pantsyreva, H. V., Telekalo, N. V., & Kupchuk, I. M. (2021). *Innovative aspects of technologies for cultivation, storage and processing of leguminous crops*. TVORY. [In Ukrainian]
16. Bitarafan, Z., & Andreasen, C. (2020). Seed retention of ten common weed species at oat harvest reveals the potential for harvest weed seed control. *Weed Research*, 60(5), 343–352. <https://doi.org/10.1111/wre.12438>
17. Linnik, Yu. O., Zhmurko, V. V., & Bohuslavskiy, R. L. (2011). Influence of aging factors and negative temperatures on total amylase activity in barley and pea seeds. *Agrarian Bulletin of the Black Sea Region*, 57, 146–152. [In Ukrainian]

18. Yeshchenko, V. O. (Ed.). (2014). *Fundamentals of scientific research in agronomy*. TD “Edelweis i K”. [In Ukrainian]
19. Boiko, P. I., Kovalenko, N. P., Dyshlovi, V. A., & Shapoval, I. S. (2007). Methodology of programming, establishment and maintenance of multifactor stationary field experiments in agriculture. *Scientific Papers of the Institute of Sugar Beet*, 9, 35–40. [In Ukrainian]
20. Prysiashniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2> [In Ukrainian]
21. International Seed Testing Association. (2024). *International rules for seed testing* (2024 ed.). ISTA.
22. DSTU 4138-2002. (2003). *Seeds of agricultural crops. Methods for determining quality*. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. [In Ukrainian]
23. Ermantraut, E. R., Hoptsi, T. I., Kalenska, S. M., Kryvoruchenko, R. V., Turchynova, N. P., & Prysiashniuk, O. I. (2014). *Methodology of breeding experiment (in crop production)*. Kharkiv National Agrarian University named after V. V. Dokuchaiev. [In Ukrainian]

Morphometric parameters of lentil seeds depending on morphotype, fraction and storage duration

A. V. Vyshynskiy

Uman National University, 1 Instytutska St., Uman, Cherkasy region, 20305, Ukraine

Corresponding author: *Andrii Vyshynskiy*, lidiyakononenko@ukr.net

Citation: Vyshynskiy, A. V. (2026). Morphometric parameters of lentil seeds depending on morphotype, fraction and storage duration. *Bioenergy*, 1, 10–19. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp10-19>

Aim. To investigate the morphometric parameters of lentil seeds of different morphotypes, fractional composition, and storage duration, in order to provide a scientific basis for optimising the parameters of the insurance seed stock provision in the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** The study was based on a three-factor model experiment conducted in 2022–2026. The objects were food lentil morphotypes with red and green seeds. The experimental design included the study of the influence of morphotype (factor A), storage duration from 0 to 5 years (factor B), and seed fraction: I (> 5.0 mm), II (4.0–5.0 mm), III (3.0–4.0 mm) (factor C). Seed quality and biometric parameters of seedlings were determined according to DSTU 4138-2002 on the 10th day. **Results.** It was established that the large fraction (> 5.0 mm) of green-seeded lentils had the highest growth potential, with root length on the 10th day in fresh harvested seeds reaching 62 mm, which is 6.9% higher than the red-seeded lentil. Experimental data confirmed significant degradation of growth vigour during five years of storage, with the most intensive decline recorded after the third year (by 5–6 mm annually). The hypocotyl proved most vulnerable to ageing, with a degradation index of 45.6%, whereas the root system index demonstrated the highest stability ($V = 9.8\%$). By the end of the 5th year of storage, the parameters of the small fraction (3.0–4.0 mm) of red-seeded lentils decreased to a critical minimum (root length – 26 mm, mass – 0.095 g). **Conclusions.** The green-seeded morphotype and large seed fractions (> 5.0 mm) exhibit greater adaptive resilience to long-term storage. The large fraction of both lentil morphotypes retains better viability (root length 34–38 mm) even after five years of storage compared to the small fraction already after three years. This substantiates the expediency of using large seeds of green-seeded varieties for formation of long-term insurance seed stock and preserving high biological potential of the crop.

Keywords: seedlings; germination; length; mass; root system.






ORCID

Андрій Вишинський / Andrii Vyshynskiy

<https://orcid.org/0009-0008-0129-4430>

УДК 633.282:620.952

Сезонна динаміка росту *Miscanthus × giganteus* в умовах Західного Лісостепу

Ю. І. Гайда^{1, 2} , Я. Д. Фучило^{3*} , В. Я. Брич² ,
А. М. Шувар² , Т. М. Грохольська² 

¹Національний університет «Чернігівська політехніка», вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14030, Україна

²Західноукраїнський національний університет, вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, 46009, Україна

³Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна

*Автор для листування: Ярослав Фучило, fuchylo_yar@ukr.net

Цитування: Гайда Ю. І., Фучило Я. Д., Брич В. Я., Шувар А. М., Грохольська Т. М. Сезонна динаміка росту *Miscanthus × giganteus* в умовах Західного Лісостепу. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 20–31. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp20-31>

Мета. Вивчити особливості сезонної динаміки росту міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) на різних етапах становлення плантації (перший рік вирощування і третій рік вегетації) в умовах Західного Лісостепу України. **Методи.** Дослідження проведено на експериментально-демонстраційній плантації у дослідному господарстві Західноукраїнського національного університету. Спостереження включали моніторинг висоти пагонів міскантусу на одно- та трирічній плантації. На кожній ділянці відібрано 20 модельних куртин (рослинних груп із однієї висадженої ризоми). Висоту пагонів у кожній куртині вимірювали регулярно (8 контрольних дат з кінця травня до кінця вересня) з точністю до 1 см. За результатами вимірювань проаналізовано динаміку середньої висоти пагонів та приростів висоти протягом вегетаційного періоду. **Результати.** На однорічній плантації міскантусу виявлено три фази росту пагонів: інтенсивне наростання навесні – на початку літа, середньолітнє уповільнення росту внаслідок недостатності опадів та відновлення росту наприкінці літа – восени. Середня висота пагонів зростає від 10,7 см наприкінці травня до 87,2 см наприкінці вересня (більш ніж у 8 разів). У червні висота швидко досягла 45–60 см, після чого в липні спостерігалось «плато» росту – темпи збільшення висоти різко знизилися, а в окремих куртинах відзначено поживтіння й загибель пагонів. У кінці липня в більшості рослин ростові процеси поновилися, і висота пагонів досягла максимальних значень у вересні (до 1,2–1,3 м у найрозвиненіших куртинах). При цьому між індивідуальними рослинами зафіксовано високу варіабельність: частина молодих ризом не змогла підтримувати ріст під час стресового середньолітнього періоду, що спричинило істотну варіабельність висот (від 0 до 125 см). На трирічній плантації міскантусу формування надземної маси відбувалося більш рівномірно. Ріст пагонів починався раніше (вже у травні висота сягала 25–60 см), інтенсивно продовжувався до початку липня (до 110–150 см), після чого поступово сповільнювався. Впродовж липня – вересня прирости висоти залишалися додатними без різких провалів, а максимальна висота пагонів на кінець сезону склала 160–190 см. Криві індивідуального росту на старшій плантації були монотонно зростаючими, без епізодів втрати листя чи пагонів, що вказує на кращу стійкість укорінених рослин до короткочасної засухи. Величини середньодобових поточних приростів на третьому році вегетації досягали піку наприкінці червня (30–35 см за інтервал між вимірами) і різко знижувалися в липні; на початку серпня відзначена коротка друга хвиля помірних приростів (11–15 см), після чого ріст згасав до нуля з настанням осені. На відміну від молодшої плантації, де спостерігалася значна мозаїчність розвитку, у зрілих куртинах висота наприкінці сезону вирівнялася, а відмінності між рослинами зменшилися. **Висновки.** Сезонна динаміка росту *M. × giganteus* суттєво залежить від віку насадження. На першому році вирощування спостерігається нерівномірний ріст із

Одержано 29.12.2025 • Погоджено 24.02.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

середньолітнім призупиненням та частковою втратою біомаси під час періоду з високими температурами і недостатніми опадами, тоді як на третьому році розвитку рослини демонструють більш ранній старт, стабільний ростовий хід без значного пригнічення влітку і значно більшу кінцеву висоту пагонів. Отримані дані підкреслюють важливість урахування вікових особливостей росту та реакції на кліматичні стреси при оцінюванні продуктивності і доборі високопродуктивних генотипів міскантусу для умов Західного Лісостепу.

Ключові слова: міскантус гігантський; приріст за висотою; вікові особливості росту; реакція на кліматичні стреси.

Вступ

Miscanthus × giganteus (міскантус гігантський) розглядається як перспективна біоенергетична культура завдяки здатності забезпечувати високий вихід біомаси у помірному кліматі [1, 3]. Залежно від умов вирощування, річна врожайність сухої маси міскантусу може сягати 10–30 т/га [2]. Висока продуктивність цієї рослини пов'язана, зокрема, з тривалістю її вегетаційного періоду: ранній початок росту навесні та пізні відмирання восени забезпечують довше використання ресурсів і накопичення біомаси [16]. Доведено, що тривалість санору duration (періоду від встановлення повного листкового положу до початку сенесценції) є важливим чинником урожайності міскантусу. Збільшення тривалості росту може значно підвищувати річний вихід біомаси [14].

Miscanthus є багаторічником, тому його продуктивність зростає протягом перших кількох років після садіння, досягаючи повної сили на приблизно на 3–5-й рік вегетації [5]. У перші роки після вкорінення спостерігаються вікові зміни фенології: встановлено, що старші насадження починають весняну вегетацію раніше, формують більше пагонів і листкової маси, але й раніше вступають у фазу сенесценції порівняно з молодими (тобто мають коротший активний період росту). Водночас широкий генетичний діапазон у межах роду *Miscanthus* та селекційних гібридів зумовлює значну варіабельність ознак фенології та продуктивності в різних кліматичних умовах. Це створює можливості для добору форм, більш пристосованих до подовженого сезону росту чи толерантних до стресів [4].

У помірному кліматі *M. × giganteus* зазвичай виходить із стану спокою навесні після стійкого прогрівання ґрунту, швидко нарощує листкову поверхню й формує суцільний намет. Тривалість «зеленої фази» (sanoru duration), яку визначають як кількість днів між формуванням покриву (sanoru establishment) та початком сенесценції, вважається важливим детермінантом урожайності міскантусу. Дослідження тривалості зеленого покриву (вегетаційного періоду) колекції зі 244 генотипів міскантусу, виявили що врожайність біомаси позитивно корелює з тривалістю зеленого покриву. Раніше формування покриву та пізніша сенесценція також корелювали з вищою врожайністю. Водночас не всі генотипи з довгою тривалістю покриву виявилися високоврожайними [14]. Це свідчить про те, що для виявлення високоврожайних сортів для певних природно-кліматичних умов потрібно також досліджувати особливості сезонної динаміки їх росту та розвитку.

Для видів міскантусу виявлені генотипові відмінності за часом проходження фенологічних фаз. Встановлено, що рання поява пагонів, швидкість виходу в трубку, дата початку та швидкість осіннього пожовтіння сильно корелюють з обсягом накопичення сухої біомаси [8]. У перші роки вирощування міскантусу спостерігаються вікові зміни фенології: старші насадження виходять у вегетацію раніше, мають більше стебел і листків, але й раніше вступають у сенесценцію [17]. Різноманіття природного й селекційного матеріалу *Miscanthus* забезпечує широке варіювання фенологічних ознак у різних кліматах [12].

Дослідження сезонного розвитку двох видів міскантусу виявили, що в Уельсі найбільші прирости довжини стебел припадають на середину сезону, коли покрив уже сформований. Висота та діаметр стебел, а також щільність стеблостою є найкращими предикторами врожайності. Ранні генотипи із швидшим стартом і тривалішим збереженням листя зазвичай продуктивніші [15]. Для *M. sinensis* у багаторічних колекційних дослідках тривалість вегетації, висота, діаметр і маса стебла у дворічній плантації достовірно корелюють із урожаєм на 4-й рік [13]. Окрім фенологічних характеристик, важливе значення для продуктивності міскантусу мають морфологічні показники, зокрема висота та товщина стебел і густота стеблостою [15].

На сьогодні бракує інформації про те, як саме проявляються закономірності росту міскантусу на різних стадіях становлення плантації у ґрунтово-кліматичних умовах Західного Лісостепу. Таким чином, наше дослідження було спрямоване на порівняння сезонної динаміки росту пагонів *M. × giganteus* у молодому насадженні першого року вирощування та у функціонуючій багаторічній плантації (третій рік вегетації) в умовах Тернопільської області.

Метою дослідження було визначення особливостей сезонного росту й розвитку пагонів міскантусу гігантського на одно- та трирічній плантаціях, моделювання динаміки висоти пагонів протягом вегетаційного періоду та характеру росту за стресових кліматичних факторів Західного Лісостепу.

Матеріали та методи дослідження

Обміри та обліки проводилися на дослідно-демонстраційній плантації в Науково-дослідному виробничому господарстві «Наука» Західноукраїнського національного університету у 2025 році. Клімат регіону дослідження – помірно континентальний з теплим літом і відносно м'якою зимою. Середньорічні опади 520–600 мм; середня температура січня – -5°C , липня – $+19^{\circ}\text{C}$. Останніми роками в області фіксується підвищення температури влітку та взимку, що подовжує теплий період і збільшує кількість спекотних днів (рис. 1).



Рис. 1. Динаміка середніх температур повітря за даними метеостанції Тернопіль у 2025 р. [18]



Рис. 2. Динаміка опадів за даними метеостанції Тернопіль у 2025 р. [18]

Ґрунт на дослідних плантаціях – чорнозем опідзолений середньо-суглинковий, тобто типова для Західного Лісостепу ґрунтова відміна. Середина літа 2025 р. характеризувалася підвищеними температурами у червні – липні (рис. 1) та дефіцитом опадів у 2-й і 3-й декаді червня, що спричинило ґрунтову посуху в цей період. Для спостережень обрано два варіанти насаджень міскантусу – однорічна (садіння ризом *M. × giganteus* весною 2025 р.) та трирічна плантації (закладено весною 2023 р.). В обох випадках використано вегетативний садивний матеріал – фрагменти кореневищ міскантусу гігантського (ризоми).

На кожній з двох дослідних ділянок закладено по 20 облікових (модельних) куртин, кожна з яких розвивається з окремої висадженої ризоми. Куртини розташовані рівномірно, догляд за плантацією стандартний (міжрядний обробіток, без зрошення). Впродовж вегетаційного сезону здійснювали періодичні вимірювання висоти пагонів у кожній куртині. Висоту визначали як середню висоту надземної частини рослини (листочкостебловий «пучок» пагонів) – для цього рулеткою заміряли висоту найбільш розвинених пагонів куртини та обчислювали середнє значення, округлене до 1 см. Спостереження проводилися приблизно кожні два-три тижні, загалом вісім разів у період з кінця травня до кінця вересня. Отримані дані використано для побудови динамічних рядів росту висоти (у середньому по куртинах) та аналізу приростів висоти між послідовними термінами спостережень.

Статистична обробка даних включала розрахунок середніх значень, діапазонів варіювання та апроксимацію трендів росту методом найменших квадратів (регресійний аналіз).

Результати дослідження

На рисунку 3 представлено графіки, які відображають зміни середніх висот пагонів у модельних куртинах на однорічній плантації.

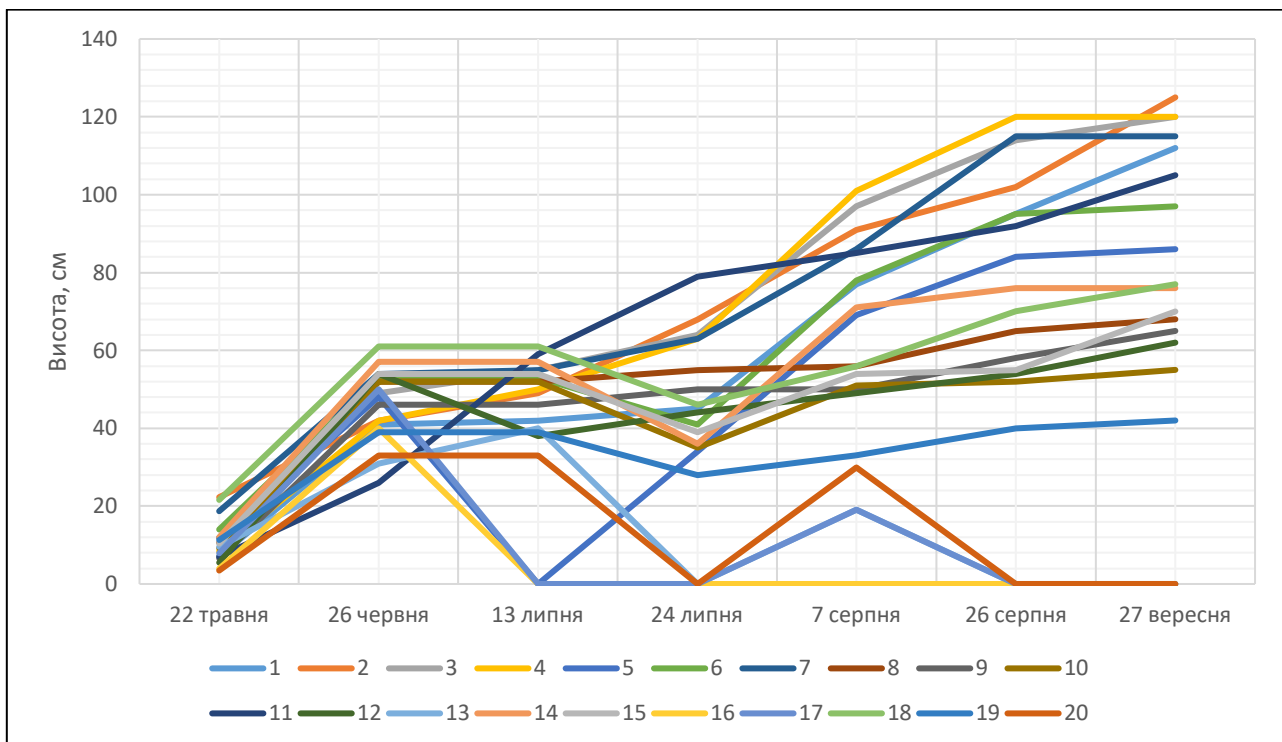


Рис. 3. Сезонна динаміка росту пагонів у висоту в облікових куртинах міскантусу на однорічній плантації

Сезонна динаміка росту пагонів міскантусу за даними 20 модельних куртин демонструє різко виражену гетерогенність темпів і траєкторій. Початковий етап (22 травня – 26 червня) характеризується інтенсивним наростанням вегетативної маси більшості екземплярів із виходом висоти пагонів на проміжне плато (45–60 см) наприкінці червня. У липні спостерігалось суттєве розшарування: у частині куртин зберігалось помірне зростання, проте у низки екземп-

лярів фіксувалися епізоди пожовтіння й часткового або повного всихання листя, що обумовило різкі провали показника висоти на початку – середині липня. Окремі куртини (13, 16, 17, 20), випустивши навесні пагони, втратили їх у липні та надалі не відновили вегетацію (фактична стабілізація висоти на нульових або близьких до нуля значеннях). Після 24 липня в більшості варіантів спостерігається повторна активація росту: значна частка ризом демонструвала відновлення й кумулятивне збільшення довжини пагонів у серпні – вересні, з досягненням максимальних сезонних значень наприкінці вегетації. Разом із тим, вищезгадана група куртин зберегла стійко низькі або нульові траєкторії росту.

Загалом конфігурація кривих росту пагонів у модельних куртинах свідчить про поєднання типових для міскантусу фаз інтенсивного весняно-літнього розвитку з середньолітнім стресовим вікном, обумовленим екстремальними температурами червня – липня і дефіцитом вологи у другій-третій декадах червня, яке стало причиною часткової ймовірної сенесценції пагонів і тимчасових або незворотних втрат надземної маси, тоді як компенсаторне відновлення у значній частині ризом забезпечило інтенсифікацію росту їх пагонів до кінця сезону. Діапазон варіювання показника висоти рослин за сезон розширюється від 10–30 см на початку до 0–125 см у вересні, що вказує на збільшення індивідуальної мінливості. Таке розмаїття індивідуальних траєкторій підкреслює важливість урахування мікроекологічних градієнтів і внутрішньопопуляційної варіабельності при оцінюванні успішності укорінення та продуктивності плантацій міскантуса.

Сезонна траєкторія середньої висоти пагонів міскантусу відображає ту ж триетапну динаміку, яку засвідчив ріст пагонів у окремих куртинах – інтенсивний старт, середньолітнє «вікно» стагнації та компенсаторне відновлення росту наприкінці сезону (рис. 4).

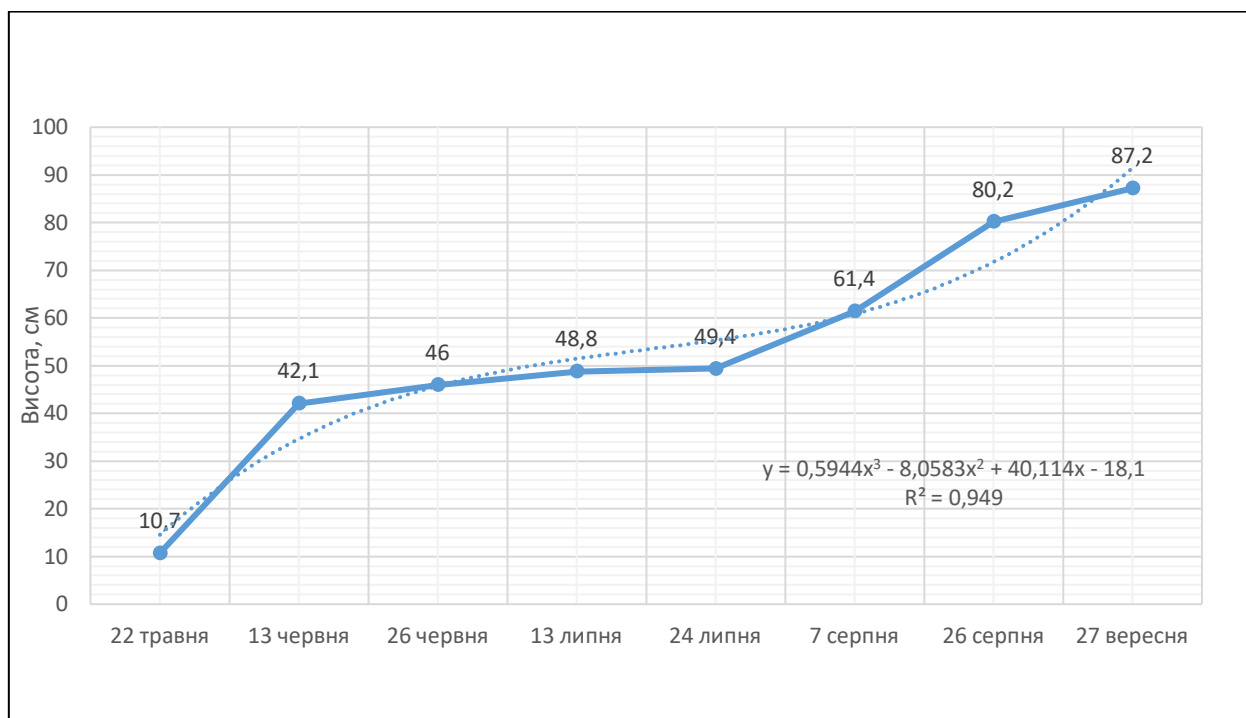


Рис. 4. Сезонна динаміка середніх висот пагонів на однорічній плантації міскантусу

Від 22 травня до 13 червня середня висота пагонів зростає з 10,7 до 42,1 см (на 31,4 см), після чого темп різко знизився 26 червня – 46,0 см (лише на 3,9 см), 13 липня – 48,8 см (лише на 2,8 см), 24 липня – 49,4 см (лише на 0,6 см). Це плато узгоджується з попередніми спостереженнями щодо пожовтіння та всихання частини пагонів у кінці червня – на початку липня й повної втрати надземної маси в окремих куртинах, що тимчасово зменшило внесок цих рослин у приріст біомаси на плантації. Після 24 липня (внаслідок поповнення запасів вологи ґрунту після інтенсивних опадів) фіксується відновлення росту: 7 серпня – 61,4 см (приріст 12,0 см), 26 серпня – 80,2 см (приріст 18,8 см), 27 вересня – 87,2 см (приріст 7,0 см). Загалом за період

спостережень середня висота зросла приблизно у 8 разів (з 10,7 до 87,2 см). Криволінійна апроксимація поліномом третього ступеня добре описує нелінійну сезонну криву з виразним літнім «плато» ($R^2 = 0,949$), що відображає сумарний ефект індивідуальних реакцій на стресові фактори і подальшого компенсаторного розвитку більшості екземплярів, виявлених в індивідуальних рядах куртин (див. рис. 4).

На рисунку 5 проілюстрована зміна середніх висот пагонів у модельних куртинах на трирічній плантації міскантуса.

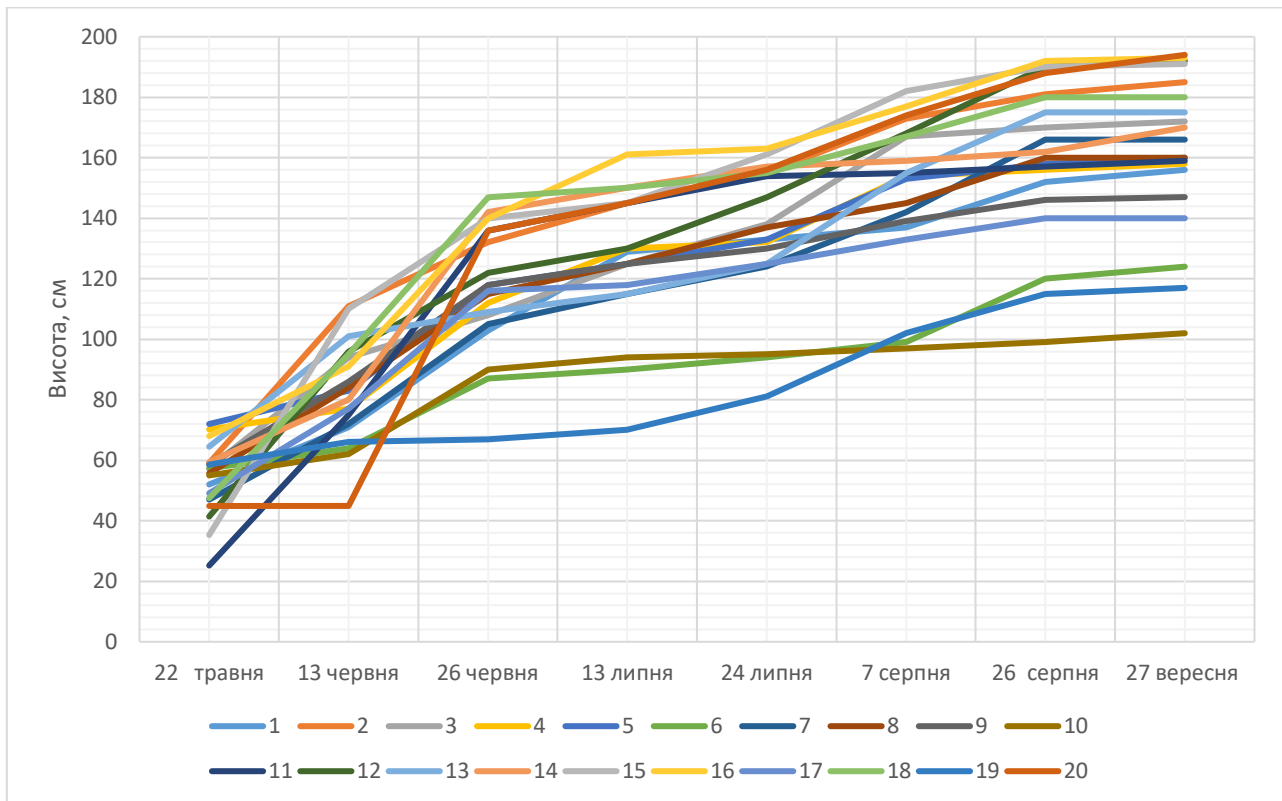


Рис. 5. Сезонна динаміка росту пагонів у висоту в облікових куртинах міскантуса на трирічній плантації

На трирічній плантації (рис. 5) висота пагонів міскантуса в кінці травня становила переважно 25–60 см і вже до кінця червня – початку липня у більшості куртин досягнула висоти близько 110–150 см, після чого приріст уповільнився, але залишився додатним до вересня, коли висоти вирівнялися на рівні приблизно 160–190 см. Траєкторії росту при цьому майже всюди монотонні, без різких падінь, що свідчить про стабільний ріст за рахунок сформованої кореневої системи. На однорічній плантації (див. рис. 3) фаза активного нарощування біомаси була більш розтягнута, а динаміка помітно варіабельніша – у середині літа на частині куртин спостерігалися «провали» у траєкторії або тимчасові зменшення висоти, після чого криві знову зростали. Таким чином, у старшій плантації ріст починається раніше, відбувається рівномірніше і завершується вищими підсумковими висотами з помітною конвергенцією між куртинами, тоді як у молодій – ріст пізніший, «зубчастий» і менш однорідний, із нижчими сезонними максимумами та довшим збереженням відмінностей між окремими рослинами.

На рисунку 6 відображено сезонну динаміку приростів пагонів у висоту в облікових куртинах міскантуса на третій рік вегетації. Загальний хід кривих свідчить про різко виражену хвилю інтенсивного росту з максимумом наприкінці червня та подальше швидке згасання до середини липня. Уже 13 червня у більшості куртин зафіксовано помітні прирости, що переважно знаходилися у межах від низьких до середніх значень, але для окремих екземплярів спостерігаються високі піки. Кульмінація припадає на 26 червня – саме в цей момент більшість кривих досягає найбільших значень, а індивідуальна мінливість максимальна – поряд із

численними приростами середнього рівня трапляються поодинокі «сплески» понад середні, включно з одиничними екстремумами.

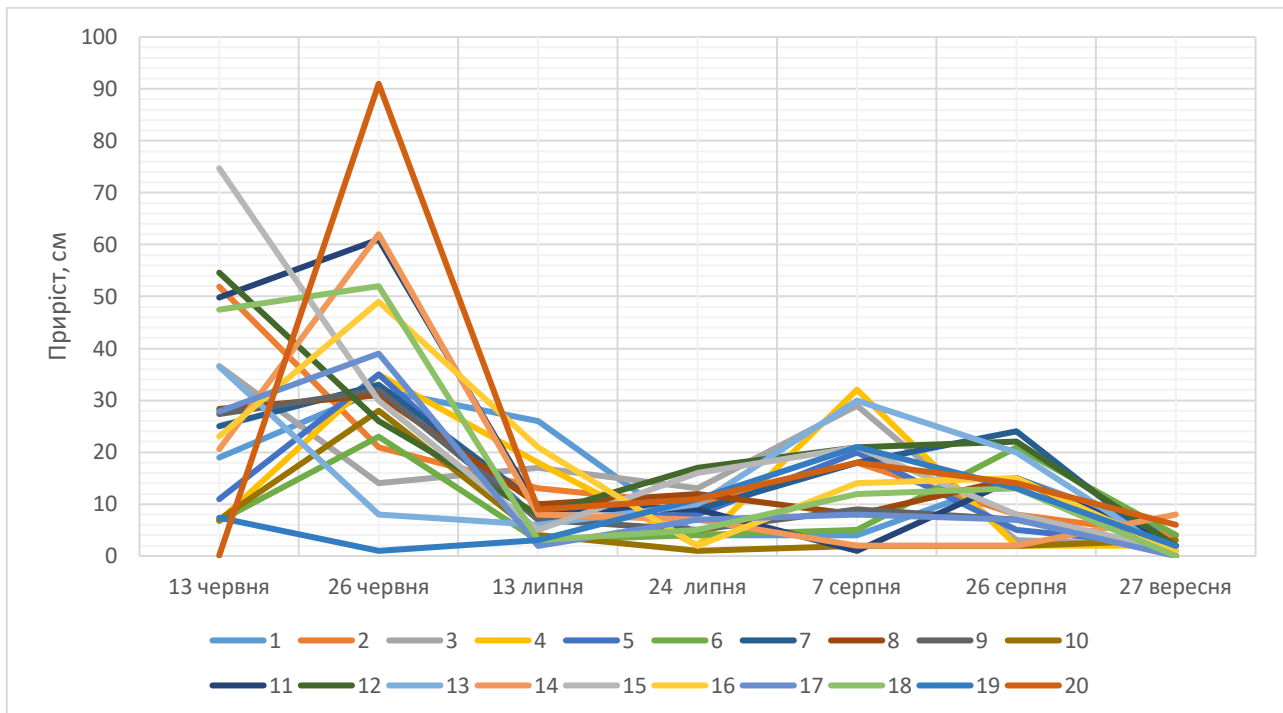


Рис. 6. Динаміка приростів пагонів у висоту в облікових куртинах міскантусу впродовж вегетаційного періоду на трирічній плантації

Уже до 13 липня величини приростів різко зменшуються й наближаються до невеликих, а потім криві конвергують, що вказує на синхронне уповільнення ростових процесів на плантації. У другій половині літа характерна короткочасна «вторинна» хвиля – у кінці липня – на початку серпня у частині облікових куртин спостерігається тимчасове підвищення інтенсивності росту до помірних значень, тоді як інші зберігають низькі прирости. Цей імпульс швидко згасає, і станом на кінець серпня більшість показників знову невеликі. До кінця вересня величини приростів майже для всіх екземплярів знижуються до мінімальних або близьких до нуля значень, що відповідає завершенню активної вегетації. Таким чином, третій рік розвитку характеризується короткою, але потужною хвилею інтенсивного видовження росту пагонів наприкінці червня, різкою вираженою депресією в липні та нетривалим серпневим приростом на тлі загального згасання росту до осені. Індивідуальна варіабельність приростів висока під час піків і зменшується наприкінці сезону.

Рисунок 7 ілюструє сезонний тренд середньої висоти пагонів міскантусу на третій рік вегетації. Крива має виразний висхідний характер зі спадним темпом – після швидкого початкового підйому навесні темпи приросту зменшуються в літні місяці, а наприкінці сезону висота майже стабілізується. Цей тренд добре описує логарифмічна функція $y = 53,927 \ln(x) + 51,667$ з дуже високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9881$, що відображає майже монотонну, але таку, що сповільнюється, траєкторію росту.

Як бачимо з рисунку 8, максимальні середні прирости пагонів у висоту фіксуються в першій половині літа: 13 червня приблизно 28 см і 26 червня близько 35 см (це період найкрутішого сегменту кривої на рис. 7). Після піку приростів спостерігається різке згасання (13 липня – 9 см і 24 липня – 8 см), що відповідає помітному вирівнюванню кривої росту за висотою.

На початку серпня простежується короткочасна «вторинна хвиля» інтенсивності приростів (7 серпня – 15 см, 26 серпня – 11 см), яка пов'язана з сприятливими погодними умовами (опад / температура). Наприкінці вересня прирости були мінімальними (до 2 см), що ілюструє завершення активної вегетації та майже горизонтальну ділянку кривої висоти.

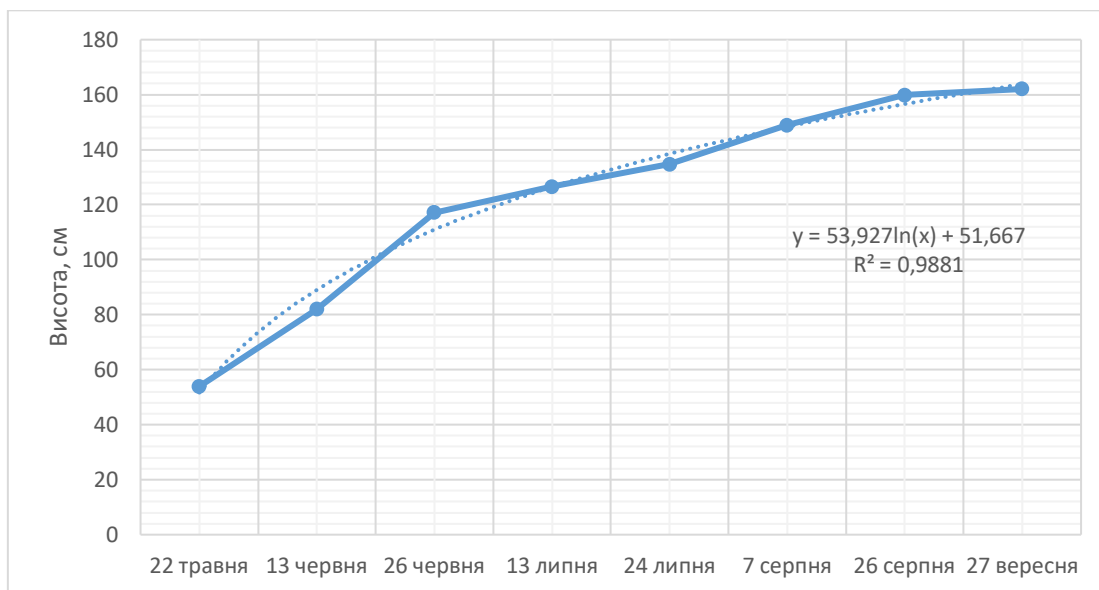


Рис. 7. Динаміка середньої висоти пагонів на трирічній плантації міскантусу

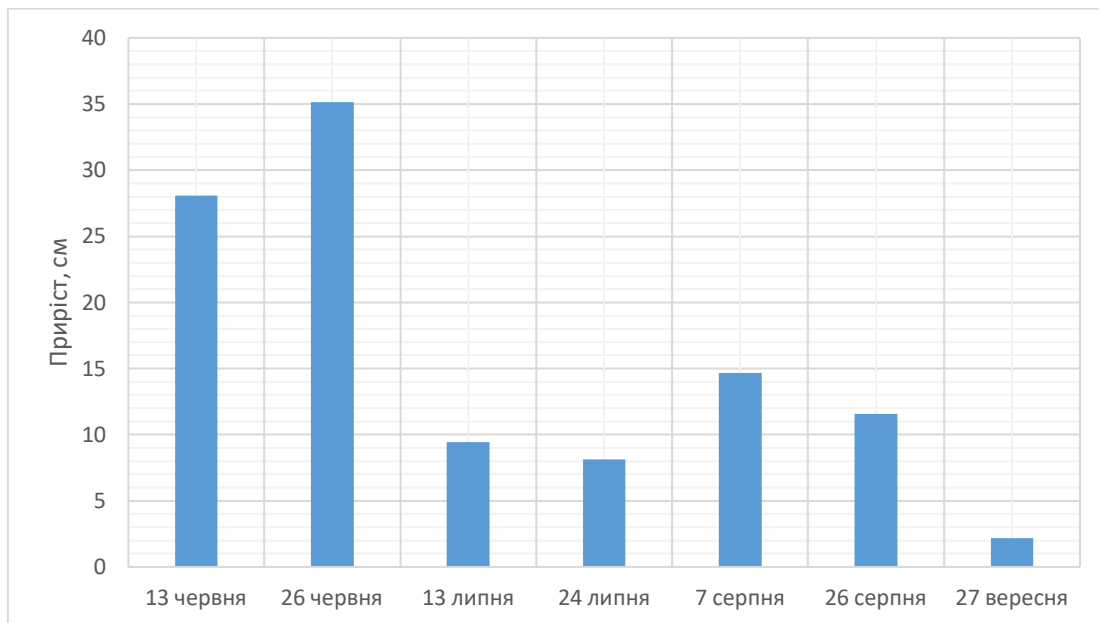


Рис. 8. Динаміка середнього приросту пагонів міскантусу за висотою на трирічній плантації

Таким чином, рисунки 7 і 8 узгоджено демонструють наступний сценарій вегетаційної динаміки росту міскантусу на трирічній плантації: швидкий старт і пікові темпи росту до кінця червня формують основну частину сезонного приросту біомаси, далі – тривала фаза сповільнення з коротким серпневим імпульсом і вихід на плато восени. Логарифмічний тренд середньої висоти відображає накопичувальний характер росту, а профіль поточних приростів визначає часові періоди максимальної та вторинної активності приростів, які й визначають форму кривої висот пагонів міскантусу.

Порівнюючи дві дослідні плантації, можна зробити висновок, що на третій рік розвитку *M. × giganteus* реалізує свій потенціал росту значно повніше, ніж у перший. Рослини старшого віку розпочинають свій ріст раніше навесні, досягають значно більшої абсолютної висоти стебел і роблять це більш рівномірно. Молоді ж рослини потребують більше часу для розгортання листової поверхні, їхній активний ріст починається пізніше і триває довше (розтягується на все літо та осінь), причому під впливом стресових чинників можливі зворотні процеси

(втрата листя, відмирання пагонів) і сильні відмінності між окремими особинами. На третій рік ці ефекти змінюються: усі куртини успішно вкорінені, сформували потужну кореневу систему й достатній запас пластичних речовин і вологи, тому навіть за несприятливих умов літа вони вегетують інтенсивніше і стабільніше. Як наслідок, кінцеві показники висоти та урожайності біомаси стають у рази більшими, ніж у рік садіння.

Отримані результати демонструють характерні відмінності у сезонній динаміці росту міскантусу гігантського залежно від віку плантації та свідчать про вплив кліматичних стресів літа на продуктивність молодих насаджень. У перший рік вирощування *M. × giganteus* в умовах Західного Лісостепу відзначено високу чутливість рослин до середньолітньої посухи – частина пагонів не витримує дефіциту вологи і гине, що призводить до тимчасового зменшення загальної біомаси надземної частини. Подібні явища раніше описувалися для міскантусу за дії екстремальних факторів – зокрема, встановлено, що за сильних літніх засух молоді рослини можуть втрачати листя і зупиняти ріст, переходячи в стан спокою до покращення умов. Наші спостереження підтверджують, що в перший рік після посадки розвиток міскантусу є нерівномірним і значною мірою залежить від погодної ситуації в ключовий період червень – липень. Відомо, що зазвичай урожай міскантусу на першому році дуже низький і комерційно не збирається [7], натомість на другий рік і далі продуктивність різко зростає, досягаючи максимальних значень приблизно на 3–4-й рік культивування [5]. Наші дані узгоджуються з цим: різниця у кінцевій висоті пагонів між одно- та трирічною плантаціями свідчить, що потенційний урожай сухої біомаси на третій рік вегетації у декілька разів перевищує показники першого року. Це пояснюється нарощуванням кореневої системи та запасу поживних речовин в кореневищах, що забезпечує інтенсивніший ріст пагонів і більшу кількість стебел у наступні роки (за сприятливих умов плантація залишається продуктивною до 20–25 років).

На трирічній плантації міскантус гігантський виявив високу стійкість до гідротермічного стресу – жодна рослина не втратила пагонів в період літньої посухи, хоча темпи росту в липні помітно знизилися. Це вказує на важливу роль розвиненої кореневої системи у підтриманні водного режиму рослин. Більш глибоке проникнення коренів та накопичення підземних резервів у старших куртинах дозволяють їм пережити посушливі періоди без критичних втрат листяного покриву. Отже, зі збільшенням віку насадження зростає і його екологічна стабільність. Відзначимо, що у третій рік спостерігалася також більша синхронність ростових процесів серед різних куртин – більшість з них досягли подібної фінальної висоти і мали схожий характер кривих росту. Натомість на першому році варіабельність між рослинами була дуже високою – деякі ризоми, імовірно, мали гірші мікроумови (гіршу забезпеченість вологою, сильнішу конкуренцію з бур'янами тощо) і тому майже не реалізували свого потенціалу росту.

З точки зору фазової структури сезонного розвитку, у трирічному насадженні проявився чіткіший однохвильовий характер росту пагонів. Максимальна інтенсивність росту припала на кінець червня – початок липня, після чого наступила затяжна фаза поступового уповільнення (з коротким незначним прискоренням на початку серпня за рахунок покращення погодних умов). Цей сценарій відповідає класичній сигмоїдній моделі росту рослин, коли початковий експоненційний підйом змінюється насиченням. У випадку міскантусу важливу роль відіграє фенологічний перехід до генеративної стадії (цвітіння) та початку сенесценції, які зазвичай настають після піку вегетативного росту [16]. Хоча в наших спостереженнях цвітіння *M. × giganteus* не було масовим (даний гібрид часто не переходить до генеративної фази в умовах помірних широт), уповільнення росту в липні можна пов'язати з досягненням рослинами певного порогу розвитку, коли приріст біомаси більше лімітований наявними ресурсами та кліматичними умовами. Цікаво, що у різних генотипів міскантусу співвідношення між швидкістю росту і тривалістю активного періоду може відрізнятися. Як показали Robson та ін. [15], форми з довшим періодом інтенсивного росту часто мають дещо меншу максимальну швидкість росту, тоді як дуже швидкозрілі форми можуть раніше вичерпувати свій ресурс і припиняти вегетацію. У контексті нашого дослідження це означає, що потенційне продовження фази активного росту міскантусу (наприклад, шляхом іригації чи селекції на пізніше відмирання) могло б підвищити загальну урожайність, але лише за умови, що рослини зберуть достатньо ресурсів для підтримання належних темпів росту. Відомо, що довший сезон росту та вищий врожай можуть супроводжуватися ризиками, зокрема вразливістю до осінніх

заморозків чи погіршення якості біомаси [16]. Тому оптимізація продуктивності міскантусу потребує збалансованого врахування обох факторів – і максимальної тривалості фотосинтезу активного періоду, і достатньо інтенсивного росту на його початку.

Загалом, результати нашого дослідження узгоджуються з наявними науковими даними щодо факторів, які визначають продуктивність *M. × giganteus*. Виявлена на однорічній плантації пауза росту й часткова втрата пагонів у відповідь на посуху висвітлює значення посухостійкості та ефективного водокористування. Селекція на ці ознаки, а також агротехнічні заходи (мульчування, полив у критичні фази) можуть суттєво підвищити успішність старту плантацій міскантусу в регіонах з ризиком літніх посух [7]. Крім того, відмінності між індивідуальними рослинами в молодому насадженні вказують на те, що для точного прогнозування врожайності важливо враховувати густоту посадки, якість садивного матеріалу та просторову неоднорідність умов на полі.

Нарешті, варто зауважити, що максимальна висота пагонів на третій рік (до 1,9 м) все ще поступається потенційним значенням для *M. × giganteus*. У літературі вказується, що у зрілих плантаціях цей гібрид може досягати 3–4 м висоти за сезон [10]. У наших дослідних умовах 2025 р. рослини не реалізували повністю такий потенціал, ймовірно через обмеження вологозабезпечення та, можливо, поступове виснаження ґрунту. Подальше нарощування врожайності на 4–5-й рік може вимагати оптимізації живлення (внесення добрив) та збереження вологи. Тим не менше, третій рік розвитку вже продемонстрував суттєве покращення продуктивності порівняно з першим роком, що підкреслює важливість багаторічної природи культури *Miscanthus* для досягнення економічно доцільних урожаїв [6].

Наші результати підтверджують наявність сильної кореляції між тривалістю активного росту (санору duration) і накопиченою біомасою, а також важливість фенологічної пристосованості сортів (раннього старту, пізньої сенесценції) для отримання високих урожаїв [8, 9, 11].

Висновки

Сезонна динаміка росту *M. × giganteus* істотно змінюється з віком насадження. На першому році вирощування ріст пагонів був нерівномірним, зі стадією середньолітнього сповільнення і часткової втрати біомаси, тоді як на третьому році рослини росли більш стабільно і досягали значно більшої кінцевої висоти без переривань росту.

Для однорічної плантації характерна трисегментна крива росту: (1) інтенсивний весняно-літнє збільшення висоти пагонів (до кінця червня), (2) «плато» або стагнація росту кінець червня – середина липня), що у деяких рослин супроводжується пожовтінням і відмиранням пагонів, (3) вторинне відростання і певне збільшення приростів у висоту наприкінці літа – восени (серпень – вересень).

На трирічній плантації спостерігається близький до сигмоїдального, характер росту. Основний приріст висоти відбувається на початку літа (травень – червень), коли міскантус швидко досягає 1,5 м. Далі ростові процеси уповільнюються рівномірно в усіх рослин, суттєвого зменшення висоти чи відмирання пагонів не зафіксовано, незважаючи на літню посуху. Тривалість активного росту вища, ніж у молодих рослин, хоча інтенсивність приростів після червня помітно нижча.

Молода плантація *M. × giganteus* виявилася дуже чутливою до несприятливих умов середини літа – спека та дефіцит ґрунтової вологи призвели до тимчасового припинення росту, а в окремих випадках – до загибелі надземних пагонів. Натомість укорінена плантація третього року показала високу толерантність до посухи – рослини зберегли листовий намет і хоч повільно, але продовжували рости протягом усього посушливого періоду. Це свідчить про значно більшу посухостійкість і стабільність продукційного процесу у старших плантаціях завдяки розвиненій кореневій системі та накопиченим ресурсам.

Фінансування досліджень

Статтю підготовлено у межах реалізації проєкту з виконання наукового дослідження і розробки 2021.01/0416 «Впровадження кліматично-нейтральних інновацій в управління аграрним природокористуванням в контексті еколого-енергетичної безпеки України» за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України.

Список використаних джерел

- Haida, Y., Fuchylo, Y., Brych, V., Haida, T., Borysiak, O., & Shuvar, A. (2024). Carbon dioxide sequestration and oxygen production in miscanthus plantations. *Economic Analysis*, 34(3), 147–161. <https://doi.org/10.35774/econa2024.03.144> [In Ukrainian]
- Heletukha, H. H., Zheliezna, T. A., & Tryboi, O. V. (2014). Prospects for cultivation and use of energy crops in Ukraine. *BAU Analytical Report No. 10*. [In Ukrainian]
- Humentyk, M. Ya., Haida, Y. I., Fuchylo, Y. D., & Hnap, I. V. (2018). Economic efficiency of investments in growing bioenergy crops in the Forest-Steppe zone of Ukraine. *Economic Analysis*, 28(2), 21–29. [In Ukrainian]
- Roik, M. V., Sinchenko, V. M., Ivashchenko, O. O., Pyrkin, V. I., Kvak, V. M., Humentyk, M. Ya., Hanzhenko, O. M., Sabluk, V. T., Hryshchenko, O. M., Fuchylo, Y. D., Honcharuk, H. S., Furman, V. A., Suslyk, L. O., Makukh, Y. P., Remeniuk, S. O., Ivanina, V. V., Fursa, A. V., Bekh, N. S., Kotsar, M. I., ... Katelevskiy, V. M. (2019). *Miscanthus in Ukraine*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-617-7804-11-5> [In Ukrainian]
- Ashman, C., Wilson, R., Mos, M., Clifton-Brown, J., & Robson, P. (2023). Improving field establishment and yield in seed propagated *Miscanthus* through manipulating plug size, sowing date and seedling age. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1095838. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1095838>
- Atkinson, C. (2009). Establishing perennial grass energy crops in the UK: A review of current propagation options for *Miscanthus*. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 752–759. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.01.005>
- von Cossel, M., Mangold, A., Iqbal, Y., Hartung, J., Lewandowski, I., & Kiesel, A. (2019). How to generate yield in the first year—A three-year experiment on *Miscanthus* (*Miscanthus* × *giganteus* [Greef et Deuter]) establishment under maize (*Zea mays* L.). *Agronomy*, 9(5), Article 237. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050237>
- Davey, C. L., Robson, P., Hawkins, S., Farrar, K., Clifton-Brown, J. C., Donnison, I. S., & Slavov, G. T. (2017). Genetic relationships between spring emergence, canopy phenology, and biomass yield increase the accuracy of genomic prediction in *Miscanthus*. *Journal of Experimental Botany*, 68(18), 5093–5102. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx339>
- Fonteyne, S., Lootens, P., Roldán-Ruiz, I., & Muylle, H. (2018). Impact of flowering time and biomass yield components on biomass production of *Miscanthus*. *GCB Bioenergy*, 10(8), 616–629.
- Jeżowski, S. (2008). Yield traits of six clones of *Miscanthus* in the first 3 years following planting in Poland. *Industrial Crops and Products*, 27(3), 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.013>
- Jensen, E., Farrar, K., Thomas-Jones, S., Hastings, A., Donnison, I. S., & Clifton-Brown, J. (2011). Characterization of flowering time diversity in *Miscanthus* species. *GCB Bioenergy*, 3(6), 387–400. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01097.x>
- Lewandowski, I., Clifton-Brown, J., Trindade, L. M., van der Linden, G. C., Schwarz, K.-U., Müller-Sämman, K., Anisimov, A., Chen, C.-L., Dolstra, O., Donnison, I. S., Farrar, K., Fonteyne, S., Harding, G., Hastings, A., Huxley, L. M., Iqbal, Y., Khokhlov, N., Kiesel, A., Lootens, P., ... Kalinina, O. (2016). Progress on optimizing miscanthus biomass production for the European bioeconomy: Results of the EU FP7 project OPTIMISC. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 1620. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01620>
- Lim, S.-H., Yook, M.-J., Song, J.-S., Kim, J.-W., Zhang, C.-J., Kim, D.-G., Park, Y.-H., Lee, D., & Kim, D.-S. (2021). Diversity in pheno-logical and agronomic traits of *Miscanthus sinensis* collected in Korea and eastern Asia. *Agronomy*, 11(5), Article 900. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050900>
- Robson, P. R., Farrar, K., Gay, A. P., Jensen, E. F., Clifton-Brown, J. C., & Donnison, I. S. (2013). Variation in canopy duration in the perennial biofuel crop *Miscanthus* reveals complex associations with yield. *Journal of Experimental Botany*, 64(8), 2373–2383. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert104>
- Robson, P. R. H., Donnison, I. S., & Clifton-Brown, J. C. (2019). Stem growth characteristics of high-yielding *Miscanthus* correlate with yield, development, and intraspecific competition within plots. *GCB Bioenergy*, 11(9), 1075–1085. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12610>
- Robson, P. R., Hawkins, S., Davey, C. L., Clifton-Brown, J. C., & Slavov, G. (2025). Seasonal stem growth analysis shows early stem growth of *Miscanthus* from high latitudes yields more biomass but stem traits negatively interact to limit seasonal growth. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1569235. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1569235>
- Tejera, M. D., Miguez, F. E., & Heaton, E. A. (2021). The older plant gets the sun: Age-related changes in *Miscanthus* × *giganteus* phenology. *GCB Bioenergy*, 13(1), 4–20. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12745>
- Meteostat. (n.d.). Ternopil: Temperature and precipitation. <https://meteostat.net/station/33415>

Seasonal growth dynamics of *Miscanthus × giganteus* in the Western Forest Steppe

Yu. I. Haida^{1,2}, Ya. D. Fuchylo^{3*}, V. Ya. Brych², A. M. Shuvar², T. M. Hrokholska²

¹National University “Chernihiv Polytechnic”, 95 Shevchenko St., Chernihiv, 14030, Ukraine

²Western Ukrainian National University, 11 Lvivska St., Ternopil, 46009, Ukraine

³Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine

*Corresponding author: Yaroslav Fuchylo, fuchylo_yar@ukr.net

Citation: Haida Yu. I., Fuchylo Ya. D., Brych V. Ya., Shuvar A. M., & Hrokholska T. M. (2026). Seasonal growth dynamics of *Miscanthus × giganteus* in the Western Forest Steppe. *Bioenergy*, 1, 20–31. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp20-31>

Aim. To study the peculiarities of the seasonal growth dynamics of *Miscanthus × giganteus* at different stages of plantation formation (the 1st and the 3rd year) the Western Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** The study was conducted at the experimental and demonstration field of the research farm of the Western Ukrainian National University. Observations included monitoring the height of miscanthus shoots in a 1-year plantation and a 3-year plantation. 20 model curtains (plant groups from one planted rhizome) were selected at each site. The height of the shoots in each curtain was measured regularly (8 control dates from the end of May to the end of September) with an accuracy of 1 cm. Based on the measurement results, the dynamics of the average height of shoots and height increments during the vegetation period were analysed. **Results.** Three stages of shoot growth were observed in the one-year miscanthus plantation: intensive growth in spring - early summer, mid-summer growth slowdown due to insufficient precipitation and growth recovery in late summer - autumn. The average shoot height increased from 10.7 cm at the end of May to 87.2 cm at the end of September (more than 8 times). In June, the height quickly reached 45–60 cm, after which a ‘plateau’ of growth was observed in July: height increments sharply decreased, and yellowing and death of shoots were noted in some curtains. At the end of July, growth processes resumed in most plants, and the height of shoots reached maximum values in September (up to 1.2–1.3 m in the most developed curtains). At the same time, high variability was recorded between individual plants: some of the young rhizomes were unable to maintain growth during the stressful mid-summer period, which caused significant variability in heights (from 0 to 125 cm). In the 3-year-old miscanthus plantation, the formation of the above-ground mass occurred more evenly. Shoot growth began earlier (the height reached 25–60 cm in May), continued intensively until the beginning of July (up to 110–150 cm), after which gradually slowed down. During July–September, height increases remained, without sharp drops, and the maximum shoot height at the end of the season was 160–190 cm. Individual growth curves in the older plantation were increasing, without episodes of leaf or shoot loss, which indicates better resistance of rooted plants to short-term drought. The values of average daily current increments in the 3rd year of vegetation reached a peak in late June (30–35 cm per measurement interval) and decreased sharply in July; in early August, a short second wave of moderate increments (11–15 cm) was noted, after which growth faded to zero with the onset of autumn. In contrast to the young plantation, where significant mosaicism of development was observed, in mature stands the height leveled out at the end of the season, and the differences between plants decreased. **Conclusions.** The seasonal growth dynamics of *M. × giganteus* significantly depends on the age of the plantation. In the first year of cultivation, uneven growth is observed with a mid-summer suspension and partial loss of biomass during the period with high temperatures and insufficient precipitation, while in the third year of development, plants demonstrate an earlier start, a stable growth course without significant inhibition in summer, and a significantly higher final shoot height. The obtained data emphasize the importance of taking into account age-related growth characteristics and response to climatic stresses when assessing productivity and selecting highly productive miscanthus genotypes for the conditions of the Western Forest Steppe.

Keywords: *Miscanthus × giganteus*; height increment; age-related growth characteristics; response to climatic stresses.

ORCID

Юрій Гайда / Yuriy Hayda

<https://orcid.org/0000-0001-6019-9654>

Ярослав Фучило / Yaroslav Fuchylo

<https://orcid.org/0000-0002-2669-5176>

Василь Брич / Vasyl Brych

<https://orcid.org/0000-0002-4277-5213>

Антін Шувар / Antin Shuvar






<https://orcid.org/0000-0002-6016-0896>

Тетяна Грохольська / Tetiana Hrokholska

<https://orcid.org/0000-0002-1642-2203>

УДК 633.63:631.531.12

Вирощування насіння буряків цукрових безвисадковим способом

В. А. Доронін* , В. В. Дрига , Ю. А. Кравченко ,
В. О. Рибак , В. В. Доронін 

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

*Автор для листування: Володимир Доронін, doronin1955@ukr.net

Цитування: Доронін В. А., Дрига В. В., Кравченко Ю. А., Рибак В. О., Доронін В. В. Вирощування насіння буряків цукрових безвисадковим способом. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp32-37>

Мета. Вивчення доцільності вирощування насіння буряків цукрових безвисадковим способом в незрошувальних умовах Лісостепу України. **Методи.** Лабораторний, вимірювально-ваговий, математично-статистичний. **Результати.** Оскільки сівбу насінників проводили в незрошуваних умовах, то строки сівби корегувалися з врахуванням наявності опадів: до їх випадання або відразу після опадів. Фітосанітарний стан посіви перед зимівлею був задовільний: ураження рослин збудниками хвороб та пошкодження шкідниками відсутні, забур'яненість середня. Ефективність безвисадкового способу вирощування насіння залежить, головним чином, від збереженості рослин в період перезимівлі, що зумовлено як погодними умовами, так і станом розвитку рослин. Формування параметрів рослин буряків цукрових перед зимівлею характерних холодостійким рослинам у середньому за роки досліджень забезпечило високу збереженість до весни безвисадкових насінників першого і другого строків сівби яка становила, відповідно – ЧС компоненту 78,8 та 74,6%, багатонасінного запилювача – 74,0 та 72,3%, що цілком достатньо для отримання насіння. Висока збереженість насінників до весни та відповідний догляд за ними забезпечили в середньому за роки дослідження отримання якісного насіння зі схожістю 82% та доброякісністю понад 93,2%, яка залежала від року вегетації. У 2022 р. схожість насіння гібрида 'Константа' становила 85%, доброякісність 99,6%, а в 2023 р. схожість була вищою і становила 87%, доброякісність меншою – 96,0%, що дає можливість підготувати насіння для сівби зі схожістю не менше 93–96%. **Висновки.** За глобального потепління в умовах Правобережного Лісостепу в зоні нестійкого зволоження є перспектива вирощувати насіння цукрових буряків безвисадковим способом без зрошення, але є ризик отримання нерівномірних сходів за дефіциту вологи в період сівби та отримання сходів і щоб цього запобігти необхідно сівбу проводити з врахуванням можливих опадів.

Ключові слова: біометричні показники; густина рослин; перезимівля насінників; якість насіння; енергія проростання; схожість; маса 1000 насінин; спосіб вирощування; сівба.

Вступ

Підвищення урожайності буряків цукрових не можливе без впровадження сучасних конкурентоспроможних гібридів української селекції, що можливе за наявності високоякісного насіння. В умовах Лісостепу насіння буряків вирощують висадковим способом, який енергозатратний, та й на сьогодні відсутні спеціальні машини для проведення агротехнологічних операцій, що унеможлиблює використання такого способу вирощування. Вирощування насіння в зрошуваних умовах південних регіонів безвисадковим способом обмежене за значного скорочення зрошувальних площ та військовими діями. Тому, з врахуванням глобального потепління

Одержано 28.11.2025 • Погоджено 10.02.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

ня та скороченням можливості вирощування насіння в зрошувальних умовах півдня України з метою вивчення можливості вирощування насіння безвисадковим способом в незрошувальних умовах Лісостепу України були проведені дослідження, що є актуальним.

Продуктивність безвисадкових насінників залежить від перезимівлі рослин в осінньо-зимовий період [1, 2]. Тому, основною метою в першому році вегетації є отримання до зими коренеплодів визначеної величини і структури, які найхолодостійкіші. Численними дослідженнями з безвисадкових насінників в зрошуваних умовах південних регіонів встановлено, що всі елементи технології вирощування мають бути направлені на отримання дрібних коренеплодів із ксероморфною структурою, дрібноклітинної будови з добре розвинутою провідною судинною системою. Такі рослини перед зимівлею мають мати висоту рослин 30–50 см [3], діаметр головки коренеплоду 0,5–2,5 см [4], 10–12 добре розвинутих листків [5], довжину листків 28–30 см [6], високий вміст сухих речовин і цукрів та масу коренеплодів 10–20 г із ксероморфною структурою їх клітин [7]. Всі ці ознаки забезпечують добру перезимівлю безвисадкових насінників. Біометричні показники насінників залежать, перш за все, від строків їх сівби та густоти рослин перед зимівлею. Від строків сівби залежать анатомічні і морфологічні особливості рослин, які впливають на зимостійкість та продуктивність безвисадкових насінників буряків цукрових [8]. За даними В. Л. Курила та А. М. Корженко [9], за однакових умов агротехніки ріст і розвиток рослин безвисадкових насінників залежить в основному від строків сівби. За вирощування насіння безвисадковим способом в південних районах України, як ранні строки, так і пізні посіви непридатні для сівби [10]. Одним з основних чинників, який визначає густоту рослин і, відповідно – їх перезимівлю та продуктивність насінників є норма висіву насіння і строки сівби [11].

Різна густота насаджень по-різному впливає на ступінь розвитку рослин перед зимівлею. Практичний досвід показав, що занадто маленькі коренеплоди безвисадкових рослин, що розвиваються при пізніх посівах у вересні і жовтні, взимку гинуть тому, що вони витісняються з ґрунту, коли він замерзає і розширюється. Такі рослини залишаються оголеними після розмерзання ґрунту. Занадто великі коренеплоди також можуть загинути після морозу, який розриває їх клітини [12]. Тому, густота рослин має бути такою, щоб забезпечити параметри коренеплодів перед зимівлею такі, як наведено вище.

Мета дослідження – установити доцільність вирощування насіння буряків цукрових безвисадковим способом в незрошувальних умовах Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводились в умовах Білоцерківської ДСС ІБКіЦБ НААН, яка розміщена в зоні нестійкого зволоження упродовж 2021–2025 рр. Досліди були закладені в довготривалому стаціонарі на чорноземах типових глибоких малогумусних вилугуваних середньосуглинкових з вмістом гумусу в шарі ґрунту 0–30 см – 3,5–3,8%, рухомого фосфору 170–180 мг/кг та обмінного калію 50–60 мг/кг ґрунту (за Чириковим).

Погодні умови за температурним режимом були наближені до середніх багаторічних показників. Середня добова температури повітря за роками була вищою на 1,2–3,2 °С. Зимні місяці були теплішими, ніж за багаторічними показниками, лише в 2021 р. середня добова температура перевищувала багаторічну на 0,5 °С. Такі погодні умови сприяли збереженню рослин до весни, що свідчить про доцільність вирощування насіння буряків цукрових безвисадковим способом в умовах Лісостепу України.

Кількість опадів за вегетаційний період (квітень – жовтень) 2021–2025 рр. була наближеною і, навіть більшою, ніж середня багаторічна, крім 2022 та 2023 рр., коли дефіцит вологи за рік становив, відповідно – 55 та 37 мм, а в інші роки кількість опадів була більшою від середньо-багаторічних показників. Період сівби безвисадкових насінників – перша декада вересня за роками характеризувався значним дефіцитом вологи – 28–29 мм, крім 2022 р., коли був надлишок опадів – 23 мм. Дефіцит вологи негативно впливав на отримання сходів буряків та початковий ріст і розвиток рослин і, відповідно – на формування кореневої системи, наземної маси в цілому на формування рослин, які добре витримують мінусові температури.

Згідно зі схемою досліду сівбу проводили в два строки – в третій декаді серпня та першій декаді вересня, в період коли випадали опади до сівби чи після неї. Сівбу ЧС компонента та

багатонасінного запилювача, з співвідношенням компонентів 4:2 проводили з нормою висіву 30 шт./м погонний рядка, з міжряддям 45 см.

Густоту рослин перед зимівлею, після зимівлі та стан розвитку насінників – висоту рослин, кількість листків, діаметр коренеплоду, його масу та цукристість визначали згідно з методикою досліджень по цукрових буряках [13].

Збереженість рослин визначали за різницею отриманих сходів восени і після перезимівлі весною. Відбирання середніх зразків насіння для аналізування проводили згідно з ДСТУ [14].

Якість насіння – енергію проростання, схожість і доброякісність за ДСТУ [15], масу 1000 насінин за ДСТУ [16]. Дослідження проводили з гібридом на цитоплазматичній чоловічій стерильності (ЦЧС) 'Константа'.

Експериментальні дані обробляли методом дисперсійного аналізу за Фішером [17] з використанням методичних рекомендацій [18].

Результати дослідження

Оскільки сівбу насінників проводили в не зрошуваних умовах, то строки сівби корегувалися з врахуванням наявності опадів: до їх випадання або відразу після опадів. Фітосанітарний стан посіві перед зимівлею був задовільний: ураження рослин збудниками хвороб та пошкодження шкідниками відсутні, забур'яненість середня.

Польова схожість насіння чоловічостерильного компоненту і багатонасінного запилювача в середньому за роки дослідження була висока і становила, відповідно – 70,0–75,3% та 68,2–72,5%. Багатонасінного запилювача польова схожість була нижчою.

Ефективність безвисадкового способу вирощування насіння залежить, головним чином, від збереженості рослин в період перезимівлі, що зумовлено як погодними умовами, так і станом розвитку рослин.

Дефіцит опадів істотно впливав на біометричні показники безвисадкових насінників (табл. 1).

Таблиця 1. Біометричні показники насінників перед зимівлею залежно від строків сівби (2021–2024 рр.)

Варіант компонент гібрида	Строк сівби	Маса корене- плоду, г	Діаметр коре- неплоду, см	Кількість лист- ків, шт./роsl.	Цукрис- тість, %	Висота рослин, см
ЧС компонент	20.08.	9,4	0,7	6,5	8,4	8,3
	01.09.	9,0	0,4	5,1	6,8	5,9
Багатонасінний запилювач	20.08.	8,7	0,7	6,7	8,2	7,8
	01.09.	8,1	0,5	4,8	6,4	6,3

За першого строку сівби (20 серпня) у 2021–2024 рр. діаметр коренеплодів та їх цукристість були вищими, відповідно – на 0,2–0,3 см та 1,5–2,4%, ніж за другого строку і відповідали параметрам холодостійких рослин. Маса коренеплодів також була вищою за першого строку сівби, але за обох строків вона була меншою, ніж у холодостійких рослинах.

Формування параметрів рослин цукрових буряків перед зимівлею характерних холодостійким рослинам дає надію на добру їх збереженість в зимовий період і, відповідно – отримання високого урожаю насіння доброї якості.

У середньому за роки збереженість до весни безвисадкових насінників першого і другого строків сівби була високою і становила, відповідно – ЧС компоненту 78,8 та 74,6%, багатонасінного запилювача – 74,0 та 72,3%, що цілком достатньо для отримання насіння (табл. 2).

Вегетаційний період 2024/25 року був не сприятливим для росту та розвитку рослин перед зимівлею. Сівбу безвисадкових насінників провели лише в перший строк – 28 серпня, в другий строк (I декада вересня) сівбу не проводили, оскільки опадів неї не було до сівби в перший строк і після. Такі погодні умови призвели до слабкого росту і розвитку рослин, біометричні параметри яких були дуже малі й залежали від метеорологічних умов які були під час осінньої вегетації (табл. 3).

Таблиця 2. Збереженість рослин в осінньо-зимовий період (2021/22–2023/24 рр.)

Варіант компоненти гібрида 'Константа'	строк сівби	Густота рослин, шт./м		Збереглося рослин, %
		перед зимівлею	після зимівлі	
ЧС компонент	20.08.	22,6	17,8	78,8
	01.09.	22,4	16,7	74,6
Багатонасінний запилювач	20.08.	21,5	15,9	74,0
	01.09.	20,6	14,9	72,3

Таблиця 3. Біометричні показники насінників перед зимівлею залежно від строків сівби (2024/25 рр.)

Варіант		Маса корене- плоду, г	Діаметр корене- плоду, см	Довжина корене- плоду, см	Маса наземної маси, г	Висота рослин, см
компонент гібрида	строк сівби					
ЧС компонент	28.08.	0,241	0,3	8,5	1,34	7,6
Багатонасінний запилювач	28.08.	0,380	0,4	10,1	2,36	8,7

Період сівби та отримання сходів характеризувався значним дефіцитом вологи що призвело до сповільнення росту і розвитку рослин. У середньому маса коренеплодів ЧС компонента становила 0,241 г, багатонасінного запилювача – 0,380 г, діаметр їх, відповідно – 0,3 та 0,4 см, що призвело до їх витіснюють з ґрунту, коли в січні за мінусової температури ґрунт замерз і після розширився, рослини залишаються оголеними після розмерзання ґрунту і загинули.

Висока збереженість насінників до весни в 2021/22–2023/24 рр. та відповідний догляд за ними забезпечили в середньому за роки дослідження отримання якісного насіння зі схожістю 82% та доброякісністю понад 93,2%, яка залежала від року вегетації. У 2022 р. схожість насіння гібрида 'Константа' становила 85%, доброякісність 99,6%, а в 2023 р. схожість була вищою і становила 87%, доброякісність меншою – 96,0%.

Вирощене насіння з такою доброякісністю забезпечить підготовку насіння для сівби зі схожістю не менше 93–96%, що сприятиме більш інтенсивному його проростанню в польових умовах, підвищенню надійності, польової схожості і одержанню дружних та рівномірних сходів. Це забезпечить сівбу на кінцеву густоту рослин, що сприятиме зниженню норм висіву насіння.

У середньому за три роки аналіз фракційного складу насіння за масою показав, що 81% – це вміст насіння посівних фракцій 3,5–4,5 та 4,5–5,5 мм і 21% насіння фракції 3,0–3,5 мм з доброякісністю 95,4%, яке можна використати після доробки для підготовки дражованого насіння зі схожістю не менше 95% (табл. 4).

Таблиця 4. Якість насіння по фракціях за безвисадкового способу його вирощування (середнє за 2022–2024 рр.)

Варіант – рік урожаю	Фракція насіння		Якість насіння			
	мм	її вміст, %	енергія про- ростання, %	схожість, %	маса 1000 насінин, г	доброякіс- ність, %
2022	більше 5,5	9	85	89	25,8	98,0
	4,5–5,5	47	86	88	18,7	96,4
	3,5–4,5	43	76	78	12,8	96,9
	3,0–3,5	1	44	48	7,1	94,8
2023	більше 5,5	1	0	0	0	0
	4,5–5,5	8	0	0	0	0
	3,5–4,5	48	86	90	12,2	97,3
	3,0–3,5	43	79	80	8,3	96

Варіант – рік урожаю	Фракція насіння		Якість насіння			
	мм	ї вміст, %	енергія про- ростання, %	схожість, %	маса 1000 насінин, г	доброякіс- ність, %
2024	більше 5,5	1	–	–	–	–
	4,5–5,5	19	62	67	–	80,4
	3,5–4,5	62	78	80	–	89,3
	3,0–3,5	18	–	–	–	–
Середнє за 2022–2024 рр.	більше 5,5	4	43	45	13	49,0
	4,5–5,5	25	49	52	9	58,9
	3,5–4,5	51	80	83	13	94,5
	3,0–3,5	21	62	64	8	95,4

Умови вирощування впливали як на фракційний склад насіння, так і на його якість. Так, якщо у 2021/22 р. було 9% насіння крупної фракції – більше 5,5 мм, то у 2022/23–2023/24 рр. такого насіння було лише 1,0% і, навпаки, насіння фракції 3,0–3,5 мм за роками було, відповідно – 1,0% та 43 і 21% з доброякісністю 96 та 95,4%, що дає можливість використання його для підготовки дражованого насіння зі схожістю не менше 95–96%.

Висновки

За глобального потепління в умовах Правобережного Лісостепу в зоні нестійкого зволоження є перспектива вирощувати насіння цукрових буряків безвисадковим способом без зрошення але є ризик отримання не рівномірних сходів за дефіциту вологи в період сівби та отримання сходів і щоб цього запобігти необхідно сівбу проводити з врахуванням можливих опадів. Упродовж 2021–2025 рр. погодні умови в цілому були сприятливими що забезпечило хорошу перезимівлю рослин та отримання високо урожаю і якості насіння, а 2024/25 р. характеризувався значним дефіцитом вологи, що призвело до слабкого розвитку рослин перед зимівлею, та їх вимерзання.

Підсумовуючи результати дослідження можна зробити висновок, що для підвищення відсотку перезимівлі рослин доцільно провести додаткові дослідження за більш раннього строку сівби (друга декада серпня), застосування в основне удобрення фосфорно-калійних добрив, а для підвищення якості і урожаю насіння – досліди з підживлення рослин аміачними добривами навесні, чеканки та додаткове запилення насінників в період масового їх цвітіння.

Список використаних джерел

- Balan, V. M., Bobruiko, V. M., & Kleshchevnikov, M. O. (2006). Optimization of sugar beet seed cultivation technology using the transplant-free method. *Sugar Beet*, 3, 11–12. [In Ukrainian]
- Doronin, V. A., & Turcheniak, S. M. (2008). Cultivation of transplant-free seed plants: Influence of agroclimatic conditions on their preservation. *Seed Production*, 5, 13–14. [In Ukrainian]
- Povar, F. V. (1965). Transplant-free method of sugar beet seed cultivation in western regions. In *New Developments in Beet Growing* (pp. 335–340). Kyiv. [In Ukrainian]
- Filippova, L. V. (1974). Sugar beet seed cultivation in England. *Agriculture Abroad*, 1, 45–46. [In Ukrainian]
- Zahorodnii, A. N., Balan, V. N., & Kovnev, I. I. (1989). Relationship between the degree of development and winter preservation of transplant-free seed plants. In *Methods for Increasing Productivity of Commercial Sugar Beet and Seed Plants* (pp. 50–55). VNIS. [In Ukrainian]
- Balan, V. N. (1991). *Increasing winter hardiness of transplant-free sugar beet seed plants*. Kyiv. [In Ukrainian]
- Dobrotvortseva, A. V. (1979). Transplant-free method of seed cultivation. In *Sugar Beet. Fundamentals of Agricultural Technology* (pp. 392–398). Urozhai. [In Ukrainian]
- Campbell, S. C., & Mast, A. A. (1971). Seed production. In R. T. Johnson, J. T. Alexander, G. E. Rush, & G. R. Hawkes (Eds.), *Advances in sugarbeet production: Principles and practices* (pp. 438–450). Iowa State University Press.
- Kurylo, V. L., & Korzhenko, A. M. (2006). Determination of the critical temperature for roots of transplant-free seed plants. *Sugar Beet*, 6, 6–7. [In Ukrainian]

10. Sultanskii, A. A., Lobodin, O. K., & Kornienko, V. L. (1987). Cultivation of superelite and elite seeds in southern irrigated regions of Ukraine. In *New Methods in Sugar Beet Seed Production* (pp. 65–72). VNIS. [In Ukrainian]
11. Doronin, V. A., & Turcheniak, S. M. (2007). Productivity of transplant-free seed plants depending on sowing rates and dates. *Sugar Beet*, 6, 10–12. [In Ukrainian]
12. Longden, P. S. (1986). *Influence of seed growing environment on sugar beet seed quality*. Paper presented at the 49th Winter Congress, Brussels, February 12–13, 1986. Brussels.
13. Roik, M. V., & Hizbullina, N. H. (Eds.). (2014). *Methods of conducting research in beet growing*. FOP Korzun D. Yu. [In Ukrainian]
14. State Standard of Ukraine 4328:2004. (2005). *Sugar beet seeds. Acceptance rules and sampling methods*. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. [In Ukrainian]
15. State Standard of Ukraine 2292:1996 (GOST 22617.2-94). (1995). *Sugar beet seeds. Methods for determining germination, monogermity, and seed quality*. Derzhstandart of Ukraine. [In Ukrainian]
16. State Standard of Ukraine 4232:2003. (2004). *Beet seeds. Methods for determining the weight of 1000 seeds and the weight of one sowing unit*. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. [In Ukrainian]
17. Fisher, R. A. (2006). *Statistical methods for research workers*. Cosmo Publications.
18. Ermantraut, E. R., Prysiashniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic experimental data in the Statistica 6 package: Methodological guidelines*. PolihrafKonsaltnynh. [In Ukrainian]

Cultivation of sugar beet seed by the direct method

V. A. Doronin*, V. V. Dryha, Yu. A. Kravchenko, V. O. Rybak, V. V. Doronin

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine

*Corresponding author: Volodymyr Doronin, doronin1955@ukr.net

Citation: Doronin, V. A., Dryha, V. V., Kravchenko, Yu. A., Rybak, V. O., & Doronin, V. V. (2026). Cultivation of sugar beet seed by the direct method. *Bioenergy*, 1, 32–37. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp32-37>

Aim. To study the feasibility of cultivating sugar beet seed by the direct method under non-irrigated conditions of the Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** Laboratory, measurement-weight, and mathematical-statistical methods. **Results.** Since seed bearing crops were sown under non-irrigated conditions, sowing dates were adjusted according to rainfall: either before precipitation or immediately after. The phytosanitary condition of the crops before overwintering was satisfactory: no disease infection or pest damage was observed, and weed infestation was moderate. The efficiency of the direct method of seed cultivation depends mainly on plant survival during overwintering, which is determined both by weather conditions and by the plant health. The formation of plant parameters characteristic of cold-resistant crops before overwintering ensured high survival rates until spring. On average over the years of study, survival of non-transplanted seed plants of the first and second sowing dates was as following: CMS component – 78.8% and 74.6%, respectively; multi-seed pollinator – 74.0% and 72.3%, which is sufficient for seed production. High survival of seed plants until spring and appropriate care provided, on average, high-quality seed with germination of 82% and seed quality above 93.2%, depending on the year of vegetation. In 2022, germination of the hybrid ‘Konstanta’ was 85% and seed quality 99.6%. In 2023, germination was higher – 87%, while seed quality was lower – 96.0%. This allows seed to be prepared for sowing with germination of no less than 93–96%. **Conclusions.** Under global warming, in the Right-Bank Forest Steppe, within the zone of unstable moisture, there is potential to cultivate sugar beet seed by the direct method without irrigation. However, there is a risk of uneven emergence under moisture deficit during sowing. To prevent this, sowing should be carried out with consideration of possible rainfall.

Keywords: biometric parameters; plant density; overwintering of seed plants; seed quality; germination energy; germination; thousand seed weight; cultivation method; sowing.

ORCID

Володимир Доронін / Volodymyr Doronin

<https://orcid.org/0000-0001-9355-881X>

Вікторія Дрига / Viktoriia Dryha

<https://orcid.org/0000-0001-8085-5313>

Юлія Кравченко / Yuliia Kravchenko

<https://orcid.org/0000-0001-7561-1023>

Володимир Рибак / Volodymyr Rybak

<https://orcid.org/0009-0008-2467-8349>

Володимир Доронін мл. / Volodymyr Doronin Jr.

<https://orcid.org/0000-0003-0349-4467>

УДК 633.358:631.531.02:631.563

Оцінка адаптивної стійкості сортів гороху посівного залежно від травмування та тривалості зберігання насіння

Л. М. Кононенко* , Д. І. Кам'яченко 

Уманський національний університет, вул. Інститутська, м. Умань, Черкаська обл., 20301, Україна

*Автор для листування: Лідія Кононенко, lidiyakononenko@ukr.net

Цитування: Кононенко Л. М., Кам'яченко Д. І. Оцінка адаптивної стійкості сортів гороху посівного залежно від травмування та тривалості зберігання насіння. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 38–49. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp38-49>

Мета. Оцінити адаптивну стійкість сортів гороху посівного залежно від ступеня травмування та тривалості зберігання насіння, а також встановити їх вплив на якісні показники насіння та його посівні властивості. **Методи.** Дослідження базувалися на трифакторному лабораторному досліді (2022–2026 рр.). Об'єктами були сорти гороху посівного 'Царевич', 'Оплот' та 'Отаман'. Схема досліду передбачала вивчення впливу сортових особливостей (фактор А), тривалості зберігання від 1 до 5 років (фактор В) та ступеня травмованості насіння (ціле, мікротравми, макротравми) (фактор С). Посівні якості та біохімічні показники визначали згідно з ДСТУ 4138-2002 та відповідними ISO стандартами. **Результати.** Найвищим адаптивним потенціалом характеризувався сорт 'Царевич', що у контрольному варіанті забезпечував енергію проростання на рівні 95%, у сортів 'Оплот' і 'Отаман' цей показник становив 93 та 91%. Зі збільшенням тривалості зберігання до 5 років енергія проростання знижувалася до 80% у сорту 'Царевич' та до 76% в 'Отаман', а за наявності макротравм – до 60 і 55% відповідно. Лабораторна схожість змінювалася аналогічно – від 96–92% у свіжому насінні до 84–78% у цілих зразках після 5 років зберігання та до 62–68% у варіантах із макротравмами. Середня тривалість проростання зростала від 4,8–5,2 доби у свіжому насінні до 5,8–6,3 доби після 5 років зберігання, а за макротравм досягала 6,8–7,6 доби. Індекс швидкості проростання, навпаки, знижувався: від 18,5–17,3 ум. од. у контролі до 14,6–13,2 ум. од. у цілих зразках після 5 років та до 10,2–11,5 ум. од. за макротравм. Вміст води зменшувався з 12,5–12,8 до 9,3–10,8% залежно від сорту та умов зберігання, причому травмоване насіння втрачало додатково до 0,9% вологи. Загальний вміст білка знижувався з 24,2–24,8% до 20,2–22,7%, а наявність макротравм посилювала втрати ще на 0,5–1,5%. Вміст вуглеводів характеризувався більшою стабільністю, проте також зменшувався з 51,9–52,6 до 47,1–49,8%, із додатковим зниженням на 0,8–1,7% у травмованому насінні. **Висновки.** Найвищу адаптивну стійкість до дії досліджуваних факторів продемонстрував сорт 'Царевич', який зберігав вищі показники посівних якостей і біохімічного складу впродовж усього періоду зберігання. Механічні пошкодження та тривале зберігання мають кумулятивний негативний ефект, істотно знижуючи життєздатність насіння та інтенсивність проростання. Отримані результати свідчать про доцільність використання цілого насіння та обмеження термінів зберігання для збереження високого біологічного потенціалу культури.

Ключові слова: проростання; схожість; білки; вуглеводи; зберігання.

Вступ

Горох посівний (*Pisum sativum* L.) є цінною і провідною зернобобовою культурою в Україні, що відіграє стратегічну роль у забезпеченні продовольчої безпеки та збалансуванні рослинного білка в раціоні. Однак, реалізація генетичного потенціалу сучасних сортів значною мірою

Одержано 03.03.2026 • Погоджено 29.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026

© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.



залежить від якості насіннєвого матеріалу, яка формується на етапах збирання, післязбиральної доробки та тривалого зберігання [1].

Сучасний стан виробництва гороху посівного в Україні характеризується пошуком оптимальних технологічних рішень для стабілізації врожайності та підвищення якості насіннєвого матеріалу в умовах мінливого клімату [2]. Наукові дослідження останніх років акцентують увагу на необхідності вдосконалення елементів технології вирощування конкретних сортів, що дозволяє максимально реалізувати їхній біологічний потенціал [3, 4]. Особливого значення набуває обґрунтування адаптивної сортової технології для умов Правобережного Лісостепу, де параметри росту та розвитку культури значною мірою залежать від гідротермічних умов вегетаційного періоду [5, 6].

Адаптивна стійкість та параметри стабільності сортів є ключовими ознаками при відборі селекційного матеріалу [7, 8]. Дослідженнями науковців встановлено, що різні за морфотипом сорти гороху мають неоднаковий адаптивний потенціал, що проявляється у їхній здатності протистояти абіотичним та технологічним стресам [9, 10]. При цьому аналіз параметричних станів селекційних зразків у різних екологічних зонах дозволяє виділити генотипи з високою насіннєвою продуктивністю та стійкістю до несприятливих чинників [11, 12].

Процес тривалого зберігання насіння супроводжується глибокими фізіологічними, морфологічними та хімічними змінами, що прямо впливають на його життєздатність [13]. Згідно з іноземними дослідженнями, довговічність насіння та швидкість його деградації залежать від вихідних кондицій та умов експозиції [14, 15]. Зокрема, оцінка життєздатності до і після зберігання за допомогою лабораторних та польових методів підтверджує поступове зниження посівних якостей через порушення цілісності насіннєвих структур [16, 17].

Важливим аспектом отримання високоякісного насіння є дотримання регламентів виробництва та мінімізація факторів, що спричиняють погіршення його фізіологічного стану [18]. Таким чином, комплексне вивчення адаптивної здатності сортів у поєднанні з аналізом біохімічних змін під час зберігання та впливу механічних чинників є необхідною умовою для розробки ефективних систем насінництва гороху посівного.

Мета дослідження – оцінити адаптивну стійкість сортів гороху посівного залежно від ступеня травмування та тривалості зберігання насіння, а також встановити їх вплив на якісні показники насіння та його посівні властивості.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводили на базі Уманського національного університету впродовж 2022–2026 рр. Для вивчення поставлених задач було використано сорти гороху посівного вітчизняної селекції, занесені до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні – ‘Царевич’, ‘Оплот’ і ‘Отаман’. Сорти створені в Інституті рослинництва ім. В. Я. Юр’єва НААН і належать до безлисточкових (вусатих) напівкарликових морфотипів.

Сорти характеризуються редукцією листових пластинок із заміною їх на вусики, що сприяє кращій аерації посівів, зменшенню вилягання та підвищенню придатності до механізованого збирання. Рослини середньої висоти (55–75 см), з нефасційованим стеблом і формуванням першого суцвіття на рівні 14–16-го вузла. Квітки білі, зазвичай по дві на квітконіжці. Боби лущильного типу, середнього розміру, з кількістю насінин 5–6 (максимально – 7). Насіння округло-сплюснуте, з гладенькою поверхнею, жовтого або рожевого забарвлення.

Сорт ‘Царевич’ характеризується середньостиглістю, тривалість вегетаційного періоду становить 79–85 діб. Маса 1000 насінин – 260–280 г, вміст білка – 20–22%. Сорт відзначається підвищеною посухостійкістю, стійкістю до вилягання та високою придатністю до збирання прямим комбайнуванням. За результатами сортовипробувань максимальна врожайність досягала 5,0 т/га, що свідчить про високий потенціал продуктивності.

Сорт ‘Оплот’ також належить до середньостиглої групи з тривалістю вегетаційного періоду 80–90 діб. Маса 1000 насінин становить 260–280 г, вміст білка – 20–22%. Сорт характеризується стійкістю до вилягання, доброю адаптивністю до умов вирощування в різних ґрунтово-кліматичних зонах України та стабільною врожайністю. За даними державного сортовипробування, середня врожайність у зоні Лісостепу становила близько 2,7 т/га, з максимальними показниками понад 4,0 т/га.

Сорт 'Отаман' належить до середньостиглої групи, тривалість вегетаційного періоду становить 77–80 діб. Рослини напівкарликові, безлисточкового (вусатого) типу. Стебло нефасційоване, середньої довжини, висота рослин – 60–80 см, закладання першого суцвіття відбувається на рівні 14–16-го вузла. Квітки білі, формуються по дві (інколи 2–3) на квітконіжці. Боби лущильного типу, середнього розміру, добре виповнені, містять 5–6 насінин (максимально – 7). Насіння округле, гладеньке, жовтого або рожевого забарвлення, характеризується стійкістю до осипання. Сорт зернового напряму використання, відзначається стабільною продуктивністю, стійкістю до вилягання та придатністю до збирання прямим комбайнуванням. Маса 1000 насінин становить 230–250 г, вміст білка – 20–22%.

Обрані сорти характеризуються високим рівнем адаптивності, стабільною продуктивністю та належать до сучасних морфотипів гороху, що забезпечує їх доцільність використання в дослідженнях, спрямованих на оцінку якості насіння та його посівних властивостей у процесі зберігання.

Дослідження проводили згідно з трифакторною схемою у чотириразовій повторності згідно з чинними державними стандартами та методиками.

Схема. Адаптивна стійкість сортів насіння гороху посівного залежно від тривалості зберігання і травмованості:

Фактор А – сорти: 'Царевич' (контроль), 'Оплот', 'Отаман'.

Фактор В – тривалість складського зберігання: 1 рік (свіже насіння) – контроль за тривалістю; 3 роки (середньотермінове); 5 років (тривале).

Фактор С – ступінь механічного пошкодження (травмованість): ціле насіння (контроль за травмованістю); мікротравми (тріщини оболонки); макротравми (пошкодження сім'ядолей або зародка).

Визначення енергії проростання та лабораторної схожості насіння

Енергію проростання і лабораторну схожість визначали згідно з ДСТУ 4138:2002 [19], який відповідає ISO 605/2, та правилами ISTA [20].

Насіння розкладали у стерильні чашки Петрі або на фільтрувальний папір, зволожений дистильованою водою. Пророщування здійснювали при температурі 20 ± 2 °C у темряві.

Енергію проростання визначали на 3–4-ту добу як відсоток нормально пророслого насіння.

Лабораторну схожість визначали на 7–8-му добу як відсоток нормально розвинених проростків від загальної кількості насіння.

Визначення середньої тривалості проростання

Середню тривалість проростання розраховували як середньозважене значення часу проростання насіння за формулою [21]:

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum(n_i \cdot t_i)}{\sum n_i}$$

де n_i – кількість насіння, що проросло на певну добу; t_i – відповідна доба проростання.

Спостереження проводили щоденно протягом 10 діб.

Визначення індексу швидкості проростання

Індекс швидкості проростання визначали за модифікованою методикою Maguire [22], що базується на сумуванні відношень кількості пророслого насіння до відповідної доби:

$$GSI = \sum \frac{Gt}{t}$$

де Gt – кількість пророслого насіння на добу t ; t – день обліку.

Чим вищий індекс, тим швидше відбувається проростання.

Визначення вмісту води

Вологість насіння визначали згідно з ДСТУ ISO 712:2015 (ISO 712:2009) [23] методом висушування до постійної маси. Насіння висушували при температурі 105 ± 2 °C до досягнення сталої маси. Вологість розраховували у відсотках від початкової маси зразка.

Визначення загального вмісту білка

Загальний вміст білка визначали методом К'ельдаля згідно з ДСТУ ISO 5983-1:2014 [24].

Метод включає мінералізацію зразка, перегонку аміаку та титрування. Вміст білка розраховували через загальний вміст азоту з коефіцієнтом 6,25.

Визначення загального вмісту вуглеводів

Загальний вміст вуглеводів визначали розрахунковим методом за різницею [25]:

$$\text{Вуглеводи} = 100 - (\text{вода} + \text{білки} + \text{жири} + \text{зола})$$

Жири та зольність визначали за стандартними методиками ДСТУ ISO 6492 [26] та ДСТУ ISO 2171 [27] і враховували сталі показники для розрахунку.

Статистична обробка результатів

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали методом дисперсійного аналізу із визначенням найменшої істотної різниці ($\text{HIP}_{0,05}$) [28].

Використовували трифакторний дисперсійний аналіз для оцінки впливу: фактор А – сорт, фактор В – тривалість зберігання, фактор С – ступінь травмованості.

Розрахунки проводили з визначенням середніх значень, стандартної помилки та достовірності різниць між варіантами.

Результати дослідження

Встановлено, що найвищим адаптивним потенціалом характеризується сорт 'Царевич', який у контрольному варіанті (ціле насіння) забезпечив енергію проростання на рівні 95%. Сорти 'Оплот' та 'Отаман' за аналогічних умов дещо поступалися контрольному варіанту, формуючи відповідно 93 та 91%. Різниця між сортами становить 2–4% і є статистично достовірною, оскільки перевищує значення $\text{HIP}_{0,05}$ для фактора А (2,4%), що свідчить про генетичну зумовленість початкового рівня життєздатності насіння.

Дослідження показали, що механічні пошкодження (фактор С) виявилися одним із найбільш значущих чинників зниження посівних якостей. Так, за мінімальної тривалості зберігання (1 рік) наявність мікротравм зумовлювала зниження енергії проростання в середньому на 6%. Визначено, що негативний ефект спостерігався за макротравм, коли показник істотно знижувався. У сорту 'Отаман' енергія проростання насіння зменшувалася до 73%, що на 18% менше порівняно з цілим насінням. Це пояснюється пошкодженням зародка або сім'ядолей, що порушує нормальний перебіг фізіологічних процесів під час проростання.

Вплив тривалості зберігання (фактор В) також у поступовому зниженні енергії проростання, що свідчить про процеси старіння насіннєвого матеріалу. Так, у цілого насіння сорту 'Царевич' показник знизився з 95 до 80% (на 15%), тоді як в 'Отаман' – з 91 до 76%. Отримані результати вказують на інтенсифікацію окиснювальних процесів і поступове виснаження фізіологічного потенціалу насіння в процесі зберігання.

Проведені статистичні розрахунки вказують, що взаємодія факторів (АВС), що істотно зниження життєздатності спостерігалось за поєднання тривалого зберігання (5 років) та макротравм. У цих умовах енергія проростання сорту 'Отаман' знижувалася до 55%, 'Оплот' – до 58%, а 'Царевич' – до 60%. Виявлені відмінності підтверджуються значенням $\text{HIP}_{0,05}$ для взаємодії АВС (5,6%), що свідчить про складний характер взаємодії факторів. Травмоване насіння втрачає життєздатність значно інтенсивніше порівняно з цілим, що зумовлено посиленням дихальних процесів та окиснення ліпідних компонентів у місцях пошкоджень (табл. 1).

Встановлено, що сорт 'Царевич' характеризується найвищою адаптивною стійкістю до дії досліджуваних факторів і зберігає енергію проростання до 72% навіть за наявності мікротравм після 5 років зберігання. В 'Отаман' і 'Оплот' за аналогічних умов ці показники є нижчим (68%), що свідчить про їх меншу стійкість до тривалого зберігання та механічних пошкоджень насіння (табл. 1).

Проведені дослідження вказують, що у контрольному варіанті (ціле насіння) значення лабораторної схожості найвищі відмічено у сорту 'Царевич': від 96% для свіжозібраного насіння до 84% після п'яти років зберігання. Сорти 'Оплот' і 'Отаман' формували нижчі показники – відповідно 94–81% та 92–78%, що свідчить про сортові відмінності, які підтверджуються перевищенням $\text{HIP}_{0,05}$ для фактора А (табл. 2).

Результати досліджень вказують, що травмованість проявляється у стабільному зниженні лабораторної схожості незалежно від сорту та тривалості зберігання. За наявності мікротравм зниження було 4–6%, тоді як макротравми зумовлювали суттєвіше погіршення показника – до 8–12% порівняно з цілим насінням. Найменші значення лабораторної схожості зафіксо-

вано у варіантах із макротравмами та тривалим зберіганням (5 років), де показники коливалися в межах 60–68% залежно від сорту.

Таблиця 1. Енергія проростання насіння сортів гороху посівного залежно від тривалості зберігання та ступеня травмованості, %

Сорт (А)	Тривалість зберігання (В)	Травмованість (С)		
		ціле насіння	мікротравми	макротравми
'Царевич'	1 рік	95К	89	78
	3 роки	88	81	69
	5 років	80	72	60
'Оплот'	1 рік	93	87	75
	3 роки	86	79	66
	5 років	78	70	58
'Отаман'	1 рік	91	85	73
	3 роки	84	77	64
	5 років	76	68	55
НІР _{0,05} Фактор А (сорт)			2,4	
Фактор В (тривалість зберігання)			3,6	
Фактор С (травмованість)			3,5	
Взаємодія АВС			5,6	

Досліджено, що вплив тривалості зберігання був відзначений у поступовому зниженні лабораторної схожості у всіх варіантах досліду. У середньому за сортами різниця між свіжозібраним насінням і насінням після п'яти років зберігання становила 10–14%, що перевищує НІР_{0,05} для фактора В, підтверджуючи істотність впливу даного чинника (табл. 2).

Таблиця 2. Лабораторна схожість насіння сортів гороху посівного залежно від тривалості зберігання та травмованості, %

Сорт (А)	Тривалість зберігання (В)	Травмованість (С)		
		ціле насіння	мікротравми	макротравми
'Царевич'	1 рік	96 К	90	82
	3 роки	90	84	75
	5 років	84	77	68
'Оплот'	1 рік	94	88	80
	3 роки	88	82	72
	5 років	81	74	65
'Отаман'	1 рік	92	86	78
	3 роки	86	80	70
	5 років	78	71	62
НІР _{0,05} Фактор А (сорт)			2,5	
Фактор В (тривалість зберігання)			3,7	
Фактор С (травмованість)			3,4	
Взаємодія АВС			5,5	

Встановлено істотну взаємодію факторів, що підтверджується значенням НІР_{0,05} для взаємодії АВС. Найбільш виражене зниження лабораторної схожості спостерігалось у варіантах поєднання тривалого зберігання та макротравм, що свідчить про кумулятивний негативний ефект зазначених чинників. Варто вказати, що сорт 'Царевич' був більш стійким до дії досліджуваних факторів і забезпечував вищі значення лабораторної схожості порівняно із сортами 'Оплот' та 'Отаман' (табл. 2).

Результати досліджень вказують, що у контрольному варіанті найменша середня тривалість проростання відмічена у сорту 'Царевич' – 4,8 доби за зберігання 1 рік. У сортів 'Оплот' і 'Отаман' цей показник становив відповідно 5,0 та 5,2 доби. Зі збільшенням строку зберігання до 5 років тривалість проростання зростає до 5,8 доби у сорту 'Царевич', 6,0 доби в 'Оплот' та 6,3 доби в 'Отаман', що перевищує $НІР_{0,05}$ для фактора В (0,22), підтверджуючи істотність впливу тривалості зберігання.

Встановлено, що травмованість насіння істотно впливає на швидкість проростання. За наявності мікротравм середня тривалість проростання зростає в середньому на 0,3–0,5 доби порівняно з цілим насінням, тоді як макротравми зумовлювали більш виражене уповільнення на 0,7–1,3 доби залежно від сорту та строку зберігання. Найбільші значення показника зафіксовано у варіантах із макротравмами та тривалим зберіганням (5 років), де середня тривалість проростання досягала 6,8 доби у сорту 'Царевич', 7,2 доби в 'Оплот' та 7,6 доби в 'Отаман'.

Аналіз сортових особливостей показує, що сорт 'Царевич' характеризується найменшою середньою тривалістю проростання в усіх варіантах дослідження, що свідчить про його вищу фізіологічну активність. Різниця між сортами за контрольних умов (1 рік, ціле насіння) становила 0,2–0,4 доби і перевищувала $НІР_{0,05}$ для фактора А (0,18), що підтверджує статистичну достовірність сортових відмінностей (табл. 3).

Визначено, що суттєвий вплив має взаємодія факторів, що підтверджується значенням $НІР_{0,05}$ для взаємодії АВС (0,35). Найбільш несприятливі умови (макротравми у поєднанні з тривалим зберіганням) призводили до максимального збільшення тривалості проростання, що вказує на кумулятивний негативний ефект зазначених чинників (табл. 3).

Таблиця 3. Середня тривалість проростання насіння гороху посівного залежно від тривалості зберігання та травмованості, діб

Сорт (А)	Тривалість зберігання (В)	Травмованість (С)		
		ціле насіння	мікротравми	макротравми
'Царевич'	1 рік	4,8 К	5,1	5,6
	3 роки	5,2	5,6	6,2
	5 років	5,8	6,3	6,8
'Оплот'	1 рік	5,0	5,3	5,9
	3 роки	5,4	5,8	6,5
	5 років	6,0	6,4	7,2
'Отаман'	1 рік	5,2	5,5	6,2
	3 роки	5,6	6,1	6,9
	5 років	6,3	6,8	7,6
$НІР_{0,05}$ Фактор А (сорт)			0,18	
Фактор В (тривалість зберігання)			0,22	
Фактор С (травмованість)			0,20	
Взаємодія АВС			0,35	

Визначення індексу швидкості проростання насіння гороху посівного залежно від тривалості зберігання та ступеня травмованості вказує, що про загальну тенденцію до зниження цього показника зі збільшенням строку зберігання та погіршенням фізичного стану насіння.

Досліджено, що у контрольному варіанті (ціле насіння, 1 рік зберігання) найвищі значення індексу швидкості проростання зафіксовано у сорту 'Царевич' – 18,5 ум. од., 'Оплот' і 'Отаман' вони становили 17,9 та 17,3 ум. од. відповідно. Різниця між сортами перевищує $НІР_{0,05}$ для фактора А (0,9), що свідчить про статистично достовірні сортові відмінності та вищу інтенсивність проростання у сорту 'Царевич' (табл. 4).

Встановлено істотний вплив тривалості зберігання (фактор В) на досліджуваний показник. Так, зі збільшенням строку зберігання до 5 років індекс швидкості проростання знижувався у сорту 'Царевич' до 14,6 ум. од., 'Оплот' – до 13,9 ум. од., 'Отаман' – до 13,2 ум. од. Зниження

показника порівняно зі свіжозібраним насінням перевищує $НІР_{0,05}$ для фактора В (1,1), що підтверджує істотність впливу старіння насіння на його фізіологічну активність.

Таблиця 4. Індекс швидкості проростання насіння гороху посівного залежно від тривалості зберігання та травмованості, ум. од.

Сорт (А)	Тривалість зберігання (В)	Травмованість (С)		
		ціле насіння	мікротравми	макротравми
'Царевич'	1 рік	18,5 К	17,2	15,6
	3 роки	16,8	15,4	13,8
	5 років	14,6	13,1	11,5
'Оплот'	1 рік	17,9	16,6	14,9
	3 роки	16,1	14,7	13,2
	5 років	13,9	12,5	10,9
'Отаман'	1 рік	17,3	16,0	14,2
	3 роки	15,5	14,1	12,6
	5 років	13,2	11,8	10,2
$НІР_{0,05}$ Фактор А (сорт)			0,9	
Фактор В (тривалість зберігання)			1,1	
Фактор С (травмованість)			0,8	
Взаємодія АВС			1,6	

Варто вказати, що травмованість насіння (фактор С) суттєво впливала на індекс швидкості проростання. За наявності мікротравм показник знижувався в середньому на 1,0–1,5 ум. од., тоді як макротравми спричиняли більш виражене зменшення – до 2,5–3,0 ум. од. порівняно з цілим насінням. Найнижчі значення індексу відмічено у варіантах із макротравмами та тривалим зберіганням (5 років), що свідчить про суттєве пригнічення процесів проростання.

Аналіз взаємодії факторів (АВС) показав, що поєднання тривалого зберігання та макротравм призводить до найбільшого зниження індексу швидкості проростання. Виявлені відмінності перевищують $НІР_{0,05}$ для взаємодії (1,6), що підтверджує статистичну значущість комплексного впливу досліджуваних чинників. Сорт 'Царевич' демонструє найвищі значення індексу швидкості проростання у всіх варіантах дослідження, що свідчить про його більш високу фізіологічну активність і кращу адаптивність до умов зберігання та травмування.

Дослідження вказують, що сорт 'Оплот' демонструє середні показники адаптивності. Так, свіжозібраному стані (1 рік) без травм його ІПП становить 17,9 ум. од., що лише на 0,6 ум. од. менше за контроль. Проте при тривалому зберіганні (5 років) у поєднанні з макротравмами цей показник знижується до 10,9 ум. од. (загальне падіння на 39,1% від початкового стану цілого насіння). Це вказує на помірну стійкість сорту до тривалого зберігання. Сорт 'Отаман' виявився найбільш чутливим до дії досліджуваних факторів. Початковий ІПП цілого насіння становив 17,3 ум. од. Найнижче значення в усьому експерименті зафіксовано саме у цього сорту при 5-річному зберіганні та наявності макротравм – 10,2 ум. од. Порівняно з початковим станом, швидкість проростання знизилася на 41%, що свідчить про вищу швидкість старіння та глибшу реакцію на механічні пошкодження зародка. 'Отаман' є найбільш вразливим сортом: різниця між ним і контролем ('Царевич') на 5-му році зберігання з макротравмами складає 1,3 ум. од., що перевищує похибку $НІР_{0,05}$ (0,8–0,9) (табл. 4).

Встановлено, що вологість насіння є динамічним показником, який зменшується зі збільшенням строку зберігання та під впливом механічних пошкоджень.

Досліджено, що у контрольному варіанті вміст води у сорту 'Царевич' становив 12,8%, 'Оплот' – 12,6%, 'Отаман' – 12,5% (табл. 5).

Результати вказують, що із збільшенням тривалості зберігання спостерігалось поступове зниження вмісту води в насінні. Так, після 3 років зберігання показник зменшувався в середньому до 11,5–11,9%, а після 5 років – до 10,2–10,8% залежно від сорту. Зниження вмісту води порівняно зі свіжозібраним насінням перевищує $НІР_{0,05}$ для фактора В (0,35), що підтверджує істотний вплив тривалості зберігання на водний баланс насіння.

Встановлено вплив ступеня травмованості і за наявності мікротравм вміст води знижувався 0,2–0,4%, тоді як макротравми зумовлювали більш помітне зменшення показника – до 0,5–0,9% порівняно з цілим насінням. Найнижчі значення вологості відмічено у варіантах із макротравмами та тривалим зберіганням (5 років), що пов'язано з порушенням цілісності оболонок і змінами у структурі насіння (табл. 5).

Таблиця 5. Вміст води в насінні гороху посівного залежно від тривалості зберігання та травмованості, %

Сорт (А)	Тривалість зберігання (В)	Травмованість (С)		
		ціле насіння	мікротравми	макротравми
'Царевич'	1 рік	12,8 К	12,6	12,3
	3 роки	11,9	11,6	11,2
	5 років	10,8	10,4	9,9
'Оплот'	1 рік	12,6	12,4	12,1
	3 роки	11,7	11,3	10,9
	5 років	10,5	10,1	9,6
'Отаман'	1 рік	12,5	12,3	12,0
	3 роки	11,5	11,1	10,7
	5 років	10,2	9,8	9,3
НІР _{0,05} Фактор А (сорт)			0,25	
Фактор В (тривалість зберігання)			0,35	
Фактор С (травмованість)			0,20	
Взаємодія АВС			0,55	

Встановлено, що рівень білка у проведених дослідженнях гороху посівного є варіабельним показником, який зазнає поступових змін під впливом умов зберігання та механічних пошкоджень насіння.

Найвищий рівень білку визначено у сорту 'Царевич' – 24,8%. 'Оплот' та 'Отаман' характеризувалися дещо нижчими показниками – 24,5 та 24,2% відповідно.

Дослідження вказують, що збільшення терміну зберігання до 5 років призвело до незворотного зниження вмісту білка в усіх варіантах досліджу. У цілому насінні (без травм) втрати становили 2,1–2,2%.

Дослідження вказують на значний вплив мікротравм і наявність тріщин насінневої оболонки спричиняє зниження вмісту білка на 0,5–0,8% порівняно з цілим насінням. Це зумовлено інтенсифікацією газообміну та прискоренням окиснювальних процесів у периферійних шарах сім'ядолей.

Результати тривалих досліджень підтверджують істотний вплив макротравм – пошкодження цілісності сім'ядолей та зародка призводить до найбільш глибоких біохімічних змін. У комбінації з 5-річним зберіганням вміст білка в 'Отаман' знизився до мінімального значення – 20,2%, що свідчить про втрату майже п'ятої частини вихідного білкового потенціалу.

Статистично (НІР_{0,05} АВС = 0,60) підтверджується значущість синергічного ефекту між часом зберігання та ступенем травмованості. Характерно, що наявність макротравм нівелює сортову стійкість: різниця між сортами за інтенсивного пошкодження стає мінімальною, що вказує на переважання фізичного руйнування над генетичним потенціалом адаптивності.

Таким чином, травмування насіння гороху посівного виступає потужним стресовим чинником, що скорочує період його біологічної придатності.

Найбільшу схильність до біохімічного старіння виявив сорт 'Отаман', тоді як 'Царевич' продемонстрував відносно вищу здатність до збереження білкового комплексу в умовах тривалого зберігання (табл. 6).

Встановлено, що вуглеводний компонент є основним складником насіння гороху посівного і характеризується відносною стабільністю, однак зазнає поступових змін під впливом досліджуваних факторів.

Таблиця 6. Загальний вміст білка в насінні гороху посівного залежно від тривалості зберігання та травмованості, %

Сорт (А)	Тривалість зберігання (В)	Травмованість (С)		
		ціле насіння	мікротравми	макротравми
'Царевич'	1 рік	24,8 К	24,3	23,5
	3 роки	23,9	23,2	22,4
	5 років	22,7	21,9	20,8
'Оплот'	1 рік	24,5	24,0	23,2
	3 роки	23,6	22,9	22,0
	5 років	22,3	21,5	20,5
'Отаман'	1 рік	24,2	23,7	22,9
	3 роки	23,3	22,6	21,7
	5 років	22,0	21,2	20,2
НІР _{0,05} Фактор А (сорт)			0,30	
Фактор В (тривалість зберігання)			0,40	
Фактор С (травмованість)			0,25	
Взаємодія АВС			0,60	

Вміст вуглеводів становив у 'Царевич' – 52,6%, 'Оплот' – 52,2%, 'Отаман' – 51,9%. Збільшення тривалості зберігання вказує на поступове зниження вмісту вуглеводів. Так, після 3 років зберігання показник зменшувався до 50,6–51,4%, а після 5 років – до 48,9–49,8% залежно від сорту. Зниження порівняно зі свіжозібраним насінням перевищує НІР_{0,05} для фактора В (0,55), що підтверджує істотний вплив тривалості зберігання на вуглеводний склад насіння. Це пов'язано з витратами запасних вуглеводів у процесах дихання та поступовими метаболічними змінами під час зберігання (табл. 7).

Таблиця 7. Загальний вміст вуглеводів у насінні гороху посівного залежно від тривалості зберігання та травмованості, %

Сорт (А)	Тривалість зберігання (В)	Травмованість (С)		
		ціле насіння	мікротравми	макротравми
'Царевич'	1 рік	52,6 К	52,1	51,3
	3 роки	51,4	50,7	49,8
	5 років	49,8	49,0	47,9
'Оплот'	1 рік	52,2	51,7	50,9
	3 роки	50,9	50,2	49,3
	5 років	49,2	48,5	47,4
'Отаман'	1 рік	51,9	51,4	50,6
	3 роки	50,6	49,9	49,0
	5 років	48,9	48,2	47,1
НІР _{0,05} Фактор А (сорт)			0,40	
Фактор В (тривалість зберігання)			0,55	
Фактор С (травмованість)			0,35	
Взаємодія АВС			0,75	

Досліджено, що ступінь травмованості впливає на вміст вуглеводів у варіантах із мікротравмами спостерігалось зниження показника в середньому на 0,4–0,8%, тоді як макротравми зумовлювали більш виражене зменшення – до 0,8–1,7% порівняно з цілим насінням. Найнижчі значення відмічено у варіантах із макротравмами після тривалого зберігання (5 років), що свідчить про інтенсифікацію процесів розпаду та використання вуглеводів у пошкодженому насінні.

Висновки

Встановлено, що енергія проростання та лабораторна схожість насіння гороху посівного істотно знижуються зі збільшенням тривалості зберігання та ступеня травмованості. У свіжому насінні ці показники становили 91–95%, після 5 років зберігання за наявності макротравм зменшувалися до 55–60%, що свідчить про суттєву втрату посівної придатності.

Індекс швидкості проростання характеризувався чіткою тенденцією до зниження від максимальних значень у свіжому цілому насінні до мінімальних у варіантах із макротравмами після 5 років зберігання, що вказує на уповільнення фізіологічних процесів проростання та зниження життєздатності насіння.

Вміст води в насінні зменшувався у процесі зберігання з 12,5–12,8% до 9,3–10,8% і найбільші втрати вологи були у травмованому насінні, де зниження перевищувало 2,0% порівняно з цілими зразками.

Загальний вміст білка в насінні знижувався з 24,2–24,8% у контролі до 20,2–22,7% після 5 років зберігання, а механічні пошкодження додатково зменшували цей показник на 0,5–1,5%, що свідчить про інтенсифікацію деградаційних процесів.

Вміст вуглеводів змінювався менш інтенсивно, однак також мав тенденцію до зниження – з 51,9–52,6% до 47,1–49,8% у процесі зберігання, причому макротравмоване насіння характеризувалося додатковим зменшенням на 0,8–1,7%.

Список використаних джерел

1. Savenko, V. O. (2024). *Improvement of elements of the cultivation technology of pea varieties* [Qualification thesis]. West Ukrainian National University, Ternopil. [In Ukrainian]
2. Zhuikov, O. H., & Lahutenko, K. V. (2017). Pea in Ukraine – status, problems, prospects (review). *Taurian Scientific Bulletin*, 98, 65–71. [In Ukrainian]
3. Telekalo, N. V. (2019). Influence of a complex of technological methods on pea cultivation. *Agriculture and Forestry*, 13, 84–93. [In Ukrainian]
4. Vozhehova, R. A., & Sorokunskyi, S. S. (2021). Seed productivity and adaptability parameters of pea varieties depending on inoculants and plant protection systems. *Agrarian Innovations*, 6, 82–86. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.6.14> [In Ukrainian]
5. Mazur, V. A., Didur, I. M., & Pansyryeva, H. V. (2020). Substantiation of the adaptive sorting technology of growing leguminous crops in the right-bank Forest Steppe of Ukraine. *Agriculture and Forestry*, 18, 5–16. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2020-3-1> [In Ukrainian]
6. Zakharchuk, V. V. (2025). Peculiarities of growth and development of field peas in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe. *Taurian Scientific Bulletin*, 141(1), 121–127. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.141.1.16> [In Ukrainian]
7. Dueholm, B., Grimberg, Å., Hefni, M., Witthöft, C., Hagström, G., & Hammenhag, C. (2025). Sensory screening of pea (*Pisum sativum* L.) seeds and correlations to seed quality. *Future Foods*, 12, Article 100691. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100691>
8. Rybalchenko, A. M., & Malchenko, Yu. Yu. (2024). Study of pea varieties by valuable economic traits under conditions of the Forest-Steppe of Ukraine. In *Modern aspects and technologies in plant protection* (pp. 108–111). Poltava State Agrarian University. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14534615> [In Ukrainian]
9. Koblai, S. V. (2016). Adaptive potential of pea varieties with different morphotypes under conditions of southern Ukraine. *Plant Breeding and Seed Production*, 110, 82–90. [In Ukrainian]
10. Kholod, S. M. (2019). Characteristics of different varieties of the pea (*Pisum sativum* L.) in the zone of the Southern Forest-Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection*, 15(2), 109–117. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.15.2.2019.173552> [In Ukrainian]
11. Orlov, S. D., Chernuskyi, V. V., & Balahura, O. V. (2024). Analysis of parametric states of breeding genotypes of pea (*Pisum sativum* L.) under different conditions of vegetation periods. *Bioenergy*, 2, 13–17. <https://doi.org/10.47414/be.2024.No2.pp13-17> [In Ukrainian]
12. Warkentin, T. D., Smykal, P., Coyne, C. J., Weeden, N., Domoney, C., Bing, D., et al. (2015). Pea (*Pisum sativum* L.). In A. M. De Ron (Ed.), *Grain legumes. Handbook of plant breeding* (pp. 37–83). Springer.
13. Cojocar, A., Carbune, R.-V., Teliban, G.-C., Stan, T., Mihalache, G., Rosca, M., Rusu, O.-R., Butnariu, M., & Stoleru, V. (2024). Physiological, morphological and chemical changes in pea seeds under different storage conditions. *Scientific Reports*, 14(1), Article 28191. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79115-6>

14. Ranganathan, U., & Groot, S. P. C. (2023). Seed longevity and deterioration. In *Seed Science and Technology* (pp. 91–108). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_5
15. Bishaw, Z., Niane, A. A., & Gan, Y. (2007). Quality seed production. In *Lentil* (pp. 349–383). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6313-8_21
16. Akyüz, S., Kizil Aydemir, E. S., & Ateş, S. (2025). Assessment of seed viability before and after storage in forage pea (*Pisum sativum* L. var. *arvense*) using field and laboratory methods. *Plants*, 14(18), Article 2872. <https://doi.org/10.3390/plants14182872>
17. Santos, C. S., Carbas, B., Castanho, A., Vasconcelos, M. W., Vaz Patto, M. C., Domoney, C., & Brites, C. (2019). Variation in pea (*Pisum sativum* L.) seed quality traits defined by physicochemical functional properties. *Foods*, 8(11), 570. <https://doi.org/10.3390/foods8110570>
18. Panwar, A., Mishra, A. C., & Negi, S. (2018). Correlation studies on seed quality, pod and seed yield in germplasm of pea (*Pisum sativum* L.). *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 9(1), 98–102. <https://doi.org/10.23910/IJBSM/2018.9.1.3C0753>
19. State Standard of Ukraine 4138:2002. (2003). *Seeds of agricultural crops. Methods for quality determination*. Derzhspozhyvstandart of Ukraine. [In Ukrainian]
20. International Seed Testing Association. (2023). *International rules for seed testing*. ISTA.
21. Copeland, L. O., & McDonald, M. B. (2001). *Principles of seed science and technology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1619-4>
22. Maguire, J. D. (1962). Speed of germination – aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2, 176–177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
23. State Standard of Ukraine ISO 712:2015. (2016). *Grain and grain products. Determination of moisture content*. UkrNDNC. [In Ukrainian]
24. State Standard of Ukraine ISO 5983-1:2014. (2015). *Animal feeding stuffs, compound feeds and grain. Determination of nitrogen content and calculation of crude protein content by the Kjeldahl method*. UkrNDNC. [In Ukrainian]
25. Osborne, D. R., & Voogt, P. (1978). *The analysis of nutrients in foods*. Academic Press.
26. State Standard of Ukraine ISO 6492:2001. (2002). *Animal feeding stuffs. Determination of fat content*. State Standard of Ukraine. [In Ukrainian]
27. State Standard of Ukraine ISO 2171:2010. (2011). *Grain and processed grain products. Determination of ash content*. UkrNDNC. [In Ukrainian]
28. Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis*. Pearson.

Assessment of adaptive stability of pea varieties depending on seed damage and storage duration

L. M. Kononenko*, D. I. Kamianchenko

Uman National University, 1 Instytutska St., Uman, Cherkasy region, 20305, Ukraine

*Corresponding author: Lidiia Kononenko, lidiyakononenko@ukr.net

Citation: Kononenko, L. M., & Kamianchenko, D. I. (2026). Assessment of adaptive stability of pea varieties depending on seed damage and storage duration. *Bioenergy*, 1, 38–49. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp38-49>

Aim. To assess the adaptive stability of pea (*Pisum sativum* L.) varieties depending on the degree of seed damage and storage duration, and to determine their effects on seed quality indicators and sowing properties. **Methods.** The study was based on a three-factor laboratory experiment conducted in 2022–2026. The objects of research were the pea varieties ‘Tsarevych’, ‘Oplot’, and ‘Otaman’. The experimental design included the effects of varietal characteristics (factor A), storage duration from 1 to 5 years (factor B), and degree of seed damage (intact seeds, micro-damage, and macro-damage) (factor C). Sowing qualities and biochemical parameters were determined in accordance with the DSTU 4138-2002 and relevant ISO standards. **Results.** The highest adaptive potential was observed in the variety ‘Tsarevych’, which exhibited a germination energy of 95% in the control treatment, whereas this value reached 93% in ‘Oplot’ and 91% in ‘Otaman’. With an increase in storage duration to 5 years, germination energy declined to 80% in ‘Tsarevych’ and to 76% in ‘Otaman’, and in the presence of macro-damage decreased further to 60% and 55%, respectively. Laboratory ermination followed a similar pattern, declining from 96–92% in freshly harvested seed

to 84–78% in intact samples after 5 years of storage and to 62–68% in the treatments with macro-damage. The mean germination period increased from 4.8–5.2 days in fresh seed to 5.8–6.3 days after 5 years of storage, reaching 6.8–7.6 days under macro-damage. Conversely, germination rate decreased from 18.5–17.3 in the control to 14.6–13.2 in intact samples after 5 years of storage and to 10.2–11.5 in damaged seed. Seed moisture content declined from 12.5–12.8% to 9.3–10.8%, depending on variety and storage conditions, with damaged seed losing up to an additional 0.9% moisture. Total protein content decreased from 24.2–24.8% to 20.2–22.7%, while macro-damage intensified protein losses by a further 0.5–1.5%. Carbohydrate content was more stable; however, it also declined from 51.9–52.6% to 47.1–49.8%, with an additional reduction of 0.8–1.7% in damaged seed. **Conclusions.** The variety ‘Tsarevych’ demonstrated the highest adaptive stability to the studied factors, maintaining superior sowing quality and biochemical composition throughout the storage period. Mechanical damage and prolonged storage exerted a cumulative negative effect, substantially reducing seed viability and germination intensity. The results indicate the necessity of using intact seed material and limiting storage duration in order to preserve the high biological potential of field pea crops.

Keywords: germination; seed viability; proteins; carbohydrates; storage.

ORCID

Лідія Кононенко / Lidiia Kononenko

Дмитро Кам'янченко / Dmytro Kamianchenko

<https://orcid.org/0000-0001-7037-2692>

<https://orcid.org/0009-0006-0837-7656>

УДК 633.11«324»:631.5:620.9

Енергетична ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та технологічних факторів

Н. О. Кононюк 

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

Автор для листування: Надія Кононюк, nadiyakononuk@ukr.net

Цитування: Кононюк Н. О. Енергетична ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та технологічних факторів. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 50–58. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp50-58>

Мета. Визначити енергетичну ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та впливу технологічних факторів. **Методи.** Польові дослідження проводили в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (50.023194, 30.173895) упродовж 2020–2024 рр. **Результати.** Загальні енерговитрати на вирощування пшениці озимої становили 53,0–83,0 ГДж/га залежно від інтенсивності технології. У структурі витрат домінували дві статті: виробництво та внесення добрив (44,5–51,1%) і сушіння зерна (37,6–39,9%), які сумарно становили 83,8–88,7% загальних енерговитрат. А підвищення рівня удобрення від мінімального (N₆₀P₄₀K₄₀) до максимального (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + мікро) призводило до зростання енерговитрат на 57% при збільшенні врожайності лише на 31%. Коефіцієнт енергетичної ефективності (К_е) знижувався з 3,02 до 2,68 (–11,3%), енергоємність зростала з 9,91 до 11,11 ГДж/т (+12,1%). Причому, перехід від мінімального до середнього рівня удобрення практично не знижував К_е (від 3,02 до 3,01), тоді як подальше підвищення до максимального рівня спричиняло різке зниження ефективності (з 3,01 до 2,68). Середній рівень удобрення є енергетично оптимальним компромісом. **Висновки.** Реакція сортів на інтенсифікацію суттєво відрізнялася: сорт інтенсивного типу зберігав високий К_е навіть за максимального удобрення, тоді як універсальний сорт демонстрував різке зниження ефективності (–17% К_е). Це визначає диференційований підхід до вибору технології залежно від сорту. А системи захисту рослин (хімічний / біологічний) та ретарданти (МОДДУС 250 ЕС / Квантум-Аквасил) мали незначний вплив на енергетичну ефективність – різниця К_е становила 0,05–0,07, що знаходиться на межі достовірності. Оптимальним варіантом технології за енергетичною ефективністю є: сорт 'Легенда білоцерківська' + середній рівень удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) + хімічний захист + ретардант МОДДУС 250 ЕС, який забезпечує К_е 3,23, енергоємність 9,20 ГДж/т та приріст енергії 174,1 ГДж/га.

Ключові слова: сортовий склад; структура енерговитрат; К_е; біологічний захист; рівень удобрення.

Вступ

Пшениця озима є провідною продовольчою культурою України, яка займає близько 6–7 млн га посівних площ і забезпечує понад 50% валового збору зернових культур [1, 2]. В умовах сучасного аграрного виробництва, що характеризується зростанням вартості енергоносіїв та необхідністю адаптації до кліматичних змін, особливої актуальності набуває оптимізація технологій вирощування з урахуванням енергетичної ефективності [3, 4].

Енергетичний аналіз технологій вирощування сільськогосподарських культур є об'єктивним інструментом оцінки ефективності використання ресурсів, оскільки на відміну від еконо-

Одержано 05.02.2026 • Погоджено 28.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026

© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.



мічного аналізу не залежить від коливань ринкових цін [5, 6]. Водночас енергетична оцінка дозволяє виявити найбільш енергоємні елементи технології та визначити напрями оптимізації виробництва [7].

Виробництво мінеральних добрив, особливо азотних, є одним із найбільш енергоємних процесів у сільському господарстві. За даними Fertilizers Europe, на виробництво та внесення азотних добрив припадає близько 52% загальних енерговитрат при вирощуванні пшениці [8]. Процес Габера – Боша, що лежить в основі синтезу аміаку, потребує значних витрат природного газу – близько 35 ГДж на тонну азоту [9, 10].

Численні дослідження свідчать, що підвищення доз азотних добрив не завжди супроводжується пропорційним зростанням урожайності, що призводить до зниження коефіцієнта енергетичної ефективності (К_е) [11, 12]. За даними Neugschwandtner et al. [13], при вирощуванні пшениці озимої в умовах Паннонського регіону (Австрія) система мінімального обробітку забезпечувала найвищу енергетичну ефективність порівняно з традиційною оранкою.

Важливим аспектом є врахування сортових особливостей реакції рослин на інтенсифікацію технології. Сорти інтенсивного типу характеризуються вищим потенціалом урожайності та здатністю ефективніше використовувати підвищені дози добрив, тоді як універсальні та посухостійкі сорти можуть демонструвати знижену віддачу від інтенсифікації [14, 15].

В Україні дослідження енергетичної ефективності вирощування зернових культур проводились Компанійцем В. О. зі співавторами [16], Центило Л. В. та ін. [17], Гангуром В. В. [18]. Однак комплексне вивчення енергетичної ефективності вирощування пшениці озимої залежно від сорту, системи удобрення, захисту рослин та застосування ретардантів залишається недостатньо дослідженим.

Сушіння зерна є ще одним енергоємним процесом, на який припадає 35–40% загальних енерговитрат при вирощуванні зернових культур [19, 20]. Впровадження енергоефективних технологій сушіння та збирання зерна при нижчій вологості може суттєво знизити енергоємність виробництва [21].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації технологій вирощування пшениці озимої з урахуванням енергетичних витрат в умовах зростання цін на енергоносії та добрива. Комплексний підхід до оцінки енергетичної ефективності різних варіантів технології дозволить обґрунтувати рекомендації для виробництва.

Мета дослідження – установити енергетичну ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та впливу технологічних факторів (рівня удобрення, системи захисту рослин, застосування ретардантів) в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження проводили в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (50.023194, 30.173895) упродовж 2020–2024 рр.

Методика енергетичної оцінки базувалася на визначенні сукупних витрат енергії на всі елементи технології вирощування пшениці озимої та зіставленні їх з енергією, накопиченою в урожаї. Енергетичні еквіваленти матеріальних ресурсів та технологічних операцій прийнято згідно з галузевими нормативами та методичними рекомендаціями [21, 22].

Для оцінки енергетичної ефективності використовували систему показників: загальні енерговитрати (ГДж/га), валова енергія врожаю (ГДж/га), коефіцієнт енергетичної ефективності (К_е), приріст енергії (ГДж/га) та енергоємність продукції (ГДж/т). К_е розраховували як відношення валової енергії врожаю до сукупних енерговитрат; значення К_е > 1 свідчить про енергетичну доцільність технології, К_е > 2 – про високу ефективність, К_е > 3 – про дуже високу ефективність.

Валову енергію врожаю визначали з урахуванням енергетичної цінності основної (зерно) та побічної (солома, полова) продукції. Енергетичний еквівалент зерна пшениці становить 14,5 МДж/кг, соломи – 14,0 МДж/кг (при співвідношенні зерно:солома = 1:1), полови – 12,5 МДж/кг (10% від маси зерна). Таким чином, валова енергія 1 т зерна з побічною продукцією становить близько 29,75 ГДж.

Результати дослідження

Виробництво мінеральних добрив є одним з найбільш енергоємних процесів у сільському господарстві. Особливо енергоємним є синтез азотних добрив, що базується на процесі Габера – Боша і потребує значних затрат природного газу. За нашими розрахунками, на виробництво та внесення добрив припадає 44–51% загальних енерговитрат на вирощування пшениці озимої залежно від схеми удобрення.

У дослідженнях застосовували три схеми удобрення різної інтенсивності, що відповідають різним рівням планової врожайності та інтенсивності технології загалом.

Таблиця 1. Енерговитрати на системи удобрення пшениці м'якої озимої

Препарат	Мінімальна	Середня	Максимальна
Нітроамофоска 16:16:16	11875	17813	–
Аміачна селітра	11715	–	–
Суперфосфат	–	–	5000
Калій хлористий	–	–	1350
Сульфат амонію	–	–	12 100
КАС-32 (сумарно)	–	9864	17 688
Карбамід (позакоренево)	–	2343	5467
Мікродобрива та стимулятори	–	240	850
Всього, МДж/га	23 590	30 260	42 455
Доза NPK	N ₆₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₁₂₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₁₈₀ P ₉₀ K ₉₀

Мінімальна схема удобрення (N₆₀P₄₀K₄₀) передбачала внесення нітроамофоски (250 кг/га) під основний обробіток ґрунту та весняне підживлення аміачною селітрою (150 кг/га). Загальні енерговитрати на добрива становили 23 590 МДж/га, що є базовим рівнем для порівняння.

Середня схема удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) включала підвищену дозу нітроамофоски (375 кг/га), дробне внесення азоту у вигляді КАС-32 у два строки (рано весною та на початку виходу в трубку), позакореневе підживлення карбамідом та мікродобрива. Енерговитрати зросли до 30 260 МДж/га (+28% до мінімальної).

Максимальна схема удобрення (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + мікроелементи) передбачала повну систему удобрення з роздільним внесенням фосфорних (суперфосфат) і калійних (калій хлористий) добрив, багаторазовим азотним підживленням (сульфат амонію + КАС-32 у три строки + карбамід позакоренево двічі), комплексом мікроелементів (Zn, Cu, B, Mn, Mo) та амінокислотними стимуляторами. Енерговитрати досягли 42 455 МДж/га (+80% до мінімальної схеми).

Аналіз структури енерговитрат на добрива показав, що найбільш енергоємними є азотні добрива, на які припадає 78–85% витрат енергії в системі удобрення. Це пояснюється високою енергоємністю виробництва аміаку (процес Габера – Боша потребує ~ 35 ГДж на тонну азоту). Фосфорні добрива становлять 10–12%, калійні – 3–5% енерговитрат системи удобрення.

Окрім добрив, значні витрати енергії пов'язані з обробітком ґрунту, підготовкою та внесенням насіння, захистом рослин, збиранням урожаю та післязбиральною доробкою зерна. Систематизація цих витрат дозволяє визначити резерви енергозбереження на кожному етапі технології.

Загальні енерговитрати на обробіток ґрунту становили 1630 МДж/га, що складає лише 2–3% загальних витрат енергії. Найбільш енергоємною операцією є оранка (850 МДж/га, або 52% витрат на обробіток), що обумовлено значними тяговими зусиллями при обертанні скиби на глибину 20–22 см. Перехід на мінімальний або нульовий обробіток дозволив би зменшити ці витрати на 40–60%, проте в умовах досліду застосовували традиційну систему обробітку.

Виробництво насінневого матеріалу є досить енергоємним процесом – 4070 МДж/га при нормі висіву 220 кг/га (18,5 МДж/кг). Ця стаття включає витрати на вирощування, очищення, калібрування і зберігання насіння. Операція сівби (250 МДж/га) і протруювання (65 МДж/га) є менш енергоємними. Загалом насінневий комплекс становить 5–8% загальних енерговитрат.

Енерговитрати на захист рослин включають механічні операції обприскування (225–315 МДж/га залежно від кількості обробок) та енергію на виробництво пестицидів (990–1110 МДж/га). Загалом захист рослин становить 1,5–2,5% енерговитрат. Біологічний захист є

дещо менш енергоємним через нижчу енергоємність виробництва біопрепаратів порівняно з хімічними пестицидами.

Таблиця 2. Енерговитрати на елементи технології вирощування пшениці озимої

Елемент технології	МДж/га	Примітка
Обробіток ґрунту		
Лушення стерні	220	8–10 см
Оранка	850	20–22 см
Культивація передпосівна	320	6–8 см
Коткування	130	
Боронування весняне	110	
Разом обробіток	1630	
Сівба		
Операція сівби	250	
Насіння (виробництво)	4070	220 кг/га
Протруювання насіння	65	
Разом сівба	4385	
Захист рослин		
Обприскування (5–7 обробок)	225–315	45 МДж/обробка
Пестициди (виробництво)	990–1110	
Збирання та доробка		
Збирання комбайном	760–1330	190 МДж/т
Транспортування	270–408	54 МДж/т
Сушіння зерна	20 812–31 218	4450 МДж/т

Сушіння зерна це найбільш енергоємна операція після системи удобрення. За нормативами, зниження вологості зерна на 1% потребує близько 1480 МДж/т. При типовому зниженні вологості на 3% (з 17 до 14%) та врожайності 4–7 т/га енерговитрати на сушіння становлять 20,8–31,2 ГДж/га, або 37–40% загальних витрат. Це обумовлено високими затратами теплової енергії на випаровування вологи та роботу вентиляційних систем сушарок.

Загальні енерговитрати на вирощування пшениці озимої формуються з витрат на всі елементи технології і суттєво залежать від рівня інтенсифікації. Аналіз структури витрат дозволяє визначити основні статті та напрями оптимізації енергоспоживання.

Таблиця 3. Структура загальних енерговитрат за схемами удобрення пшениці озимої

Стаття витрат	Мін.	%	Серед.	%	Макс.	%
Добрива	23 590	44,5	30 260	46,4	42 455	51,1
Обробіток ґрунту	1980	3,7	1980	3,0	1980	2,4
Насіння	4070	7,7	4070	6,2	4070	4,9
Сівба	315	0,6	315	0,5	315	0,4
Захист (операції)	225	0,4	225	0,4	315	0,4
Пестициди	990	1,9	990	1,5	1110	1,3
Збирання	760	1,4	950	1,5	1140	1,4
Транспортування	270	0,5	340	0,5	408	0,5
Сушіння	20 812	39,3	26 015	39,9	31 218	37,6
Всього, МДж/га	53 012	100	65 145	100	83 011	100

Загальні енерговитрати зростали від 53,0 ГДж/га за мінімальної схеми удобрення до 83,0 ГДж/га за максимальної, тобто на 57%. При цьому приріст урожайності становив лише 31% (з 6,0 до 7,9 т/га), що свідчить про зниження енергетичної віддачі при підвищенні інтенсивності технології.

У структурі енерговитрат за всіма схемами домінують дві статті: добрива (44,5–51,1%) та сушіння зерна (37,6–39,9%), які сумарно становлять 83,8–88,7% загальних витрат енергії. Частка добрив зростає з підвищенням інтенсивності удобрення, тоді як відносна частка сушіння дещо знижується, хоча в абсолютних величинах збільшується.

Виявлені закономірності визначають основні напрями енергозбереження: оптимізація доз азотних добрив з урахуванням реальної потреби рослин (використання ґрунтової та рослинної діагностики), застосування повільнодіючих форм добрив, впровадження енергоефективних технологій сушіння (рекуперація тепла, використання альтернативних джерел енергії), а також збирання зерна при нижчій вологості для зменшення потреби в сушінні.

Енергетичну ефективність технології оцінювали за коефіцієнтом енергетичної ефективності (K_{ee}), який показує, скільки одиниць енергії накопичується в урожаї на кожну одиницю витраченої енергії. Аналіз проведено для всіх 36 варіантів повнофакторного дослідження з урахуванням впливу сорту, рівня удобрення, системи захисту та ретарданту.

Таблиця 4. Енергетичні показники вирощування пшениці озимої залежно від рівня удобрення (середнє за 2020–2024 рр.)

Рівень удобрення	Урожайність, т/га	Енерговитрати, ГДж/га	Валова, ГДж/га	K_{ee}	Енергоємність, ГДж/т
Мінімальне (N_{60})	6,03	59,3	179,3	3,02	9,91
Середнє (N_{120})	7,25	71,6	215,8	3,01	9,97
Максимальне (N_{180})	7,91	87,9	235,2	2,68	11,11
$НІР_{0,05}$	0,24	–	–	0,08	0,35

Підвищення інтенсивності удобрення від мінімального до максимального рівня призвело до закономірного зниження енергетичної ефективності. K_{ee} знижувався з 3,02 (мінімальне) до 2,68 (максимальне), тобто на 11,3%. Енергоємність виробництва 1 т зерна зростала з 9,91 до 11,11 ГДж/т (+12,1%). Це пояснюється тим, що приріст урожайності (+31%) не компенсував зростання енерговитрат (+48% на добрива, +57% загалом).

Характерно, що перехід від мінімального до середнього рівня удобрення практично не знижував K_{ee} (від 3,02 до 3,01), тоді як подальше підвищення до максимального рівня спричиняло різке зниження ефективності (від 3,01 до 2,68). Це підтверджує енергетичну доцільність середнього рівня удобрення як оптимального компромісу між продуктивністю та ефективністю використання ресурсів.

Таблиця 5. Енергетичні показники вирощування пшениці озимої залежно від сорту (середнє за 2020–2024 рр.)

Сорт (тип)	Урожайність, т/га	Енерговитрати, ГДж/га	K_{ee}	Приріст, ГДж/га	Енергоємність, ГДж/т
‘Легенда білоцерківська’ (інтенс.)	7,93	77,0	3,08	159,0	9,68
‘Воздвиженка’ (посухостійкий)	6,73	71,4	2,82	128,8	10,57
‘Манера одеська’ (універс.)	6,53	70,4	2,78	125,2	10,75
$НІР_{0,05}$	0,24	–	0,07	–	0,31

Найвищу енергетичну ефективність забезпечував сорт інтенсивного типу ‘Легенда білоцерківська’ з K_{ee} 3,08 та енергоємністю 9,68 ГДж/т. Перевага цього сорту над іншими становила 9–11% за K_{ee} , що є статистично достовірним ($НІР_{0,05} = 0,07$). Високий K_{ee} сорту ‘Легенда білоцерківська’ формувався завдяки найвищій урожайності (7,93 т/га), яка забезпечувала більший вихід енергії при порівнянних витратах.

Посухостійкий сорт ‘Воздвиженка’ та універсальний сорт ‘Манера одеська’ мали близькі показники K_{ee} (2,82 та 2,78 відповідно), різниця між ними недостовірна. Нижча енергетична ефективність цих сортів пояснюється меншою врожайністю при порівнянних енерговитратах. Приріст енергії на 1 га у сорту ‘Легенда білоцерківська’ становив 159,0 ГДж, що на 23–27% більше, ніж у інших сортів.

Біологічний захист з використанням біофунгіциду ТАЕГРО характеризувався нижчими енерговитратами (71,9 проти 74,0 ГДж/га), проте через меншу врожайність K_{ee} був дещо нижчим (2,86 проти 2,93). Різниця K_{ee} становила 0,07, що знаходиться на межі достовірності. Таким чином, з енергетичної точки зору обидві системи захисту є практично рівноцінними.

Таблиця 6. Енергетичні показники залежно від системи захисту та ретарданту

Фактор / варіант	Енерговитрати, ГДж/га	Кее	Енергоємність, ГДж/т	± до контролю
Система захисту				
Хімічний захист (контроль)	74,0	2,93	10,20	–
Біологічний захист (ТАЕГРО)	71,9	2,86	10,46	–0,07
Ретарданти				
МОДДУС 250 ЕС (контроль)	73,5	2,92	10,28	–
Квантум-Аквазил	72,4	2,87	10,38	–0,05

Застосування біологічного препарату Квантум-Аквазил порівняно з хімічним ретардантом МОДДУС 250 ЕС зменшувало енерговитрати на 1,1 ГДж/га, проте дещо знижувало Кее (2,87 проти 2,92) через меншу ефективність у запобіганні вилягання та, відповідно, нижчу врожайність. Різниця є несуттєвою (0,05), що свідчить про можливість заміни хімічного ретарданту біологічним без значних втрат енергетичної ефективності.

Реакція сортів різних біологічних типів на інтенсифікацію технології суттєво відрізнялася, що визначало оптимальні варіанти для кожного сорту з енергетичної точки зору.

Таблиця 7. Енергетичні показники сорту інтенсивного типу 'Легенда білоцерківська'

Удобрення	Захист	Рет.	Урож.	Енерговитр.	Кее	Енергоємн.
Мінімальне	Хім	КВ	6,73	63,0	3,18	9,36
Мінімальне	Хім	МОД	6,94	64,0	3,22	9,23
Середнє	Хім	КВ	8,14	76,3	3,17	9,38
Середнє	Хім	МОД	8,47	77,9	3,23	9,20
Максимальне	Хім	КВ	9,11	93,0	2,91	10,22
Максимальне	Хім	МОД	9,50	94,9	2,98	9,99

Сорт інтенсивного типу 'Легенда білоцерківська' характеризувався найвищими показниками Кее серед досліджуваних сортів при всіх рівнях удобрення. Діапазон Кее становив 2,85–3,23 залежно від варіанту технології. Найвищий Кее (3,23) зафіксовано за середнього рівня удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) з хімічним захистом та ретардантом МОДДУС 250 ЕС при урожайності 8,47 т/га.

Особливістю сорту є відносно помірне зниження КЕЕ при переході до максимального удобрення (–8% порівняно з середнім), що свідчить про здатність сорту ефективно використовувати підвищені дози добрив. Приріст урожайності від середнього до максимального рівня удобрення (+12%) частково компенсував зростання енерговитрат (+22%), що робить максимальне удобрення енергетично прийнятним для цього сорту в умовах високих цін на зерно.

Сорт універсальний високопластичний 'Манера одеська' показав найнижчу енергетичну ефективність серед досліджуваних сортів. Кее коливався від 2,49 до 2,96. Характерною особливістю є різке зниження Кее при максимальному удобренні – на 13–17% порівняно з середнім рівнем. Це свідчить про те, що сорт не здатний ефективно реалізувати підвищений рівень живлення, і максимальне удобрення є енергетично недоцільним.

Найнижчий Кее (2,49) зафіксовано за максимального удобрення з біологічним захистом, що є абсолютним мінімумом по досліді. Оптимальним для цього сорту є мінімальний рівень удобрення (Кее 2,88–2,96), який забезпечує найвищу енергетичну ефективність при прийнятній врожайності.

Посухостійкий сорт 'Воздвиженка' займав проміжне положення між інтенсивним і універсальним сортами. Кее становив 2,54–2,99. Характерною особливістю є помірна реакція на інтенсифікацію – зниження Кее від мінімального до максимального удобрення становило 10–12%, що менше, ніж у 'Манери одеської', але більше, ніж у 'Легенди білоцерківської'. Оптимальним для 'Воздвиженка' є середній рівень удобрення (Кее 2,87–2,96), який забезпечує баланс між продуктивністю та енергоефективністю. Максимальне удобрення призводить до невиправданого зростання енергоємності (до 11,7 ГДж/т) без адекватного приросту врожаю.

Висновки

Загальні енерговитрати на вирощування пшениці озимої становили 53,0–83,0 ГДж/га залежно від інтенсивності технології. У структурі витрат домінували дві статті: виробництво та внесення добрив (44,5–51,1%) і сушіння зерна (37,6–39,9%), які сумарно становили 83,8–88,7% загальних енерговитрат.

Підвищення рівня удобрення від мінімального (N₆₀P₄₀K₄₀) до максимального (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + мікро) призводило до зростання енерговитрат на 57% при збільшенні врожайності лише на 31%. К_{ее} знижувався з 3,02 до 2,68 (–11,3%), енергоємність зростала з 9,91 до 11,11 ГДж/т (+12,1%).

Перехід від мінімального до середнього рівня удобрення практично не знижував К_{ее} (від 3,02 до 3,01), тоді як подальше підвищення до максимального рівня спричинило різке зниження ефективності (від 3,01 до 2,68). Середній рівень удобрення є енергетично оптимальним компромісом.

Сорт інтенсивного типу ‘Легенда білоцерківська’ забезпечував найвищу енергетичну ефективність (К_{ее} 3,08, енергоємність 9,68 ГДж/т), що на 9–11% вище за інші сорти. Перевага формувалася завдяки найвищій урожайності при порівнянних енерговитратах.

Реакція сортів на інтенсифікацію суттєво відрізнялася: сорт інтенсивного типу зберігав високий К_{ее} навіть за максимального удобрення, тоді як універсальний сорт демонстрував різке зниження ефективності (–17% К_{ее}). Це визначає диференційований підхід до вибору технології залежно від сорту.

Системи захисту рослин (хімічний / біологічний) та ретарданти (МОДДУС 250 ЕС / Квантум-Аквасил) мали незначний вплив на енергетичну ефективність – різниця К_{ее} становила 0,05–0,07, що знаходиться на межі достовірності.

Оптимальним варіантом технології за енергетичною ефективністю є: сорт ‘Легенда білоцерківська’ + середній рівень удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) + хімічний захист + ретардант МОДДУС 250 ЕС, який забезпечує К_{ее} 3,23, енергоємність 9,20 ГДж/т та приріст енергії 174,1 ГДж/га.

Отже, основними напрямками енергозбереження є: оптимізація доз азотних добрив з урахуванням реальної потреби рослин (до 50% економії на добривах), впровадження енергоефективних технологій сушіння, збирання зерна при нижчій вологості, а також вибір високоврожайних сортів інтенсивного типу.

Список використаних джерел

1. State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Crop production of Ukraine 2023: Statistical collection*. Kyiv, Ukraine. [In Ukrainian]
2. Bazhal, M., & Koutchma, T. (2022). Ukraine as a food and grain hub: Impact of science and technology development on food security in the world. *Frontiers in Food Science and Technology*, 2, Article 1040396. <https://doi.org/10.3389/frfst.2022.1040396>
3. Halecki, W., & Bedla, D. (2022). Global wheat production and threats to supply chains in a volatile climate change and energy crisis. *Resources*, 11(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/resources11120118>
4. Skrypnyk, A., Klymenko, N., Tuzhyk, K., Galaieva, L., & Rohoza, K. (2021). Prerequisites and prospects for sustainable development of grain production in Ukraine. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 7(2), 50–70. <https://doi.org/10.51599/are.2021.07.03.06> [In Ukrainian]
5. Ashraf, M., Mahmood, M., Sultan, M., et al. (2020). Investigation of input and output energy for wheat production: A comprehensive study for Tehsil Mailsi (Pakistan). *Sustainability*, 12(17), Article 6884. <https://doi.org/10.3390/su12176884>
6. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39–51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
7. Smil, V. (2008). *Energy in nature and society: General energetics of complex systems*. MIT Press.
8. Fertilizers Europe. (2019). *Harvesting energy with fertilizers: Sustainable agriculture in Europe*. Fertilizers Europe. <https://www.fertilizerseurope.com>
9. Küsters, J., & Lammel, J. (1999). Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe. *European Journal of Agronomy*, 11(1), 35–43. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00015-5)
10. Gellings, C. W., & Parmenter, K. E. (2004). Energy efficiency in fertilizer production and use. In *Efficient use and conservation of energy. Encyclopedia of life support systems (EOLSS)* (pp. 123–136). EOLSS Publishers.

11. Fadavi, R., Keyhani, A., & Mohtasebi, S. S. (2011). An analysis of energy use, input costs and relation between energy inputs and yield of apple orchard. *Research in Agricultural Engineering*, 57(3), 88–96. <https://doi.org/10.17221/0/2010-RAE>
12. Conforti, P., & Giampietro, M. (1997). Fossil energy use in agriculture: An international comparison. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 65(3), 231–243. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00048-0)
13. Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P., & Wagentristl, H. (2019). Energy efficiency of winter wheat in a long-term tillage experiment under Pannonian climate conditions. *European Journal of Agronomy*, 103, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.11.002>
14. Korkhova, M., Panfilova, A., Domaratskiy, Y., & Smirnova, I. (2023). Productivity of winter wheat (*T. aestivum*, *T. durum*, *T. spelta*) depending on varietal characteristics in the context of climate change. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24, 236–244. <https://doi.org/10.12912/27197050/163124>
15. Vozhegova, R. A., & Serhieiev, L. A. (2018). Photosynthetic activity of seed wheat sows of winter dependence on fertilization and protection of plants under the conditions of the south of Ukraine. *Scientific Reports of NULES of Ukraine*, 2(72). https://scireports.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Vol.%2072,%20No.%202,%202018.pdf [In Ukrainian]
16. Kompaniiets, V. O., Zheliazkov, O. I., & Kulyk, A. O. (2014). Methodology of energy evaluation of grain production technologies. *Bulletin of the Institute of Agriculture of the Steppe Zone of NAAS of Ukraine*, 6, 118–124. [In Ukrainian]
17. Tsentylo, L. V., Tsiuk, O. A., & Melnyk, V. I. (2019). Energy efficiency of growth transport and processing systems. *Bioresources and Nature Management*, 11(3–4), 90–96. <https://doi.org/10.31548/bio2019.03.010>
18. Hangur, V. V., & Kosminskyi, O. O. (2024). Bioenergetic assessment of the efficiency of different levels of mineral nutrition in sunflower cultivation technology. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 1, 55–64. [In Ukrainian]
19. Pimentel, D. (2009). Energy inputs in food crop production in developing and developed nations. *Energies*, 2(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en20100001>
20. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133(3–4), 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
21. Tarariko, O. Yu. (Ed.). (2005). *Bioenergetic evaluation of agricultural production*. Agrarna nauka [In Ukrainian]
22. Hülsbergen, K. J., Feil, B., Biermann, S., Rathke, G. W., Kalk, W. D., & Diepenbrock, W. (2001). A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 86(3), 303–321. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00286-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00286-3)

Energy efficiency of winter bread wheat cultivation depending on variety and technological factors

N. O. Kononiuk

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine
Corresponding author: Nadiia Kononiuk, nadiyakononuk@ukr.net

Citation: Kononiuk, N. O. (2026). Energy efficiency of winter bread wheat cultivation depending on variety and technological factors. *Bioenergy*, 1, 50–58. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp50-58>

Aim. To assess the energy efficiency of winter bread wheat cultivation depending on varietal characteristics and the influence of technological factors. **Methods.** Field experiments were conducted in 2020–2024 in the zone of unstable moisture of the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine at the experimental field of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (50.023194, 30.173895). Energy efficiency indicators were calculated under different levels of fertilisation and agronomic management. **Results.** Total energy inputs for winter wheat cultivation ranged from 53.0 to 83.0 GJ/ha, depending on technology intensity. The cost structure was dominated by two components: fertiliser production and application (44.5–51.1%) and grain drying (37.6–39.9%), which together accounted for 83.8–88.7% of total energy input. Increasing the fertilisation rates from the minimum (N₆₀P₄₀K₄₀) to the maximum (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + micronutrients) resulted in a 57% increase in energy inputs, while grain yield increased by only 31%. Energy efficiency declined from 3.02 to 2.68 (–11.3%), while energy intensity increased from 9.91 to 11.11 GJ/t (+12.1%). The transition from the minimum to the medium fertilisation rates had virtually no effect on energy efficiency (3.02 to 3.01); however, further intensification to the maximum rates caused a pronounced decline in energy efficiency (from 3.01 to 2.68). Thus, the medium fertilisation rates represent an energetically optimal compromise. **Conclusions.** Cultivar response to

intensification differed markedly. An intensive-type cultivar maintained a high energy efficiency even under maximum fertilisation rates, whereas a universal-type cultivar showed a sharp reduction in efficiency (–17%), indicating the need for a differentiated, variety-specific technological approach. Plant protection systems (chemical vs biological) and the use of growth retardants (Moddus 250 EC/ Quantum-AquaSil) had only a minor effect on energy efficiency, with the differences of 0.05–0.07, which is close to the threshold of statistical significance. The optimal technological option in terms of energy efficiency was identified as the combination of the cultivar ‘Lehenda Bilotserkivska’ with medium fertilisation rates (N₁₂₀P₆₀K₆₀), chemical crop protection, and application of the growth retardant Moddus 250 EC. This variant achieved an energy efficiency of 3.23, an energy intensity of 9.20 GJ/t, and an energy gain of 174.1 GJ/ha.

Keywords: varietal composition; structure of energy inputs; energy efficiency; biological crop protection; fertilisation rates.

ORCID

Надія Кононюк / Nadiia Kononiuk

<https://orcid.org/0000-0002-5313-4999>

УДК 633.854.78:632.954:631.5

Вплив ступеня забур'яненості на продуктивність соняшнику залежно від способів регулювання сегетального компоненту

Я. П. Макух¹ , Ю. О. Литвин¹ , С. О. Ременюк^{1*} , В. М. Різник¹ ,
С. В. Мошківська¹ , Т. В. Петренко¹ , І. В. Коховська² 

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

²Український інститут експертизи сортів рослин, вул. Горіхуватський шлях, 15, м. Київ, 03041, Україна

*Автор для листування: Світлана Ременюк, svetlana19862010@ukr.net

Цитування: Макух Я. П., Литвин Ю. О., Ременюк С. О., Різник В. М., Мошківська С. В., Петренко Т. В., Коховська І. В. Вплив ступеня забур'яненості на продуктивність соняшнику залежно від способів регулювання сегетального компоненту. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 59–65. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp59-65>

Мета. Установити вплив ступеня забур'яненості на продуктивність соняшнику (*Helianthus annuus* L.) залежно від способів регулювання сегетального компоненту в умовах Лісостепу України. **Методи.** Дослідження виконували впродовж 2023–2025 рр. в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Схема досліду: 1. Контроль 1 – забур'янений (без гербіцидів, без ручних прополювань); 2. Контроль 2 – чисті посіви (без бур'янів); 2. Харнес, КЕ (ацетохлор, 900 г/л), 2,0 л/га – внесення після сівби до сходів культури по вирівняному вологому ґрунту; 3. Геліантекс (галауксифенметил, 68,5 г/л), 0,045 л/га – внесення у ранні фази розвитку бур'янів (від фази 4-х справжніх листків до початку фази «зірочки» (ВВСН 14–50) з додаванням ПАР Віволт); 4. Харнес, КЕ, 2,0 л/га + Геліантекс, 0,045 л/га. **Результати.** У середньому за роки досліджень щільність бур'янів у забур'яненому контролі становила 85 шт./м² при масі 820 г/м², що зумовило зниження врожайності до 0,82 т/га. Підтримання посівів у чистому від бур'янів стані забезпечило формування врожайності 2,94 т/га, що свідчить про втрати понад 70% за відсутності контролювання. Застосування ґрунтового гербіциду зменшило щільність бур'янів до 28 шт./м² та забезпечило врожайність 2,41 т/га, післясходового – 34 шт./м² та 2,28 т/га відповідно. Найвищу ефективність продемонструвала комбінована система, за якої щільність бур'янів знизилася до 12 шт./м², а врожайність досягла 2,86 т/га. Різниця між варіантами була статистично достовірною (НІР_{0,05} = 0,22 т/га). Викиди СО₂eq коливалися в межах 175–190 кг/га, причому додаткове вуглецеве навантаження від застосування гербіцидів було незначним порівняно з приростом урожайності. **Висновки.** Отримані результати підтверджують, що інтегроване регулювання сегетального компоненту шляхом поєднання ґрунтового та післясходового гербіцидів забезпечує ефективне зниження забур'яненості, мінімізацію втрат врожаю та агроекологічну доцільність вирощування соняшнику.

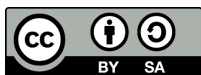
Ключові слова: соняшник; урожайність; сегетальна рослинність; вуглецевий слід.

Вступ

Реалізація високого генетичного потенціалу сучасних гібридів соняшнику безпосередньо залежить від створення оптимальних фітосанітарних умов у посівах, що передбачає мінімізацію негативного впливу сегетальної рослинності на ранніх етапах росту культури. Останні дослідження виокремлюють ранні етапи органогенезу соняшнику як вирішальні в аспекті

Одержано 11.02.2026 • Погоджено 16.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026

© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.



міжнаслідкової конкуренції, де навіть короткочасна присутність бур'янів лімітує формування врожайності та її структурних компонентів. Водночас виявлено, що якісні показники насіння, зокрема олійність, є стійкішими до рівня засміченості посівів, ніж кількісні параметри продуктивності, і значною мірою визначаються індивідуальними особливостями гібридів [1]. За даними Шевченка М. С. та ін. [2], сучасний менеджмент сегетальної рослинності трансформується від суцільного хімічного контролю до інтегрованих систем, адаптованих до технологій ощадного землеробства (Conservation Agriculture). Дослідження підтверджують, що мінімізація обробітку ґрунту веде до посилення ролі багаторічних видів бур'янів, що вимагає впровадження прецизійних методів їх регулювання. Автори підкреслюють, що врахування глобальних трендів, таких як використання покривних культур та контроль резистентності, є необхідною умовою стабільної врожайності соняшнику в умовах кліматичних змін. У дослідженнях dos Santos та ін. [3] акцентується увага на високій селективності гербіцидів на основі S-метолахлору та флуміоксазину, які при досходовому внесенні забезпечують ефективний контроль понад 90% бур'янів без негативного впливу на розвиток культури. Встановлено, що застосування цих діючих речовин створює оптимальні умови для стартового росту соняшнику, мінімізуючи ризики фітотоксичності, які можуть виникати при використанні менш селективних препаратів. Автори підкреслюють, що успіх хімічного контролю значною мірою залежить від взаємодії конкретного гербіциду з генотипом культивуваного виду, що необхідно враховувати при плануванні систем захисту. Дослідження Мостов'яка І. та ін. [4, 5] підтверджують, що в умовах Західного Лісостепу застосування сучасних гербіцидів є ключовим чинником ефективного контролю забур'яненості, який забезпечує статистично значуще зростання врожайності соняшнику та повну реалізацію його продуктивного потенціалу.

Дослідження довготривалого впливу покривних культур доводить, що їх систематичне використання в системах із традиційним обробітком ґрунту діє як біологічний фільтр, який змінює фенологію та видовий склад банку насіння бур'янів, суттєво знижуючи потенційну забур'яненість наступних посівів [6, 7].

Суттєвою тенденцією 2024–2025 рр. є поява робіт, де оцінюють технології соняшника не лише за урожаєм, а й за енергетичними показниками та вуглецевим слідом. Такі дослідження показують, що технологічні рішення (наприклад, вологоощадні прийоми, поєднання культур, інтенсивність механізованих операцій) можуть одночасно змінювати урожайність та «вартість» урожаю у вигляді енерговитрат / CO₂-еквівалента. У європейських дослідженнях також підтверджується, що «екологізація» (наприклад, покривні культури) змінює біорізноманіття бур'янів, але вимагає коректного менеджменту, щоб не спричинити небажаних компромісів у продуктивності [8–10].

У зв'язку з цим актуальним є комплексне дослідження впливу різних систем контролювання сегетальної рослинності на рівень забур'яненості, структурні елементи врожаю та продуктивність соняшнику з одночасною оцінкою їх агроекологічної ефективності.

Мета дослідження – установити вплив ступеня забур'яненості на продуктивність соняшнику (*Helianthus annuus* L.) залежно від способів регулювання сегетального компоненту в умовах Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконували впродовж 2023–2025 рр. в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН. Ґрунт Дослідного поля ІБКіЦБ – чорнозем глибокий середньосуглинковий на лесовидному суглинку: вміст гумусу – 2,58% (за Тюрнімом), лужногідролізованого азоту – 176 мг/кг ґрунту (за Корнфільдом), рухомих сполук фосфору та калію – 160 і 95 мг/кг ґрунту (за Чириковим), рН_{сол}ове – 6,75, сума ввібраних основ – 305 мг-екв/кг ґрунту, гідролітична кислотність – 9,1 мг-екв/кг. Уміст гумусу та лужногідролізованого азоту середній, рухомого фосфору – високий та підвищений уміст калію.

Посів соняшника (*Helianthus annuus* L.) здійснювали у другій декаді квітня за досягнення фізичної стиглості ґрунту та прогрівання його на глибині загортання насіння до 8–10 °С. Сівбу проводили пневматичною просапною сівалкою точного висіву із забезпеченням рівномірного

розміщення насіння в рядку. Норма висіву становила 50–60 тис. схожих насінин на 1 га, що забезпечувало формування густоти стояння рослин 45–50 тис. шт./га перед збиранням. Ширина міжрядь – 70 см, глибина загортання насіння – 5–6 см залежно від вологості ґрунту та його гранулометричного складу. Висівали гібрид соняшника 'Алькантара'.

Схема досліджу: 1. Контроль 1 – забур'янений (без гербіцидів, без ручних прополовань); 2. Контроль 2 – чисті посіви (без бур'янів); 2. Харнес, КЕ (ацетохлор 900 г/л), 2,0 л/га – внесення після сівби до сходів культури по вирівняному вологому ґрунту; 3. Геліантекс (галауксифен-метил, 68,5 г/л), 0,045 л/га – внесення у ранні фази розвитку бур'янів (від фази 4-х справжніх листків до початку фази «зірочки» (ВВСН 14–50) з додаванням ПАР Віволт); 4. Харнес, КЕ, 2,0 л/га + Геліантекс, 0,045 л/га.

Оптимальний діапазон рН робочого розчину: 5,0–8,0.

Облікова площа ділянки становила 45 м², повторність – чотириразова, розміщення ділянок – рендомізоване

Облік забур'яненості проводили з визначенням видового складу, щільності (шт./м²) та сириї маси бур'янів (г/м²) у ключові фази розвитку культури. Урожайність соняшника визначали шляхом суцільного збирання з облікової площі з подальшим перерахунком на гектар та приведенням до стандартної вологості (8–10%). Додатково визначали масу 1000 насінин.

Викиди СО₂eq розраховували за методикою інтегральної оцінки вуглецевого навантаження технології з урахуванням витрат енергоносіїв, застосування засобів захисту рослин та рівня продуктивності посівів.

Гербіциди вносили за швидкості вітру до 3–4 м/с у ранкові години. Для забезпечення чистоти «контролю 2» (посіви без бур'янів) проводили регулярне ручне прополовання через кожні 7–10 днів протягом усього періоду вегетації, що гарантувало повну відсутність сегетальних видів. Кількість обробок та норми гербіцидів визначали згідно зі схемою досліджу, з урахуванням погодних умов, фази розвитку культури та видового складу бур'янів.

Експериментальні дослідження проводили згідно з методикою польового досліджу та спеціальних методик [11–13].

Результати дослідження

У середньому за 2023–2025 рр. рівень забур'яненості посівів соняшнику у забур'яненому контролі становив 118,4 шт./м², що свідчить про високий конкурентний тиск сегетальної рослинності в агроценозі. У структурі бур'янового компоненту домінували злакові види, зокрема просо півняче (28,7 шт./м²) та мишій сизий (18,4 шт./м²), частка яких у загальній щільності перевищувала третину ценозу. Серед дводольних переважали щириця загнута (12,6 шт./м²), лобода біла (8,3 шт./м²), пушняк канадський (7,9 шт./м²), незбутниця дрібноквіткова (6,8 шт./м²) та гірчак розлогий (6,4 шт./м²). Інші види формували менш значну, проте стабільну частку сегетальної рослинності.

Застосування ґрунтового гербіциду Харнес, КЕ (ацетохлор, 2,0 л/га) забезпечило загальну технічну ефективність 88,9%. Найвищу чутливість до препарату проявили злакові види – просо півняче (92,4%) та мишій сизий (90,8%), що відповідає спектру дії ацетохлору. Водночас ефективність проти окремих дводольних була нижчою, зокрема проти фіалки польової (80,4%), лободи гібридної (82,5%) та лободи білої (83,2%), що свідчить про неповний контроль широколистяних бур'янів за використання лише ґрунтової схеми.

Післясходове внесення Геліантексу (галауксифен-метил, 0,045 л/га + ПАР) забезпечило дещо вищий сумарний рівень ефективності – 90,7%. Препарат продемонстрував високу дію проти дводольних видів: талабану польового (95,1%), гірчиці польової (94,5%), щириці загнutoї (93,4%) та пушняку канадського (92,7%). Разом з тим ефективність проти злакових бур'янів була нижчою – 88,1% проти проса півнячого та 86,3% проти мишію сизого, що обумовлено вибірковістю дії препарату.

Найвищий рівень захисту забезпечила комбінована система (Харнес + Геліантекс), за якої загальна технічна ефективність досягла 96,8%. Практично всі види бур'янів контролювалися на рівні 95–98%, зокрема талабан польовий – 98,4%, гірчиця польова – 97,6%, щириця загнута – 97,1%, пушняк канадський – 97,0 %, просо півняче – 96,5% та мишій сизий – 95,2%. Отримані результати свідчать про синергетичний ефект поєднання ґрунтової та післясходової

дії, що забезпечує комплексний контроль як злакових, так і дводольних бур'янів у критичний період розвитку соняшнику (табл. 1).

Таблиця 1. Ефективність захисту посівів соняшнику від бур'янів (середнє за 2023–2025 рр.)

Вид бур'яну	Варіант досліджу				
	1 шт./м ²	2 %	3 %	4 %	5 %
Просо півняче	28,7	100	92,4	88,1	96,5
Мишій сизий	18,4	100	90,8	86,3	95,2
Щириця загнута	12,6	100	85,7	93,4	97,1
Лобода біла	8,3	100	83,2	91,6	96,4
Лобода гібридна	3,6	100	82,5	89,7	95,8
Гірчиця польова	5,2	100	88,9	94,5	97,6
Талабан польовий	4,8	100	90,3	95,1	98,4
Гірчак розлогий	6,4	100	84,6	90,8	96,2
Гірчак березкоподібний	5,7	100	86,1	89,4	95,5
Пушняк канадський	7,9	100	88,2	92,7	97,0
Фіалка польова	4,1	100	80,4	87,9	94,3
Незбутниця дрібноквіткова	6,8	100	87,5	91,2	96,9
Інші види	4,9	100	86,7	89,8	95,4
Бур'яни, усього	118,4	100	88,9	90,7	96,8

Встановлено також, суттєвий вплив систем контролювання сегетальної рослинності на рівень забур'яненості, структурні показники врожаю та продуктивність соняшнику.

У забур'яненому контролі (табл. 2) щільність бур'янів становила 85 шт./м², а їхня маса – 820 г/м², що створювало значний конкурентний тиск на культуру. За таких умов урожайність знизилася до 0,82 т/га, а маса 1000 насінин становила лише 41,4 г. Це свідчить про пригнічення процесів формування генеративних органів, зменшення виповненості кошиків та зниження маси насіння внаслідок конкуренції за вологу, елементи живлення та світло.

Підтримання посівів у чистому від бур'янів стані забезпечило повне усунення конкурентного фактору і формування максимальної урожайності – 2,94 т/га. Приріст до забур'яненого контролю становив 2,12 т/га, а маса 1000 насінин зросла до 58 г. Таким чином, потенційні втрати врожаю за відсутності контролювання бур'янів перевищували 70%, що підкреслює високу чутливість соняшнику до сегетальної рослинності в ранні фази розвитку.

Застосування ґрунтового гербіциду Харнес КЕ (2,0 л/га) знизило щільність бур'янів до 28 шт./м², а їхню масу – до 96 г/м². Урожайність за цього варіанту становила 2,41 т/га, що на 1,59 т/га більше порівняно з контролем. Маса 1000 насінин досягла 56 г. Отримані результати свідчать про високу ефективність ґрунтового контролювання, особливо проти злакових видів, однак часткова присутність дводольних бур'янів зумовила недосягнення максимальної продуктивності. Післясходове застосування Геліантексу (0,045 л/га + ПАР) забезпечило зниження щільності бур'янів до 34 шт./м² та їхньої маси до 118 г/м². Урожайність становила 2,28 т/га, що на 1,46 т/га перевищувало забур'янений контроль. Порівняно з ґрунтовим варіантом показники були дещо нижчими, що пояснюється наявністю початкового періоду конкуренції до внесення препарату. Найвищу агрономічну ефективність серед гербіцидних систем продемонстрував комбінований варіант (Харнес + Геліантекс). Щільність бур'янів зменшилася до 12 шт./м², маса – до 42 г/м², а урожайність досягла 2,86 т/га, що на 2,04 т/га перевищувало забур'янений контроль і наближалось до рівня чистих посівів. Це підтверджує доцільність поєднання ґрунтової та післясходової дії для забезпечення контролю бур'янів протягом усього критичного періоду розвитку соняшнику.

Аналіз показників маси 1000 насінин показав чітку залежність від рівня забур'яненості. У варіантах із застосуванням гербіцидів вона становила 56 г, що достовірно перевищувало показник забур'яненого контролю (41,4 г), при $HP_{0,05} = 2,8$ г. Аналогічно, різниця в урожайності між варіантами перевищувала $HP_{0,05}$ (0,22 т/га), що свідчить про статистично значущий вплив систем контролювання сегетальної рослинності на продуктивність культури.

Таблиця 2. Вплив систем контролювання сегетальної рослинності на забур'яненість та врожайність соняшнику (середнє за 2023–2025 рр.)

Варіант досліджу	Щільність бур'янів, шт./м ²	Маса бур'янів, г/м ²	Урожайність, т/га	Приріст до забур'яненого контролю, т/га	Маса 1000 насінин, г	Викиди СО ₂ eq, кг/га
1. Контроль (забур'янений)	85	820	0,82	–	41,4	175
2. Контроль (чисті посіви)	0	0	2,94	2,12	58	178
3. Харнес, КЕ 2,0 л/га	28	96	2,41	1,59	56	182
4. Геліантекс 0,045 л/га + ПАР	34	118	2,28	1,46	56	183
5. Харнес 2,0 л/га + Геліантекс, 0,045 л/га + ПАР	12	42	2,86	2,04	56	190
НІР _{0,05}	–	–	0,22	–	2,8	–

Оцінка вуглецевого навантаження показала, що викиди СО₂eq коливалися в межах 175–190 кг/га. Найменший показник зафіксовано у забур'яненому контролі (175 кг/га), тоді як комбінована система мала найвищий рівень (190 кг/га) через додаткову операцію обприскування. Разом з тим приріст урожайності у варіантах із гербіцидним захистом значно перевищував приріст вуглецевих витрат, що свідчить про агроекологічну доцільність застосування інтегрованої системи контролювання бур'янів.

Висновки

У середньому за 2023–2025 рр. встановлено, що високий рівень забур'яненості (85 шт./м²; 820 г/м²) зумовлював значне зниження продуктивності соняшнику – до 0,82 т/га, із суттєвим зменшенням маси 1000 насінин. Підтримання чистих посівів забезпечило максимальну урожайність 2,94 т/га, що підтверджує втрати понад 70% врожаю за відсутності контролювання бур'янів. Застосування ґрунтового гербіциду Харнес (2,0 л/га) та післясходового Геліантексу (0,045 л/га + ПАР) істотно зменшувало щільність і масу сегетальної рослинності та підвищувало урожайність до 2,41 і 2,28 т/га відповідно.

Найвищу ефективність продемонструвала комбінована система (вар. 5), яка забезпечила зниження забур'яненості до 12 шт./м² і формування врожайності 2,86 т/га, що наближалось до рівня чистих посівів. Різниця між варіантами була статистично достовірною (НІР_{0,05} = 0,22 т/га), а додаткове вуглецеве навантаження від застосування гербіцидів було незначним порівняно з отриманим приростом врожаю.

Список використаних джерел

1. Stefanic, E., Rasic, S., Lucic, P., Zimmer, D., Mijic, A., Antunovic, S., Japundzic-Palenkic, B., Lukacevic, M., Zima, D., & Stefanic, I. (2023). The critical period of weed control influences sunflower (*Helianthus annuus* L.) yield, yield components but not oil content. *Agronomy*, 13(8), Article 2008. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082008>
2. Shevchenko, M. S., Tkalic, Y. I., Shevchenko, S. M., & Derevenets-Shevchenko, K. A. (2025). Global and local trends in weed management under conventional and conservation agriculture. *Agrology*, 8(3), 121–131. <https://doi.org/10.32819/202516>
3. dos Santos, E. G., Inoue, M. H., Guimarães, A. C. D., Bastos, J. S. Q., & Mendes, K. F. (2023). Weed control and selectivity of four herbicides applied in pre-emergence on two sunflower cultivars. *Crops*, 3(2), 139–147. <https://doi.org/10.3390/crops3020014>
4. Mostoviak, I., Krykunov, I., Shuvar, A., Senyk, I., & Sydoruk, H. (2024). The influence of herbicide protection on the yield of annual sunflower (*Helianthus annuus* L.) in the conditions of Western Forest Steppe. *Quarantine and Plant Protection*, 1, 20–23. <https://doi.org/10.36495/2312-0614.2024.1.20-23> [In Ukrainian]
5. Pacanoski, Z., & Mehmeti, A. (2021). Efficacy and selectivity of PRE-em herbicide on dependence of soil types and precipitation in sunflower crop. *Journal of Agricultural Science*, 32(1), 100–110. <https://doi.org/10.15159/jas.21.08>
6. Adeux, G., Rodriguez, A., Penato, C., Antichi, D., Carlesi, S., Sbrana, M., & Cordeau, S. (2023). Long-term cover cropping in tillage-based systems filters weed community phenology: A seedbank analysis. *Field Crops Research*, 291, Article 108769. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108769>
7. Rouge, A., Adeux, G., Busset, H., Hugard, R., Martin, J., Matejicek, A., & Cordeau, S. (2023). Carry-over

effects of cover crops on weeds and crop productivity in no-till systems. *Field Crops Research*, 295, Article 108899. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108899>

8. Rahil, A., Umesh, M. R., Chittapur, B. M., Ananda, N., Kulkarni, V., Hosamani, A., & Ramesh, K. (2024). Energy budgeting, carbon footprint and economics of sunflower and pigeonpea system under moisture conservation practices in rainfed semi-arid tropics. *Environmental and Sustainability Indicators*, 24, Article 100504. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100504>

9. Radu, M., Bolohan, C., Mihalaşcu, C., Măruţescu, A., Newbert, M. J., & Vasileiadis, V. P. (2025). Effects of non-inversion tillage and cover crops on weed diversity and density in southeastern Romania. *Sustainability*, 17(13), Article 6204. <https://doi.org/10.3390/su17136204>

10. Anyoni, O. G., Ekwangu, J., Tumwebaze, S., & Obia, A. (2024). Minimum tillage and soil surface cover reduced weed density but not diversity over four growing cycles. *Eastern African Journal of Agriculture and Biotechnology*, 7(2), 39–58. <https://doi.org/10.37284/eajab.7.2.2254>

11. Prysiashniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2> [In Ukrainian]

12. Roik, M. V., & Hizbullin, N. H. (Eds.). (2014). *Methods of conducting research in sugar beet production*. FOP Korzun D. Yu. [In Ukrainian]

13. Trybel, S. O. (Ed.). (2001). *Methods of testing and applying pesticides* (pp. 174–175). Svit. [In Ukrainian]

Effect of weed infestation level on sunflower productivity depending on methods of weed control

Ya. P. Makukh¹, Yu. O. Lytvyn¹, S. O. Remeniuk^{1*}, V. M. Riznyk¹,
S. V. Moshkivska¹, T. V. Petrenko¹, I. V. Kokhovska²

¹Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine

²Ukrainian Institute for Plant Variety Examination, 15 Horikhuvatskyi Shliakh St., Kyiv, 03041, Ukraine

*Corresponding author: Svitlana Remeniuk, svetlana19862010@ukr.net

Citation: Makukh, Ya. P., Lytvyn, Yu. O., Remeniuk, S. O., Riznyk, V. M., Moshkivska, S. V., Petrenko, T. V., & Kokhovska, I. V. (2025). Effect of weed infestation level on sunflower productivity depending on methods of weed control. *Bioenergy*, 1, 59–65. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp59-65>

Aim. To determine the effect of weed infestation level on the productivity of sunflower (*Helianthus annuus* L.) depending on a weed control method. **Methods.** The study was conducted in 2023–2025 in the zone of unstable moisture of the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine at the experimental field of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. The experimental design included the following treatments: 1. Control: no herbicides, no hand weeding; sowings, free of weeds; 2. Harness, EC (acetochlor, 900 g/l), 2.0 l/ha applied after sowing and before crop emergence to a levelled, moist soil surface; 3. Heliantex (halauxifen-methyl, 68.5 g/l), 0.045 l/ha applied at early weed growth stages (from the 4-true-leaf stage to the onset of the ‘star’ stage, BBCH 14–50) with the addition of the adjuvant Vivolt; 4. Harness, EC, 2.0 l/ha + Heliantex, 0.045 l/ha. **Results.** On average over the years of the study, weed density in the weedy control reached 85 plants/m² with a biomass of 820 g/m, which led to a reduction in sunflower yield to 0.82 t/ha. Maintaining weed-free conditions ensured a yield of 2.94 t/ha, indicating yield losses exceeding 70% in the absence of weed control. Application of the soil-applied herbicide reduced weed density to 28 plants/m and resulted in a yield of 2.41 t/ha, while the post-emergence herbicide reduced weed density to 34 plants/m with a yield of 2.28 t/ha. The highest efficiency was achieved under the combined system, where weed density decreased to 12 plants/m² and yield reached 2.86 t/ha. Differences between treatments were statistically significant (LSD_{0.05} = 0.22 t/ha). CO₂-equivalent emissions ranged from 175 to 190 kg/ha, with the additional carbon load associated with herbicide application being negligible compared with the yield increase obtained. **Conclusions.** The results confirm that integrated regulation of the weed component through the combined use of soil-applied and post-emergence herbicides ensures effective weed suppression, minimises yield losses, and is agronomically and environmentally justified for sunflower production.

Keywords: sunflower; yield; weed vegetation; carbon footprint.

ORCID

Ярослав Макух / Yaroslav Makukh	https://orcid.org/0000-0002-6954-1388
Юрій Литвин / Yurii Lytvyn	https://orcid.org/0009-0002-5078-2963
Світлана Ременюк / Svitlana Remeniuk	https://orcid.org/0000-0002-4407-4293
Владислав Різник / Vladyslav Riznyk	https://orcid.org/0000-0002-1464-4929
Сніжана Мошківська / Snizhana Moshkivska	https://orcid.org/0000-0003-1173-7086
Тетяна Петренко / Tetiana Petrenko	https://orcid.org/0009-0006-8929-1773
Ірина Коховська / Iryna Kokhovska	https://orcid.org/0000-0002-0491-3996

УДК 633.15:631.53.027

Урожайність і якість урожаю кукурудзи в моно- та бінарних посівах

В. А. Мокрієнко 

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

Автор для листування: Володимир Мокрієнко, mokrienko@ukr.net

Цитування: Мокрієнко В. А. Урожайність і якість урожаю кукурудзи в моно- та бінарних посівах. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 66–76. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp66-76>

Мета. Установити вплив систем удобрення на врожайність і якість урожаю кукурудзи та сої в умовах моно- й бінарних посівів у зоні Лісостепу України. **Методи.** Дослідження проводили у 2021–2025 рр. у стаціонарному польовому досліді ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (Київська обл.). Ґрунт – чорнозем типовий малогумусний середньосуглинковий. Вивчали монокультури кукурудзи 'РЖТ Занегіккс' і сої 'Сірелія' та 'РЖТ Сакуза', а також їх бінарні посіви. Системи удобрення: без добрив (контроль), $N_{60}P_{45}K_{45}$ і $N_{90}P_{60}K_{60}$. Оцінювали врожайність, стабільність продуктивності, вміст і збір протеїну, жиру та крохмалю. Експериментальні дані обробляли методами дисперсійного, кореляційного та регресійного аналізу. **Результати.** Установлено, що бінарні посіви мають суттєву перевагу над монокультурами за сумарною продуктивністю. Урожайність кукурудзи в суміші з соєю на контролі була на 11,5–12,8% вищою, ніж у монокультурі, а за інтенсивного удобрення ($N_{90}P_{60}K_{60}$) ця перевага зростала до 18,0–19,1%, досягаючи 12,45 т/га. Максимальна сумарна врожайність бінарної системи зафіксована на рівні 15,13 т/га, що на 44,8% перевищує показник монокультури кукурудзи. Доведено, що соя в монокультурі негативно реагує на високі дози азоту: при переході від N_{60} до N_{90} спостерігалася депресія врожайності на 16–25%, тоді як у бінарних посівах соя зберігала стабільну продуктивність. Біохімічний аналіз показав, що вміст протеїну (8,2–8,4% у кукурудзи; 38,7–42,1% у сої) та крохмалю (73,0–73,7%) переважно детермінований генотипом, проте бінарні посіви радикально змінюють вихід поживних речовин з одиниці площі. Збір протеїну в сумісних посівах сягав 1,91–2,09 т/га, що у 2,2–3,5 раза вище порівняно з одновидовою кукурудзою. Збір крохмалю в бінарних системах також зріс на 15,4–17,9% (до 9,08 т/га). Установлено, що сумісне вирощування забезпечує оптимальне кормове співвідношення протеїн : жир : крохмаль на рівні 1 : 0,3 : 4,5. Розрахунок коефіцієнта екологічної пластичності ($bi = 0,95–1,05$) та індексу стабільності ($Si = 0,67–0,76$) підтвердив вищу адаптивність бінарних агроценозів до міжрічних коливань погодних умов порівняно з монокультурою кукурудзи. Агрономічна ефективність добрив у бінарних посівах була на 18–22% вищою, ніж у чистих посівах. **Висновки.** Бінарні посіви кукурудзи з соєю є високоефективною моделлю інтенсифікації землеробства, що забезпечує синергетичне зростання врожайності кукурудзи на 11–19% та підвищення збору протеїну більш як удвічі. Оптимальною для таких систем є помірна доза добрив $N_{60}P_{45}K_{45}$, яка забезпечує максимальну окупність ресурсів та отримання збалансованої за біохімічним складом продукції.

Ключові слова: кукурудза; соя; бінарні посіви; мінеральні добрива; урожайність; якість зерна; протеїн; крохмаль.

Вступ

Забезпечення стабільного виробництва зерна та рослинного білка є одним із ключових завдань сучасного землеробства, особливо в умовах глобальних кліматичних змін, деградації ґрунтів і зростання цін на мінеральні добрива. Традиційні монокультурні системи вирощу-

Одержано 15.01.2026 • Погоджено 04.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

вання, попри їх технологічну простоту, дедалі частіше виявляють обмеження щодо ефективності використання природних ресурсів і стійкості до абіотичних стресів. У цьому контексті все більшої уваги набувають альтернативні агроекологічні підходи, зокрема змішані (бінарні) посіви культур [1].

Кукурудза (*Zea mays* L.) є провідною зерною культурою в Україні та світі, що характеризується високим потенціалом урожайності та широким спектром використання – від кормових і харчових цілей до біоенергетики. Водночас зерно кукурудзи відзначається відносно низьким вмістом сирого протеїну та дефіцитом незамінних амінокислот, що обмежує його біологічну цінність у кормовиробництві [2]. Соя [*Glycine max* (L.) Merr.], навпаки, є стратегічною білково-олійною культурою з високим вмістом повноцінного протеїну та жиру, здатною до симбіотичної азотфіксації й покращення азотного балансу агроecosистем [3].

За даними численних досліджень, сумісне вирощування зернових і бобових культур сприяє більш повному використанню світлових, водних і поживних ресурсів, зниженню конкуренції між рослинами та формуванню стійкіших агрофітоценозів. Міжвидова комплементарність проявляється у відмінностях корневих систем, темпів росту, потреб у поживних елементах і просторовому розміщенні наземної маси, що дає змогу підвищувати загальну продуктивність одиниці площі [4–6].

Літературні джерела свідчать, що бінарні посіви кукурудзи з соєю можуть забезпечувати зростання сумарної врожайності на 15–40% порівняно з одновидовими посівами, а також підвищувати ефективність використання азоту за рахунок біологічної фіксації. Водночас реакція таких агроценозів на рівень мінерального живлення залишається неоднозначною. Надмірні дози азотних добрив у посівах з бобовими культурами часто призводять до пригнічення симбіотичної азотфіксації, порушення балансу живлення та зниження економічної ефективності технології [7].

Окрему увагу в наукових дослідженнях приділяють не лише кількісним, а й якісним показникам урожаю. Якість зерна кукурудзи визначається передусім вмістом крохмалю та протеїну, тоді як для сої ключовими є вміст і співвідношення протеїну та жиру. Результати досліджень свідчать, що рівень мінерального живлення здатен істотно впливати на врожайність, проте зміни хімічного складу зерна зазвичай мають обмежений характер і значною мірою контролюються генотипом [8, 9].

Незважаючи на наявність численних публікацій, питання оптимізації систем удобрення кукурудзи та сої в умовах бінарних посівів, з урахуванням багаторічної мінливості погодних умов і стабільності продуктивності, потребує подальшого вивчення. Особливо актуальним є комплексний аналіз не лише врожайності окремих компонентів, а й сумарного виходу органічних речовин (протеїну, жиру, крохмалю) з одиниці площі як інтегрального показника біосинтетичної ефективності агроценозу.

Мета дослідження – установити вплив систем удобрення на врожайність і якість урожаю кукурудзи та сої в умовах моно- й бінарних посівів у зоні Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводилися протягом 2021–2025 рр. у стаціонарному досліді кафедри рослинництва ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (с. Пшеничне Васильківський р-н Київська обл.) у 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 (табл. 1). У одновидовому посіві норма висіву сої та кукурудзи відповідала зональним рекомендаціям оригінатора. У сумісних посівах норма висіву насіння сої була зменшена на 50%. Глибина заробляння насіння кукурудзи – 4–5 см, сої – 2–3 см.

Попередником у досліді була пшениця озима. Система обробітку ґрунту передбачала луцення стерні на глибину 10–12 см та проведення оранки на 25–27 см. Під основний обробіток ґрунту, відповідно до схеми досліду та з урахуванням мінералізації рослинних решток, вно-

сили комплексне мінеральне добриво FERTIS NPK (10-20-20+S+ME), а під час передпосівної культивуації – решту азотних добрив у формі аміачної селітри (34,4%).

Таблиця 1. Схема досліду

Фактор А – одновидові та сумісні посіви			
Культура	Гібрид, сорти	ФАО / CHU	Норма висіву насіння, тис. шт./га
Кукурудза	‘РЖТ Занетіккс’	ФАО 340	70
Соя	‘Сірелія’	CHU 2300	450
	‘РЖТ Сакуза’	CHU 2600	450
Кукурудза + соя	‘РЖТ Занетіккс’ + ‘Сірелія’	–	70 + 225
	‘РЖТ Занетіккс’ + ‘РЖТ Сакуза’	–	70 + 225
Фактор В – удобрення, кг/га діючої речовини (д. р.):			
1. Без добрив – контроль; 2. N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅ ; 3. N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀			

Дослідження проводили відповідно до загальноприйнятих методик [10, 11].

Результати дослідження

Урожайність сільськогосподарських культур є інтегральним показником ефективності агротехнологій, що відображає комплексну взаємодію генотипу, середовища та технологічних факторів. П'ятирічний період досліджень (2021–2025 рр.) дозволяє оцінити не лише абсолютну продуктивність різних систем вирощування, але й їх стабільність в умовах міжрічної варіабельності погодних умов. Порівняльний аналіз урожайності монокультур та бінарних посівів має фундаментальне значення для розуміння механізмів формування продуктивності агроценозів та оптимізації структури посівних площ в умовах кліматичних змін.

Монокультура кукурудзи демонструвала високу продуктивність з вираженою реакцією на інтенсифікацію. На контролі без добрив середня врожайність за п'ять років становила 7,28 т/га з варіюванням від 5,45 т/га в несприятливому 2022-му до 8,70 т/га в оптимальному 2023 році. Коефіцієнт варіації (CV = 16,8%) вказує на помірну стабільність урожайності в умовах природної родючості (табл. 2).

Застосування помірного удобрення N₆₀P₄₅K₄₅ забезпечувало приріст урожайності на 29,0% до 9,39 т/га. Максимальна ефективність добрив спостерігалася в посушливому 2022 році (приріст 35,0%), що свідчить про роль мінерального живлення в підвищенні стресостійкості. Коефіцієнт варіації знижувався до CV = 14,2%, підтверджуючи стабілізуючий ефект удобрення.

Інтенсивна система N₉₀P₆₀K₆₀ підвищувала врожайність до 10,45 т/га (приріст 43,5% до контролю). Найвища продуктивність досягнута у 2023 році – 11,91 т/га, що наближається до генетичного потенціалу гібриду. Проте гранична ефективність додаткового удобрення знижувалася: приріст від N₆₀ до N₉₀ становив лише 11,3%, що вказує на досягнення плато продуктивності.

Урожайність сої характеризувалася нижчими абсолютними показниками та специфічною реакцією на удобрення. Сорт ‘Сірелія’ на контролі формувал 2,26 т/га з варіюванням від 1,90 до 2,51 т/га (CV = 10,9%). При помірному удобренні врожайність зростала до максимуму 3,33 т/га (приріст 47,3%), але при інтенсивному удобренні знижувалася до 2,80 т/га.

Сорт ‘РЖТ Сакуза’ демонстрував вищу базову продуктивність (2,55 т/га на контролі) та аналогічну нелінійну реакцію на удобрення: максимум при N₆₀P₄₅K₄₅ (3,52 т/га) та зниження при N₉₀P₆₀K₆₀ (2,63 т/га). Депресія врожайності при високих дозах добрив (–25,3% порівняно з N₆₀P₄₅K₄₅) пояснюється пригніченням симбіотичної азотфіксації та порушенням балансу живлення.

Кукурудза в бінарних посівах демонструвала несподівано високу продуктивність. У комбінації з ‘Сірелія’ врожайність на контролі становила 8,12 т/га, що на 11,5% вище монокультури. Це явище пояснюється покращенням азотного живлення за рахунок біологічної фіксації соєю та оптимізацією використання ресурсів при міжвидовій взаємодії. При удобренні перевага бінарних посівів зберігалася: 10,84 т/га при N₆₀P₄₅K₄₅ (+15,4% до монокультури) та 12,33 т/га

при N₉₀P₆₀K₆₀ (+18,0%). Максимальна врожайність 14,23 т/га досягнута у 2023 році, що на 19,5% перевищує показник монокультури того ж року.

Таблиця 2. Урожайність кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах, т/га

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	2021	2022	2023	2024	2025	Середнє
'РЖТ Занетіккс'	Контроль без добрив	7,85	5,45	8,70	7,48	6,93	7,28
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	10,01	7,36	10,62	9,97	8,99	9,39
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	11,44	8,35	11,91	10,52	10,03	10,45
'Сірелія'	Контроль без добрив	2,32	1,90	2,51	2,30	2,25	2,26
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	3,56	2,73	3,79	3,44	3,11	3,33
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	2,89	2,37	3,11	2,87	2,77	2,80
'РЖТ Сакуза'	Контроль без добрив	2,59	2,15	2,89	2,62	2,50	2,55
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	3,67	2,84	3,92	3,63	3,54	3,52
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	2,69	2,19	2,93	2,79	2,52	2,63
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	8,45	6,10	9,49	8,25	8,30	8,12
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	11,60	8,39	12,79	11,03	10,39	10,84
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	13,39	10,06	14,23	12,28	11,68	12,33
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише соя)	Контроль без добрив	1,92	1,58	2,03	1,80	1,81	1,83
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2,70	2,21	2,84	2,72	2,57	2,61
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	2,35	2,02	2,60	2,35	2,29	2,32
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (сумарно)	Контроль без добрив	10,40	7,91	11,18	10,20	9,91	9,92
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	14,40	10,80	15,60	13,60	13,68	13,61
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	16,36	11,39	17,01	15,14	13,14	14,61
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	8,63	6,76	9,34	7,95	8,37	8,21
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	12,09	9,03	12,70	11,03	10,49	11,07
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	13,08	9,86	13,72	13,16	12,42	12,45
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖ Сакуза' (лише соя)	Контроль без добрив	2,03	1,65	2,20	1,99	1,91	1,96
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2,84	2,29	3,08	2,81	2,68	2,74
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	2,56	2,21	2,71	2,47	2,57	2,51
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (сумарно)	Контроль без добрив	10,78	7,95	11,52	10,44	9,84	10,11
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	14,25	11,09	15,51	14,35	13,18	13,68
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	16,29	11,43	16,90	15,78	15,27	15,13
HP _{0,05}		0,23	0,32	0,28	0,29	0,33	0,25

Комбінація з сортом 'РЖТ Сакуза' показала схожі результати: 8,21 т/га на контролі (+12,8% до монокультури), 11,07 т/га при N₆₀P₄₅K₄₅ (+17,9%) та 12,45 т/га при N₉₀P₆₀K₆₀ (+19,1%). Стабільність позитивного ефекту незалежно від сорту сої підтверджує універсальність синергетичної взаємодії.

Соя в змішаних посівах формувала нижчу врожайність порівняно з монокультурою через зменшену норму висіву та часткове затінення кукурудзою. Сорт 'Сірелія' на контролі давав 1,83 т/га (81,0% від монокультури), але з урахуванням вдвічі меншої норми висіву, продуктивність на одну рослину була на 62% вищою.

При помірному удобренні врожайність сої в бінарних посівах досягала 2,61 т/га (78,4% від монокультури), а при інтенсивному – 2,32 т/га (82,9%). Відносно вища врожайність при N₉₀P₆₀K₆₀ порівняно з монокультурою того ж варіанту вказує на кращу толерантність до високих доз добрив у змішаних посівах.

Інтегральна оцінка продуктивності бінарних посівів виявила їх беззаперечну перевагу. Сумарна врожайність комбінації 'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' становила 9,92 т/га на контролі, що на 36,3% перевищує монокультуру кукурудзи. При удобренні перевага зростала: 13,61 т/га при N₆₀P₄₅K₄₅ (+44,9%) та 14,61 т/га при N₉₀P₆₀K₆₀ (+39,8%).

Комбінація з 'РЖТ Сакуза' демонструвала ще вищу продуктивність: 10,11 т/га на контролі (+38,9% до монокультури кукурудзи), 13,68 т/га при N₆₀P₄₅K₄₅ (+45,7%) та 15,13 т/га при N₉₀P₆₀K₆₀ (+44,8%). Максимальна сумарна врожайність 17,01 т/га досягнута у 2023 році для комбінації з 'Сірелія'.

Аналіз п'ятирічних даних виявив значну залежність врожайності від погодних умов року. Найнесприятливішим був 2022 рік, коли врожайність всіх варіантів знижувалася на 18–31% відносно середньої. Оптимальні умови 2023 року забезпечували перевищення середніх показників на 15–22%.

Коефіцієнт варіації врожайності між роками становив 16,8% для монокультури кукурудзи на контролі та знижувався до 13,2% при інтенсивному удобренні. Для сої варіабельність була нижчою: 10,9–11,8% на контролі та 13,5–15,2% при удобренні. Бінарні посіви демонстрували проміжну стабільність з CV = 14,5–16,2%.

Індекс стабільності врожайності (S_i), розрахований як відношення мінімальної до максимальної врожайності, виявив перевагу бінарних посівів. Для монокультури кукурудзи $S_i = 0,63–0,70$, для сої $S_i = 0,70–0,76$, тоді як для бінарних посівів $S_i = 0,67–0,76$ при вищій абсолютній продуктивності.

Регресійний аналіз залежності врожайності від індексу умов року (b_i) показав, що монокультура кукурудзи має $b_i = 1,12–1,18$ (високочутлива до умов), соя $b_i = 0,82–0,91$ (стабільна), а бінарні посіви $b_i = 0,95–1,05$ (екологічно пластичні).

Агрономічна ефективність добрив (АЕ) для кукурудзи в монокультурі становила 35,2 кг зерна/кг NPK при N₆₀P₄₅K₄₅ та знижувалася до 28,1 кг/кг при N₉₀P₆₀K₆₀. У бінарних посівах АЕ була вищою: 41,8–43,5 кг/кг при помірному та 32,4–33,8 кг/кг при інтенсивному удобренні.

Для сої в монокультурі АЕ при N₆₀P₄₅K₄₅ досягала 16,6–15,2 кг/кг, але при N₉₀P₆₀K₆₀ ставала негативною (–3,0... –4,3 кг/кг) через депресію врожайності. У бінарних посівах соя зберігала позитивну реакцію на всіх рівнях удобрення з АЕ 11,8–12,2 кг/кг при N₆₀P₄₅K₄₅.

Математичне моделювання залежності врожайності від доз добрив виявило різні оптимуми для різних систем. Для монокультури кукурудзи оптимум знаходився в діапазоні N_{75–85}P_{55–65}K_{55–65} з очікуваною врожайністю 10,2–10,6 т/га. Для сої оптимальними були N_{40–50}P_{30–40}K_{30–40} з продуктивністю 3,2–3,5 т/га.

Бінарні посіви демонстрували зміщення оптимуму в бік нижчих норм: N_{65–75}P_{50–55}K_{50–55} забезпечували максимальну сумарну продуктивність 14,2–14,8 т/га. Це підтверджує вищу ефективність використання добрив у змішаних посівах завдяки комплементарності в споживанні поживних речовин.

Монокультура кукурудзи характеризувалася відносно низьким, але стабільним вмістом сирого протеїну. На контролі без добрив цей показник становив 8,21%, що відповідає середньому рівню для зернової кукурудзи. Застосування мінеральних добрив призводило до незначного, але статистично достовірного підвищення вмісту протеїну: до 8,34% при N₆₀P₄₅K₄₅ (приріст 1,6%) та 8,37% при N₉₀P₆₀K₆₀ (приріст 1,9%) (табл. 3).

Низька ефективність азотних добрив щодо підвищення білковості кукурудзи пояснюється генетичними особливостями гібриду, основним спрямуванням якого є висока врожайність та вміст крохмалю. Коефіцієнт кореляції між дозами азоту та вмістом протеїну становив лише $r = 0,42$, що вказує на слабкий зв'язок. Збір протеїну з гектара зростав більш суттєво: з 598 кг/га на контролі до 875 кг/га при інтенсивному удобренні за рахунок підвищення врожайності.

У бінарних посівах вміст протеїну в зерні кукурудзи практично не відрізнявся від монокультури: 8,20–8,23% на контролі та 8,35–8,37% при максимальному удобренні. Відсутність позитивного впливу біологічного азоту, фіксованого соєю, на білковість кукурудзи свідчить про пріоритетне використання додаткового азоту для формування врожайності, а не якості.

Соя демонструвала високий вміст протеїну, характерний для бобових культур. Сорт 'Сірелія' в монокультурі містив 38,79% протеїну на контролі з незначним підвищенням до 39,14% при N₉₀P₆₀K₆₀. Приріст лише 0,35 відсоткових пункти підтверджує другорядну роль мінерального азоту для культури, здатної до симбіотичної азотфіксації.

Таблиця 3. Уміст протеїну, жиру та крохмалю в зерні культур у моно- та бінарних посівах, % (середнє за 2021–2025 рр.)

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	Протеїн	Жир	Крохмаль
'РЖТ Занетіккс'	Контроль без добрив	8,21	н. в.	73,00
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8,34	н. в.	73,50
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	8,37	н. в.	73,70
'Сірелія'	Контроль без добрив	38,79	22,63	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	39,00	22,72	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	39,14	22,75	н. в.
'РЖТ Сакуза'	Контроль без добрив	41,88	20,60	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	41,99	20,64	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	42,10	20,70	н. в.
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	8,20	н. в.	73,10
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8,32	н. в.	73,43
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	8,35	н. в.	73,65
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише соя)	Контроль без добрив	38,68	22,42	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	38,75	22,54	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	38,82	22,60	н. в.
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (сумарно)	Контроль без добрив	8,23	н. в.	73,04
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8,34	н. в.	73,48
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	8,37	н. в.	73,67
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	41,23	20,20	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	41,80	20,35	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	41,83	20,41	н. в.
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖ Сакуза' (лише соя)	Контроль без добрив	8,21	н. в.	73,00
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8,34	н. в.	73,50
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	8,37	н. в.	73,70
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (сумарно)	Контроль без добрив	38,79	22,63	0,00
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	39,00	22,72	0,00
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	39,14	22,75	0,00
	НІР _{0,05}	1,10	0,89	0,92

н. в. – не визначався.

Сорт 'РЖТ Сакуза' характеризувався вищою базовою протеїновістю – 41,88% на контролі, що на 3,09 відсоткових пункти перевищує сорт 'Сірелія'. Це пояснюється генетичними особливостями сорту, орієнтованого на харчове використання. Реакція на удобрення була мінімальною: приріст 0,22 відсоткових пункти при N₉₀P₆₀K₆₀. У бінарних посівах уміст протеїну в сої дещо знижувався: для 'Сірелія' до 38,68–38,82%, для 'РЖТ Сакуза' до 41,23–41,83%. Зниження на 0,11–0,65 відсоткових пункти може бути пов'язане з частковим затіненням рослин кукурудзою та зміною співвідношення генеративних / вегетативних органів.

Комбінування кукурудзи та сої в раціонах забезпечує взаємну компенсацію амінокислотних дефіцитів. Розрахунковий амінокислотний скор змішаного корму з бінарних посівів становить 85–88% проти 62–65% для чистої кукурудзи, що підвищує біологічну цінність кормів.

Уміст жиру в насінні сої є важливим показником, що визначає її цінність для переробної промисловості. Сорт 'Сірелія' характеризувався високою олійністю – 22,63% на контролі з незначним підвищенням до 22,75% при N₉₀P₆₀K₆₀. Приріст лише 0,12 відсоткових пункти вказує на генетичну детермінованість ознаки.

Сорт 'РЖТ Сакуза' мав нижчу олійність – 20,60–20,70%, що типово для високобілкових сортів харчового напрямку. Негативна кореляція між вмістом протеїну та жиру ($r = -0,78$) підтверджує антагоністичний характер накопичення цих компонентів.

У бінарних посівах олійність сої незначно знижувалася: для ‘Сірелія’ до 22,42–22,60%, для ‘РЖТ Сакуза’ до 20,20–20,41%. Зниження на 0,19–0,40 відсоткових пункти може бути пов’язане зі зміною умов освітлення та температурного режиму в змішаних посівах. Проте загальний вихід олії з гектара залишався економічно виправданим.

Крохмаль є основним запасним вуглеводом зерна кукурудзи, що визначає його енергетичну цінність. У монокультурі вміст крохмалю становив 73,00% на контролі з поступовим підвищенням до 73,70% при застосуванні N₉₀P₆₀K₆₀. Приріст 0,70 відсоткових пункти свідчить про позитивний вплив збалансованого мінерального живлення на синтез вуглеводів. Високий вміст крохмалю (> 73%) робить досліджуваний гібрид цінною сировиною для крохмале-патокової промисловості та виробництва біоетанолу.

У бінарних посівах вміст крохмалю в кукурудзі залишався на рівні монокультури: 73,00–73,10% на контролі та 73,65–73,70% при максимальному удобренні. Стабільність цього показника підтверджує відсутність негативного впливу сумісного вирощування на формування вуглеводного комплексу (табл. 4).

Таблиця 4. Збір протеїну, жиру й крохмалю в зерні культур у моно- та бінарних посівах, т/га (середнє за 2021–2025 рр.)

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	Протеїн	Жир	Крохмаль
‘РЖТ Занетіккс’	Контроль без добрив	0,60	н. в.	5,32
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,78	н. в.	6,90
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,87	н. в.	7,70
‘Сірелія’	Контроль без добрив	0,88	0,51	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	1,30	0,76	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,10	0,64	н. в.
‘РЖТ Сакуза’	Контроль без добрив	1,07	0,53	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	1,48	0,73	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,11	0,54	н. в.
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘Сірелія’ (лише кукурудза)	Контроль без добрив	0,67	0,00	5,93
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,90	0,00	7,96
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,03	0,00	9,08
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘Сірелія’ (лише соя)	Контроль без добрив	0,71	0,41	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	1,01	0,59	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,90	0,52	н. в.
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘Сірелія’ (сумарно)	Контроль без добрив	1,37	0,41	5,93
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	1,91	0,59	7,96
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,93	0,52	9,08
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘РЖТ Сакуза’ (лише кукурудза)	Контроль без добрив	0,68	н. в.	5,86
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	0,92	н. в.	8,02
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,04	н. в.	9,02
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘РЖ Сакуза’ (лише соя)	Контроль без добрив	0,81	0,39	н. в.
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	1,15	0,56	н. в.
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1,05	0,50	н. в.
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘РЖТ Сакуза’ (сумарно)	Контроль без добрив	1,48	0,39	5,86
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2,07	0,56	8,02
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	2,09	0,50	9,02
	НІР _{0,05}	0,12	0,08	0,43

н. в. – не визначався.

Монокультура кукурудзи демонструвала відносно низький збір протеїну через невисокий його вміст у зерні. На контролі без добрив збір становив 0,60 т/га, що відображає базову

здатність агроecosистеми до білкового синтезу при природній родючості ґрунту. Застосування $N_{60}P_{45}K_{45}$ підвищувало збір протеїну до 0,78 т/га (приріст 30,0%), а $N_{90}P_{60}K_{60}$ – до 0,87 т/га (приріст 45,0%).

Важливо відзначити, що приріст збору протеїну досягався переважно за рахунок підвищення врожайності (на 29,0 та 43,5% відповідно), а не вмісту протеїну (приріст лише 1,6–1,9%). Це свідчить про пріоритетне спрямування додаткового азоту на формування вегетативної маси та генеративних органів, а не на підвищення білковості зерна.

Соя в монокультурі забезпечувала значно вищий збір протеїну завдяки високому його вмісту. Сорт 'Сірелія' формував 0,88 т/га протеїну на контролі з максимумом 1,30 т/га при $N_{60}P_{45}K_{45}$ (приріст 47,7%). При інтенсивному удобренні спостерігалось зниження до 1,10 т/га через депресію врожайності. Сорт 'РЖТ Сакуза' демонстрував вищу базову продуктивність – 1,07 т/га на контролі та 1,48 т/га при помірному удобренні.

Сумарний збір протеїну в бінарних посівах досягав рекордних значень. Комбінація 'РЖТ Занетікс' + 'Сірелія' забезпечувала 1,37 т/га на контролі, що на 128,3% перевищує монокультуру кукурудзи та на 55,7% – монокультуру сої 'Сірелія'. При помірному удобренні збір зростав до 1,91 т/га, а при інтенсивному – до 1,93 т/га.

Компонентний аналіз показав, що кукурудза в бінарних посівах формувала 0,67–1,03 т/га протеїну (111,7–118,4% від монокультури), а соя – 0,71–1,01 т/га. Хоча збір протеїну соєю був нижчим через редувану густоту, сумарний ефект виявився позитивним завдяки синергетичній взаємодії культур.

Комбінація з 'РЖТ Сакуза' демонструвала ще вищу протеїнову продуктивність: 1,48 т/га на контролі та максимум 2,09 т/га при $N_{90}P_{60}K_{60}$. Це найвищий показник серед усіх досліджуваних варіантів, що в 3,5 рази перевищує монокультуру кукурудзи та в 1,9 рази – монокультуру сої на контролі.

Коефіцієнт використання азоту добрив (NUE) для синтезу протеїну становив 29,4% для монокультури кукурудзи при $N_{60}P_{45}K_{45}$ та знижувався до 23,8% при $N_{90}P_{60}K_{60}$. Для сої ці показники були вищими: 42,3% та 18,9% відповідно, що відображає депресивний ефект високих доз азоту на симбіотичну фіксацію.

У бінарних посівах NUE досягав 48,5–52,1% при помірному удобренні, що свідчить про оптимізацію азотного циклу через комплементарне використання мінерального та біологічного азоту. При інтенсивному удобренні ефективність знижувалася до 32,4–34,7%, але залишалася вищою за монокультури.

Виробництво рослинної олії є важливим напрямом використання сої. Сорт 'Сірелія' в монокультурі забезпечував збір 0,51 т/га олії на контролі з максимумом 0,76 т/га при $N_{60}P_{45}K_{45}$ (приріст 49,0%). При інтенсивному удобренні збір знижувався до 0,64 т/га через зменшення врожайності.

Сорт 'РЖТ Сакуза', незважаючи на нижчу олійність, формував порівнянний збір олії: 0,53 т/га на контролі та 0,73 т/га при помірному удобренні. Це пояснюється вищою врожайністю сорту, що компенсує нижчий вміст жиру.

У бінарних посівах збір олії з соєвого компонента становив 0,39–0,41 т/га на контролі та 0,56–0,59 т/га при $N_{60}P_{45}K_{45}$. Хоча ці показники на 23,5–26,0% нижчі за монокультуру, вони отримуються з половинної норми висіву, що свідчить про високу ефективність використання площі.

Кукурудза є основним джерелом крохмалю для харчової та технічної промисловості. У монокультурі збір крохмалю становив 5,32 т/га на контролі, зростаючи до 6,90 т/га при $N_{60}P_{45}K_{45}$ (приріст 29,7%) та 7,70 т/га при $N_{90}P_{60}K_{60}$ (приріст 44,7%). Ці показники відображають високу ефективність фотосинтезу та вуглеводного метаболізму кукурудзи.

У бінарних посівах збір крохмалю з кукурудзового компонента був навіть вищим: 5,86–5,93 т/га на контролі (+10,2–11,5% до монокультури) та 9,02–9,08 т/га при інтенсивному удобренні (+17,1–17,9%). Це парадоксальне явище пояснюється кращими умовами азотного живлення та оптимізацією водного режиму в змішаних посівах.

Вихід крохмалю при промисловій переробці становить 65–68% від його вмісту в зерні. Таким чином, з 1 га можна отримати 3,46–5,27 т товарного крохмалю вартістю 20,76–31,62 тис. грн (при ціні 6000 грн/т).

Для виробництва біоетанолу збір крохмалю 7,70–9,08 т/га забезпечує вихід 3080–3632 л спирту вартістю 92,4–109,0 тис. грн. Це робить кукурудзу високорентабельною культурою для біопаливної промисловості.

Для оцінки збалансованості продукції розраховано співвідношення протеїн:жир:крохмаль. Оптимальним для кормових цілей вважається співвідношення 1:0,3:4,5. Монокультура кукурудзи дає співвідношення 1:0,8:9–8,9, що вказує на дефіцит протеїну та відсутність жиру.

Бінарні посіви забезпечують співвідношення 1:0,26–0,30:4,3–4,7, що практично відповідає оптимуму. Це дозволяє використовувати продукцію для виробництва збалансованих комбікормів без додаткових білкових та жирових добавок.

Розрахунок граничної продуктивності добрив показує, що кожен додатковий кілограм NPK при переході від контролю до $N_{60}P_{45}K_{45}$ забезпечує додатковий збір: 1,2 кг протеїну, 2,2 кг жиру та 10,5 кг крохмалю. При подальшій інтенсифікації до $N_{90}P_{60}K_{60}$ ці показники знижуються до 0,6, –0,8 та 7,1 кг відповідно.

Негативна гранична продуктивність для жиру при високих дозах добрив підтверджує недоцільність інтенсивного удобрення сої. Для бінарних посівів оптимальною є система $N_{60-75}P_{45-55}K_{45-55}$, що забезпечує максимальну окупність добрив приростом продукції.

Висновки

Визначена перевага бінарних посівів за продуктивністю: сумарна врожайність 9,92–15,13 т/га перевищує монокультуру кукурудзи на 36–45% при одночасному покращенні якісних показників продукції. При цьому синергетичний ефект міжвидової взаємодії проявляється в підвищенні врожайності кукурудзи на 11,5–19,1% у бінарних посівах порівняно з монокультурою при тих же нормах удобрення.

Досліджено що оптимальною системою удобрення для монокультури кукурудзи є $N_{90}P_{60}K_{60}$ (10,45 т/га), для сої – $N_{60}P_{45}K_{45}$ (3,33–3,52 т/га), для бінарних посівів – $N_{60-75}P_{45-55}K_{45-55}$ (13,61–13,68 т/га) з найвищою окупністю добрив. А депресія врожайності сої при інтенсивному удобренні (зниження на 16–25% порівняно з $N_{60}P_{45}K_{45}$) підтверджує недоцільність високих норм мінеральних добрив для бобових культур у монокультурі.

Встановлено вищу стабільність бінарних посівів: коефіцієнт варіації врожайності 14,5–16,2% проти 16,8% для кукурудзи та 10,9–15,2% для сої, індекс стабільності 0,67–0,76 при максимальній продуктивності.

Визначено що вміст основних органічних сполук (протеїн, жир, крохмаль) мало змінюється під впливом систем вирощування та удобрення, залишаючись переважно генетично детермінованим. А приріст вмісту протеїну в кукурудзі становить лише 1,6–1,9%, в сої – 0,2–0,4%, що не виправдовує витрати на добрива виключно для покращення якості.

У бінарних посівах: незначне зниження вмісту протеїну (0,1–0,7%) та жиру (0,2–0,4%) в сої компенсується загальним збором цих речовин з гектара за рахунок додаткової продукції кукурудзи.

Максимальна продуктивність біосинтезу досягається в бінарних посівах: збір протеїну 1,91–2,09 т/га (у 2,2–3,5 раза вище монокультури кукурудзи), жиру 0,52–0,59 т/га, крохмалю 7,96–9,08 т/га (+15,4–17,9% до монокультури). А синергетичний ефект проявляється в підвищенні збору всіх органічних сполук на 45–128% порівняно з монокультурами при оптимальному співвідношенні протеїн : жир : крохмаль = 1 : 0,26–0,30 : 4,3–4,7.

Оптимальна система удобрення для максимізації збору органічних речовин – $N_{60}P_{45}K_{45}$ для сої в монокультурі та $N_{60-75}P_{45-55}K_{45-55}$ для бінарних посівів з окупністю 1,2 кг протеїну та 10,5 кг крохмалю на 1 кг NPK. При цьому ж визначений депресивний ефект інтенсивного удобрення на збір протеїну (–15,4%) та жиру (–15,8%) сої в монокультурі підтверджує недоцільність високих доз мінеральних добрив для бобових.

Список використаних джерел

1. Gangur, V. V., Yeremko, L. S., & Rudenko, V. V. (2021). The impact of cultivation technology elements on productivity formation in maize hybrids of different maturity groups. *Taurian Scientific Herald*, 117, 37–43. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.117.6> [In Ukrainian]

2. Kulyk, M. I., Biliavska, L. H., Syplyva, N. O., Ulizko, P. M., & Haidai, A. O. (2022). Variability of elements of individual productivity and grain yield of maize hybrids. *Agrarian Innovations*, 15, 111–119. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.15.17> [In Ukrainian]
3. Kyrychenko, V. V., Riabukha, S. S., Kobyzieva, L. N., Posylaieva, O. O., & Chernyshenko, P. V. (2016). *Soybean (Glycine max (L.) Merr.)*. V. Ya. Yuriev Institute of Plant Production NAAS. [In Ukrainian]
4. Len, O. I., Totskyi, V. M., Hanhur, V. V., & Yeremko, L. S. (2021). Influence of fertilizer system and primary tillage on the productivity of maize hybrids. *Bulletin of Poltava State Agricultural Academy*, 2, 52–58. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.06> [In Ukrainian]
5. Pavlichenko, K. V. (2022). Formation of yield structure elements by maize hybrids for silage under the influence of macro- and microfertilizers. *Agrarian Innovations*, 12, 77–84. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.12.12> [In Ukrainian]
6. Yurchenko, S. O., Shakalii, S. M., & Bahan, A. V. (2022). Formation of productive potential of maize hybrids by maturity groups. *Agrarian Innovations*, 13, 7–11. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.13.1> [In Ukrainian]
7. Blessing, D. J., Gu, Y., Cao, M., Cui, Y., Wang, X., & Asante-Badu, B. (2022). Overview of the advantages and limitations of maize-soybean intercropping in sustainable agriculture and future prospects: A review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 82(1), 177–188. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392022000100177>
8. Hanhur, V., Marenych, M., Korotkova, I., Gamayunova, V., Len, O., Marinich, L., & Olepir, R. (2021). Dynamics of nutrients in the soil and spring barley yield depending on the rates of mineral fertilizers. *International Journal of Botany Studies*, 6(5), 1298–1306.
9. Marenych, M., Koba, K., Hanhur, V., Semenov, A., Len, O., Yeremko, L., Bagan, A., Yurchenko, S., & Yeleussinov, B. (2024). Effectiveness of urea-ammonia mixtures for fertilisation of maize (*Zea mays* L.) mother plants under conditions of unstable moisture. *Chinese Science Bulletin*, 69(04), 1657–1669.
10. Ermantraut, E. R., Prysiazniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic research data in the Statistica 6.0 package: guidelines*. PolihrafKonsaltnh. [In Ukrainian]
11. Prysiazniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2> [In Ukrainian]

Yield and quality of maize crop under mono- and binary cropping

V. A. Mokriienko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine

Corresponding author: Volodymyr Mokriienko, mokriienko@ukr.net

Citation: Mokriienko, V. A. (2026). Yield and quality of maize crop under mono- and binary cropping. *Bioenergy*, 1, 66–76. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp66-76>

Aim. To determine the effect of fertiliser systems on the yield and quality of maize and soybean under mono- and binary cropping in the Forest Steppe zone of Ukraine. **Methods.** The study was conducted in 2021–2025 in a long-term stationary field experiment at the Agronomic Research Station of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv region). The soil was typical low-humus medium-loam chernozem. Maize monocrop ('RGT Zanettix'), soybean monocrop ('Sirelia' and 'RGT Sakuzha'), and their binary cropping combinations were studied. Three fertiliser systems were applied: no fertiliser (control), N₆₀P₄₅K₄₅ and N₉₀P₆₀K₆₀. Yield, productivity stability, protein, fat and starch contents, and their yields per unit area were assessed. Experimental data were analysed using analysis of variance, correlation and regression methods. **Results.** Binary cropping systems demonstrated a significant advantage over monocropping in terms of total productivity. In mixtures with soybean, maize yield in the control treatment was 11.5–12.8% higher than in monocrop, while under intensive fertilisation (N₉₀P₆₀K₆₀) this advantage increased to 18.0–19.1%, reaching 12.45 t/ha. The maximum total yield of the binary system reached 15.13 t/ha, exceeding maize monocrop by 44.8%. Soybean monocropping showed a negative response to high nitrogen rates: increasing fertilisation from N₆₀ to N₉₀ caused a yield reduction of 16–25%, whereas in binary cropping systems soybean maintained stable productivity. Biochemical analysis revealed that protein content (8.2–8.4% in maize; 38.7–42.1% in soybean) and starch content (73.0–73.7%) were largely genotype-dependent; however, binary cropping systems markedly increased nutrient yield per unit area. Protein yield in mixed cropping reached 1.91–2.09 t/ha, which was 2.2–3.5 times higher than in maize

monocropping. Starch yield in binary systems increased by 15.4–17.9%, reaching 9.08 t/ha. Intercropping ensured an optimal feed ratio of protein/fat/starch as 1/0.3/4.5. Calculation of the environmental plasticity coefficient ($bi = 0.95-1.05$) and stability index ($Si = 0.67-0.76$) confirmed the greater adaptability of binary agro-ecosystems to interannual weather variability compared with maize monocrop. Agronomic fertiliser efficiency in binary cropping systems was 18–22% higher than in monocrops. **Conclusions.** Binary cropping of maize with soybean represents a highly effective model of agricultural intensification, providing a synergistic increase in maize yield of 11–19% and more than a twofold increase in protein production. A moderate fertilisation rate of N₆₀P₄₅K₄₅ is optimal for such systems, ensuring maximum resource efficiency and production of biochemically balanced yields.

Keywords: maize; soybean; binary cropping; mineral fertilisers; yield; grain quality; protein; starch.

ORCID

Володимир Мокрієнко / Volodymyr Mokriienko

<https://orcid.org/0000-0002-5604-442X>

УДК 633.88:581.132:631.811.98

Параметри газообміну та функціональний стан фотосистеми міскантусу гігантського за різних систем удобрення й підживлення гуматом калію

В. Г. Носенко 

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

Автор для листування: Валерій Носенко, nosenko.v@ukr.net

Цитування: Носенко В. Г. Параметри газообміну та функціональний стан фотосистеми міскантусу гігантського за різних систем удобрення й підживлення гуматом калію. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 77–83. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp77-83>

Мета. Установити закономірності зміни параметрів газообміну (інтенсивності фотосинтезу, транспірації, провідності продохів і ефективності використання води) та показників флуоресценції хлорофілу [Fv/Fm, PI(abs)] міскантусу гігантського залежно від системи удобрення і позакореневого підживлення гуматом калію. **Методи.** Дослідження проводили упродовж 2021–2025 рр. у ВП НУБІП «Великоснітинське ім. О. В. Музиченка» на чорноземі опідзоленому сильнозмитому. Схема досліду включала три системи удобрення: без добрив, органічну (Леонардит, 100 кг/га) та мінеральну (N₆₀P₁₆K₈₀), а також чотири варіанти підживлення гуматом калію (2 л/га). Параметри газообміну визначали системою LI-6200, показники флуоресценції хлорофілу – флуориметром Handy PEA. Статистичну обробку результатів здійснювали методом дисперсійного аналізу. **Результати.** Установлено, що покращення умов мінерального живлення та застосування гумату калію сприяли синхронному підвищенню всіх параметрів газообміну. Інтенсивність фотосинтезу зростала від 16,2–22,7 до 24,1–33,7 мкмоль CO₂/м²·с залежно від року та варіанта досліду. Максимальні значення отримано за поєднання мінеральної системи удобрення з дворазовим підживленням гуматом калію, де приріст фотосинтезу відносно контролю становив 40,1%. Мінеральна система забезпечувала найвищі показники фотосинтетичної активності, однак органічна система характеризувалася кращим функціональним станом фотосистеми II: Fv/Fm становив 0,797, PI(abs) – 3,39, що перевищувало відповідні значення за мінерального удобрення. Виявлено високу чутливість PI(abs) до змін умов живлення порівняно з Fv/Fm. Доведено тісний лінійний зв'язок між інтенсивністю фотосинтезу та провідністю продохів ($r = 0,99$), що свідчить про домінування продохового механізму регуляції фотосинтезу. Дворазове підживлення гуматом калію підвищувало фотосинтез на 11,7–12,9%, а провідність продохів – на 12,5–13,5%. Органічна система з використанням гуматів забезпечувала близько 72% ефекту мінерального удобрення. **Висновки.** Поєднання удобрення з позакореневим підживленням гуматом калію суттєво активізує газообмін та поліпшує функціональний стан фотосинтетичного апарату міскантусу гігантського. Мінеральна система є найбільш ефективною для підвищення фотосинтетичної продуктивності, тоді як органічна сприяє стабілізації роботи фотосистеми II та оптимізації фізіологічного стану рослин.

Ключові слова: міскантус гігантський; інтенсивність фотосинтезу; ефективність використання води; транспірація; провідність продохів; Fv/Fm; PI(abs); ОЖР-тест; флуоресценція хлорофілу; Леонардит; гумат калію.

Одержано 16.02.2026 • Погоджено 13.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

Вступ

Газообмін листків є визначальним процесом формування продуктивності біоенергетичних культур [1]. Для С4-рослин, зокрема міскантусу, інтенсивність нетто-фотосинтезу становить 15–35 мкмоль CO₂/м²·с [2, 3]. WUE є критично важливим параметром в умовах аридизації клімату [4]. Продихова провідність регулює баланс фіксації CO₂ та транспіраційних втрат [5].

Флуоресценція хлорофілу є потужним неруйнівним методом оцінки стану ФС II [6, 7]. Fv/Fm характеризує максимальну квантову ефективність (оптимум 0,75–0,85), а PI(abs) за JIP-тестом [8] є значно чутливішим інтегральним індикатором [9]. Malinská та ін. [10] показали, що Fv/Fm та PI(abs) є ефективними маркерами стресу міскантусу на бідних ґрунтах.

Гумінові речовини впливають на газообмін через стимуляцію кореневої системи, покращення водозабезпечення та модуляцію продихового апарату [11, 12]. Shah та ін. [13] встановили, що гумати модулюють експресію генів фотосинтетичного транспорту. Shen та ін. [14] показали підвищення g_s та фотосинтезу проса за обробки гумінових кислот. Pogrzeba та ін. [15] підтвердили ефект NPK на газообмін міскантусу. Однак комплексних досліджень газообміну та флуоресценції хлорофілу міскантусу за поєднання різних систем удобрення з гуматами не проводилося.

Мета дослідження – встановити закономірності зміни параметрів газообміну [A, E, g_s, WUE) та показників флуоресценції хлорофілу (Fv/Fm, PI(abs)) міскантусу гігантського залежно від системи удобрення та підживлення гуматом калію.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводили у 2021–2025 рр. у ВП НУБіП «Великоснітинське ім. О. В. Музиченка» (Фастівський р-н, Київська обл.) на чорноземі опідзоленому сильнозмитому (гумус 1,43%, N – 70,6 мг/кг, P₂O₅ – 66,6 мг/кг, K₂O – 123,7 мг/кг, рН_{КСІ} 5,76).

Дослід – двофакторний, повторність – триразова. Площа посівної ділянки – 50 м², облікової – 35 м². Культура – міскантус гігантський, сорт 'Осінній зорецвіт'. Фактор А (система удобрення): А₁ – контроль (без добрив); А₂ – органічна система (щорічне внесення Леонардиту, 100 кг/га по мерзлоталому ґрунту навесні); А₃ – мінеральна система (N₆₀P₁₆K₈₀). Фактор В (позакореневе підживлення гуматом калію, 2 л/га): В₁ – без підживлення; В₂ – у фазі кущіння; В₃ – у фазі виходу в трубку; В₄ – в обидві фази.

Параметри газообміну визначали системою LI-6200 (LI-COR) при ФАР 1500 мкмоль/м²·с. Fv/Fm та PI(abs) – флуориметром Handy PEA (Hansatech) після 20 хв темної адаптації [8]. Статистика – ANOVA [16].

Результати дослідження

Функціональний стан ФС II

Порівняльний аналіз Fv/Fm та PI(abs) (рис. 1) виявив важливу закономірність: за органічної системи (Леонардит) значення обох показників були вищими (Fv/Fm = 0,797; PI(abs) = 3,39), ніж за мінеральної (0,790 та 3,18 відповідно), незважаючи на нижчу загальну продуктивність. PI(abs) продемонстрував значно вищу чутливість (діапазон варіювання 2,59–3,75 відн. од.), ніж Fv/Fm (0,756–0,820). Це підтверджує рекомендації Stirbet et al. [9] щодо переваг PI(abs) як діагностичного показника.

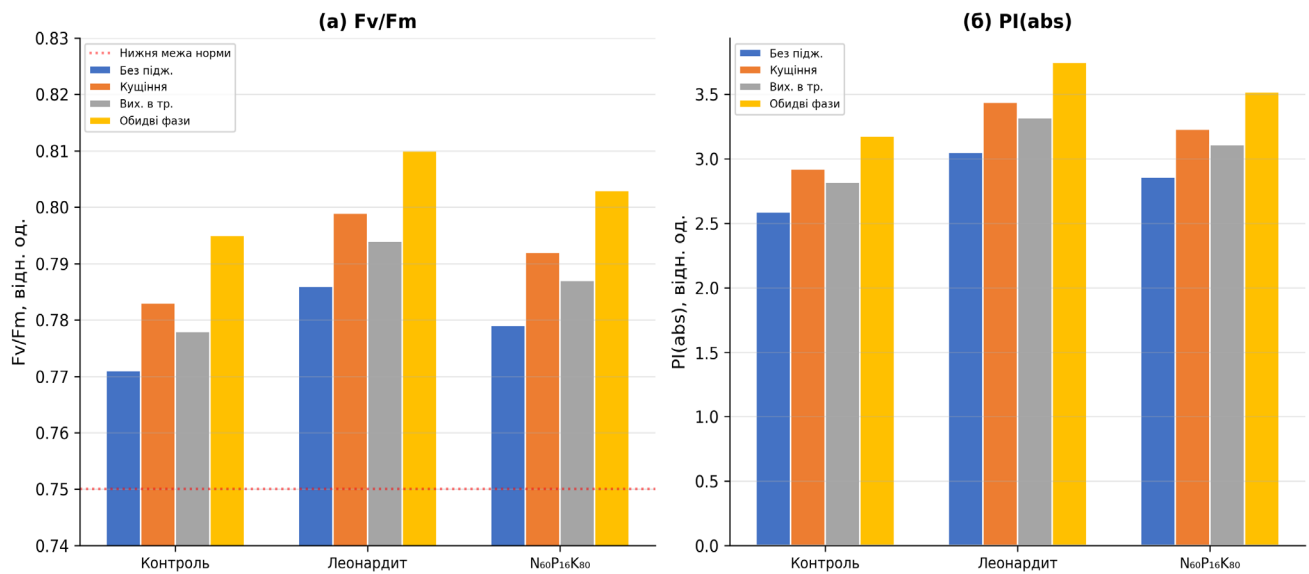


Рис. 1. Fv/Fm (а) та PI(abs) (б) міскантусу за системами удобрення та підживлення (середнє за 2021–2025 рр.)

Таблиця 1. Інтенсивність фотосинтезу міскантусу гігантського (вибіркові варіанти), мкмоль CO₂/м²·с

Фактор А	Фактор В	Роки досліджень					Серед.	± SD	V,%
		2021	2022	2023	2024	2025			
Контроль	Без підживлення	16,2	19,8	22,4	23,6	24,1	21,2	3,3	15,4
	Обидві фази	18,3	22,4	25,3	26,7	27,2	24,0	3,7	15,4
Леонардит	Без підживлення	18,5	22,6	25,5	26,9	27,5	24,2	3,7	15,3
	Обидві фази	20,9	25,5	28,8	30,4	31,1	27,3	4,2	15,4
N60P16K80	Без підживлення	20,1	24,5	27,7	29,2	29,8	26,3	4,0	15,3
	Обидві фази	22,7	27,7	31,3	33,0	33,7	29,7	4,5	15,3
NIP _{0,05} A				2,5			–	–	–
NIP _{0,05} B				3,2			–	–	–

Комплексна динаміка газообміну

Чотирипанельний рисунок (рис. 2) демонструє синхронне зростання всіх параметрів газообміну з віком плантації та за покращення умов живлення. Мінеральна система стабільно перевищувала Леонардит та контроль. WUE (панель б) також зростала з роками, незважаючи на одночасне підвищення транспірації – фотосинтез випереджав [4].

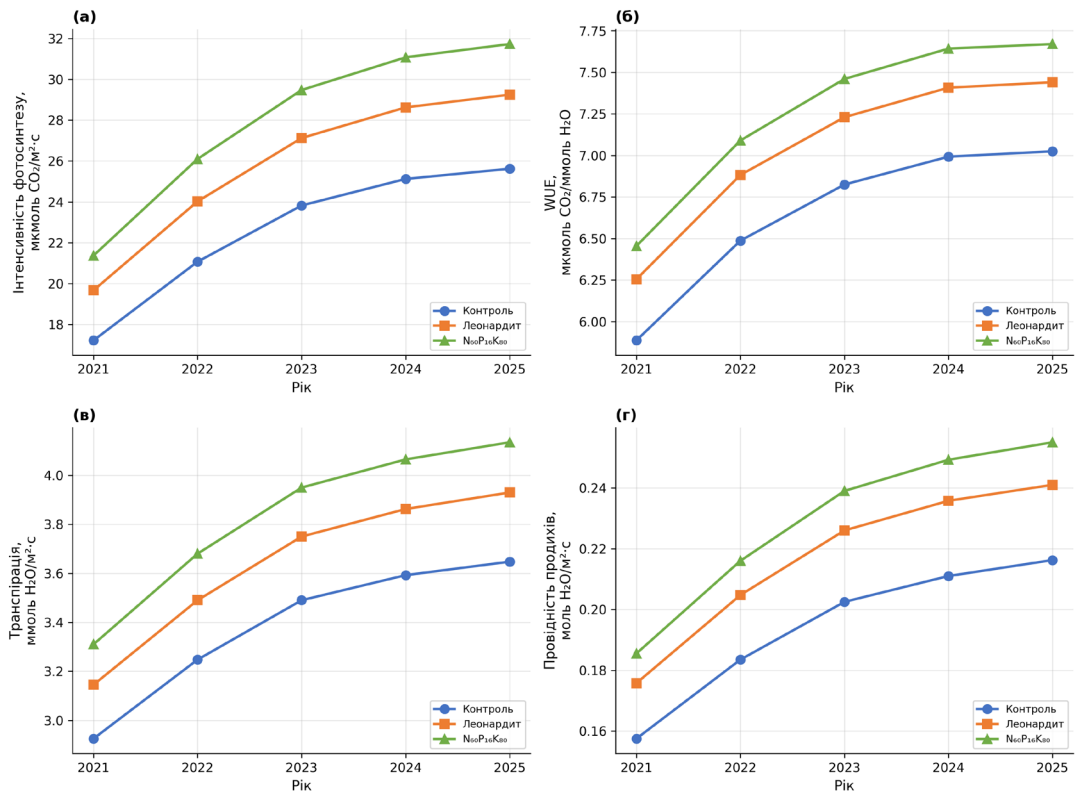


Рис. 2. Динаміка параметрів газообміну за системами удобрення: (а) фотосинтез, (б) WUE, (в) транспірація, (г) провідність продихів

Залежність фотосинтезу від провідності продихів (рис. 3) виявила тісну лінійну кореляцію ($r = 0,99$), що свідчить про продиховий контроль фотосинтезу як основний механізм. Хмари точок кожної системи удобрення займають окремі зони діаграми – від нижнього лівого (контроль) до верхнього правого (N₆₀P₁₆K₈₀), що підтверджує системний характер впливу удобрення [15, 17].

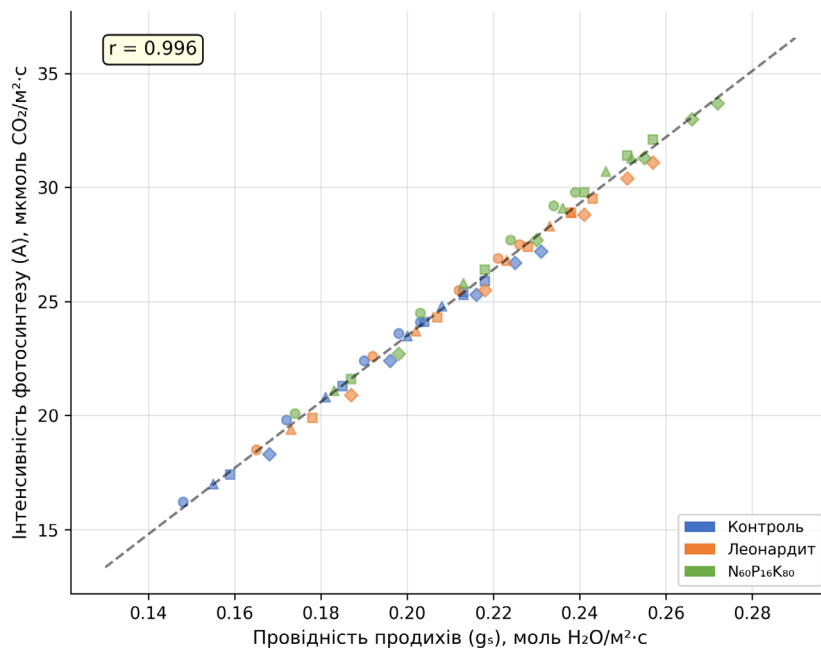


Рис. 3. Залежність інтенсивності фотосинтезу від провідності продихів ($r = 0,99$)

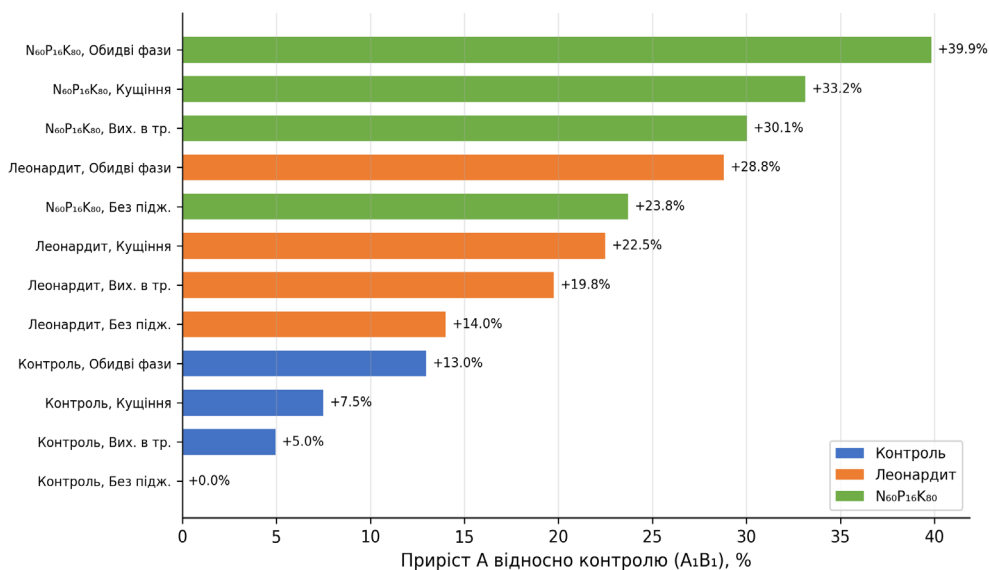


Рис. 4. Приріст інтенсивності фотосинтезу відносно контролю (A1B1) за різних варіантів

Ранжування варіантів (рис. 4) показало максимальний приріст +40,1% (A3B4). Важливо, що навіть «Леонардит без підживлення» (+14,2%) перевищував «Контроль + обидві фази» (+13,2%), що свідчить про домінування фактора удобрення. Органічна система з гуматами (+28,8%) забезпечує 72% ефекту мінеральної при значно нижчих витратах.

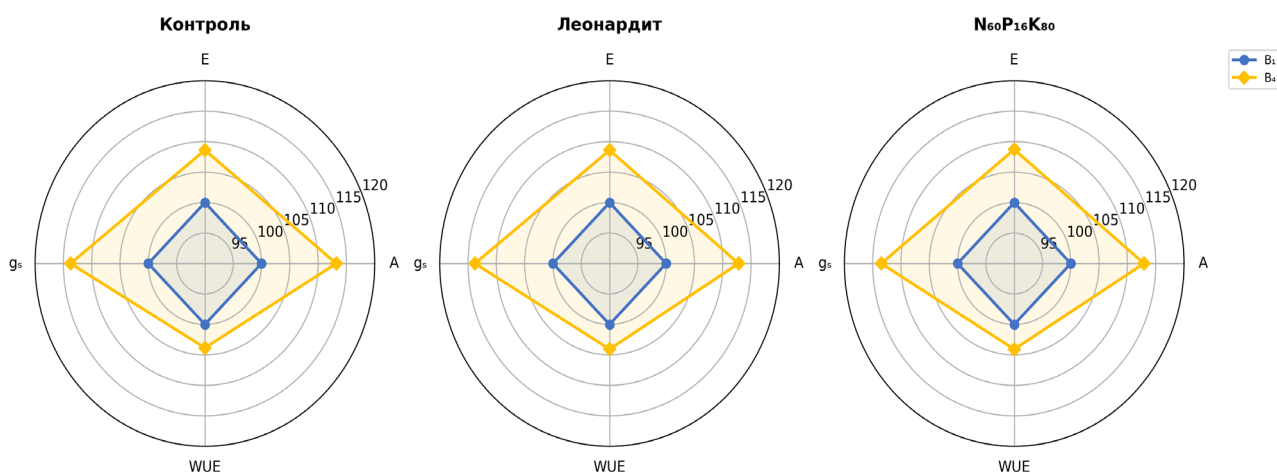


Рис. 5. Відносний ефект дворазового підживлення (B4 vs B1 = 100%) на параметри газообміну

Радарні діаграми (рис. 5) підтверджують універсальність механізму дії гуматів: профіль впливу подібний для всіх систем удобрення з найвираженішим ефектом на g_s (+12,5–13,5%). Це узгоджується з гіпотезою про стимуляцію кореневої системи та покращення водозабезпечення [11, 18].

Висновки

Інтенсивність фотосинтезу зростала від 16,2–22,7 до 24,1–33,7 мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2\cdot\text{с}$. Мінеральна система перевищувала контроль на 24,3%. WUE (5,77–7,82) зростала з роками – C4-механізм забезпечує відсутність компромісу «фотосинтез–транспірація». Кореляція $A-g_s$ ($r = 0,99$) підтверджує продиховий контроль фотосинтезу. За органічної системи Fv/Fm та PI(abs) вищі, ніж за мінеральної – специфічний ефект гумінових кислот на ФС II. Дворазове підживлення підвищувало A на 11,7–12,9%, g_s – на 12,5–13,5%.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні впливу кліматичних стресів на газообмін міскантусу та оцінці зв'язку параметрів флуоресценції з врожайністю.

Список використаних джерел

1. Long, S. P., Zhu, X., Naidu, S. L., & Ort, D. R. (2006). Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell & Environment*, 29(3), 315–330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x>
2. Naidu, S. L., & Long, S. P. (2004). Potential mechanisms of low-temperature tolerance of C4 photosynthesis in *Miscanthus × giganteus*: An *in vivo* analysis. *Planta*, 220(1), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1322-6>
3. Dohleman, F. G., & Long, S. P. (2009). More productive than maize in the Midwest: How does miscanthus do it? *Plant Physiology*, 150(4), 2104–2115. <https://doi.org/10.1104/pp.109.139162>
4. Ghannoum, O. (2008). C4 photosynthesis and water stress. *Annals of Botany*, 103(4), 635–644. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn093>
5. Lawson, T., & Blatt, M. R. (2014). Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. *Plant Physiology*, 164(4), 1556–1570. <https://doi.org/10.1104/pp.114.237107>
6. Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
7. Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo*. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
8. Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Srivastava, A. (2004). Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Advances in photosynthesis and respiration* (pp. 321–362). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_12
9. Stirbet, A., Lazár, D., Kromdijk, J., & Govindjee, G. (2018). Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? *Photosynthetica*, 56(Special Issue), 86–104. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0770-3>
10. Malinská, H., Pidlisnyuk, V., Nebeská, D., Erol, A., Medžová, A., & Trögl, J. (2020). Physiological response of *Miscanthus × giganteus* to plant growth regulators in nutritionally poor soil. *Plants*, 9(2), Article 194. <https://doi.org/10.3390/plants9020194>
11. Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., & Cavagnaro, T. R. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances. *Advances in Agronomy*, 124, 37–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>
12. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
13. Shah, Z. H., Rehman, H. M., Akhtar, T., Alsamadany, H., Hamooh, B. T., Mujtaba, T., Daur, I., Al Zahrani, Y., Alzahrani, H. A. S., Ali, S., Yang, S. H., & Chung, G. (2018). Humic substances: Determining potential molecular regulatory processes in plants. *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 263. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00263>
14. Shen, J., Guo, M., Wang, Y., Yuan, X., Wen, Y., Song, X., Dong, S., & Guo, P. (2020). Humic acid improves the physiological and photosynthetic characteristics of millet seedlings under drought stress. *Plant Signaling & Behavior*, 15(8), Article 1774212. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1774212>
15. Pogrzeba, M., Rusinowski, S., Sitko, K., Krzyżak, J., Skalska, A., Małkowski, E., Ciszek, D., Werle, S., McCalmont, J. P., Mos, M., & Kalaji, H. M. (2017). Relationships between soil parameters and physiological status of *Miscanthus × giganteus* cultivated on soil contaminated with trace elements under NPK fertilisation vs. microbial inoculation. *Environmental Pollution*, 225, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.058>
16. Prysiazniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2> [In Ukrainian]
17. Feng, X. P., Chen, Y., Qi, Y. H., Yu, C. L., Zheng, B.-S., Brancourt-Hulmel, M., & Jiang, D.-A. (2012). Nitrogen enhanced photosynthesis of *Miscanthus* by increasing stomatal conductance and phosphoenolpyruvate carboxylase concentration. *Photosynthetica*, 50(4), 577–586. <https://doi.org/10.1007/s11099-012-0061-3>
18. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11), 1527–1536. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8)

Gas exchange parameters and functional state of the photosystem of *Miscanthus × giganteus* under different fertiliser systems and foliar application of potassium humate

V. H. Nosenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine

Corresponding author: Valerii Nosenko, nosenko.v@ukr.net

Citation: Nosenko, V. H. (2026). Gas exchange parameters and functional state of the photosystem of *Miscanthus × giganteus* under different fertiliser systems and foliar application of potassium humate. *Bioenergy*, 1, 77–83. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp77-83>

Aim. To identify dynamics of gas exchange parameters (photosynthetic rate, transpiration, stomatal conductance, and water use efficiency) and chlorophyll fluorescence indices [Fv/Fm, PI(abs)] of *Miscanthus × giganteus* depending on fertiliser system and foliar application of potassium humate. **Methods.** The study was conducted in 2021–2025 at the Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Velykosnitynske named after O. V. Muzychenko” on strongly eroded podzolised chernozem soil. The experimental design included three fertiliser systems: no fertiliser (control), organic (Leonardite, 100 kg/ha), and mineral (N₆₀P₁₆K₈₀), as well as four variants of foliar application of potassium humate (2 l/ha). Gas exchange parameters were measured using an LI-6200 system, while chlorophyll fluorescence was assessed with a Handy PEA fluorimeter. Statistical analysis was performed using analysis of variance (ANOVA). **Results.** Improved mineral nutrition and the application of potassium humate promoted a simultaneous increase in all gas exchange parameters. The photosynthetic rate increased from 16.2–22.7 to 24.1–33.7 μmol CO₂ m⁻²·s, depending on year and treatment. Maximum values were obtained from the combination of the mineral fertiliser system with two foliar applications of potassium humate, where the increase in photosynthesis relative to the control reached 40.1%. The mineral fertiliser system ensured the highest photosynthetic activity; however, the organic system was characterised by a superior functional state of photosystem II, with Fv/Fm reaching 0.797 and PI(abs) 3.39, exceeding the corresponding values under mineral fertilisation. PI(abs) exhibited greater sensitivity to changes in nutritional conditions than Fv/Fm. A strong linear relationship was observed between photosynthetic rate and stomatal conductance ($r = 0.99$), indicating dominance of stomatal regulation of photosynthesis. Two foliar applications of potassium humate increased photosynthesis by 11.7–12.9% and stomatal conductance by 12.5–13.5%. The organic system combined with humate application achieved approximately 72% of the effect of mineral fertilisation. **Conclusions.** The combination of soil fertilisation with foliar application of potassium humate significantly enhances gas exchange and improves the functional state of the photosynthetic apparatus of giant miscanthus. The mineral fertiliser system is the most effective in increasing photosynthetic productivity, whereas the organic system contributes to stabilisation of photosystem II function and optimisation of the physiological status of plants.



Keywords: *Miscanthus × giganteus*; photosynthetic rate; water use efficiency; transpiration; stomatal conductance; Fv/Fm; PI(abs); OJIP test; chlorophyll fluorescence; Leonardite; potassium humate.

ORCID

Валерій Носенко / Valerii Nosenko <https://orcid.org/0000-0002-4917-3514>

УДК 633.85:631.5:620.92

Енергетична ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

І. В. Царук* , А. С. Риженко 

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут», вул. Шевченка, 10, м. Ніжин, Чернігівська обл., 16600, Україна

*Автор для листування: Ілля Царук, illik_94@ukr.net

Цитування: Царук І. В., Риженко А. С. Енергетична ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 84–91. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp84-91>

Мета. Установити енергетичну ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення в умовах Лівобережного Лісостепу України та обґрунтувати оптимальні варіанти технології з позицій енергетичного балансу і ресурсоощадності. **Методи.** Дослідження проводили у 2019–2023 рр. в умовах ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут» на чорноземі опідзоленому. Об'єктами дослідження були суріпиця озима сорту 'Оріана', ріпак озимий гібрида 'Мерседес' і тифон сорту 'Оракам'. Культури вирощували за трьох рівнів удобрення: без добрив, N80P60K60 та N120P90K90. Енергетичну ефективність оцінювали за методикою О. К. Медведовського та П. І. Іваненка з використанням стандартних технологічних карт. **Результати.** Сукупні енерговитрати істотно зростали зі збільшенням норм мінерального удобрення: від 16,5–19,7 ГДж/га на контролі до 38,0–41,2 ГДж/га за N80P60K60 і 54,2–57,4 ГДж/га за N120P90K90. Найвищу енергоємність урожаю насіння формували ріпак озимий – 102,1–117,1 ГДж/га, тоді як тифон забезпечував 91,9–103,6 ГДж/га, а суріпиця озима – 59,7–68,1 ГДж/га. Максимальний коефіцієнт енергетичної ефективності (К_е) за врахування лише товарного насіння встановлено у тифону без удобрення – 5,57; у ріпаку він становив 5,18, у суріпиці – 3,45. За внесення N80P60K60 К_е у тифону та ріпаку знижувався до 2,73, а у суріпиці – до 1,68. Подальше підвищення норми добрив до N120P90K90 зумовлювало зменшення К_е до 1,75–2,04, що свідчить про енергетичну недоцільність надмірного удобрення. Найнижчу енергетичну собівартість насіння забезпечував тифон – 4,8 ГДж/т на контролі. За повного використання надземної біомаси К_е тифону зростав до 20,17. **Висновки.** Оптимальним варіантом удобрення для озимого ріпаку 'Мерседес' і тифону 'Оракам' з позицій комплексної енергетичної ефективності є норма N80P60K60, яка забезпечує високий вихід енергії, прийнятний рівень К_е та збереження родючості ґрунту. Підвищення норми удобрення до N120P90K90 є енергетично невиправданим. Тифон характеризується найвищою ресурсоощадністю та значним потенціалом використання в біоенергетичних системах за умови комплексної переробки насіння і соломи.

Ключові слова: тифон; ріпак озимий; суріпиця озима; енергетична ефективність; коефіцієнт енергетичної ефективності; енерговитрати; мінеральне удобрення; біоенергетика; Лісостеп України.

Вступ

Сучасні умови ведення сільського господарства в Україні характеризуються нестабільністю цін на енергоносії, мінеральні добрива та сільськогосподарську продукцію, що ускладнює оцінку економічної ефективності технологій вирощування. У цьому контексті енергетичний аналіз

Одержано 26.02.2026 • Погоджено 24.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

набуває особливого значення, оскільки дозволяє оцінити баланс між енергією, що надходить у виробничий процес, та енергією, акумульованою в готовій продукції, без прив'язки до коливань ринкових цін [1–3].

Енергетична ефективність технологій вирощування культур родини *Brassicaceae* є особливо актуальним питанням з огляду на їхнє стратегічне значення для біоенергетичної галузі: ріпак озимий слугує сировиною для виробництва біодизелю, а тифон – перспективна культура комплексного використання, надземна маса якої придатна для виробництва твердого біопалива та біогазу. Європейський Союз послідовно посилює регуляторні вимоги щодо вуглецевого сліду продукції, тому енергетична оптимізація технологій вирощування експортно-орієнтованих культур стає не лише економічно, а й екологічно обґрунтованою [4–6].

Питанням енергетичної оцінки технологій вирощування сільськогосподарських культур присвячено фундаментальну роботу О. К. Медведовського та П. І. Іваненка [7]. Сучасні дослідження систем удобрення капустияних культур доводять, що збільшення норм мінерального удобрення зумовлює лінійне зростання врожайності лише до певного рівня, після чого її приріст стає несумірним з додатковими енерговитратами на добрива [8, 9]. Зокрема, В. А. Мазур та ін. [9] установили, що максимальний вихід олії з ріпаку озимого досягається за норми N₂₄₀P₁₂₀K₂₄₀, проте енергетичний баланс таких технологій залишається суперечливим.

За даними попередніх досліджень авторів [10], для нової в Україні культури – тифону сорту ‘Оракам’ – встановлено високу пластичність формування врожайності та виходу енергії з надземної маси за варіантів удобрення N₈₀P₆₀K₆₀ та N₁₂₀P₉₀K₉₀, що відповідає інтенсивним умовам вирощування. Однак комплексний енергетичний аналіз вирощування цієї культури порівняно з традиційними капустияними культурами – ріпаком озимим та суріпицею озимою – у форматі окремого дослідження раніше не проводився.

Мета дослідження – установити енергетичну ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення в умовах Лівобережного Лісостепу України й обґрунтувати оптимальні варіанти технології з погляду енергетичного балансу.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконували впродовж 2019–2023 рр. в умовах ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут» (Чернігівська обл.) [10]. Ґрунт – чорнозем опідзолений з вмістом гумусу 3,38–3,76%, мінерального азоту (NH₄ + NO₃) – 18,6–29,4 мг/кг, рухомого фосфору – 106,6–120,6 мг/кг (за Чириковим), обмінного калію – 50,04–72,2 мг/кг (за Чириковим); рН – 5,7–6,5.

Об'єктами дослідження були три культури родини *Brassicaceae*: суріпиця озима сорту ‘Оріана’, ріпак озимий гібрида ‘Мерседес’ та тифон сорту ‘Оракам’. Усі культури вирощували за ширини міжрядь 15 см на трьох варіантах удобрення: контроль (без добрив), N₈₀P₆₀K₆₀ та N₁₂₀P₉₀K₉₀. Площа елементарної ділянки – 35 м², облікової – 25 м², повторність триразова.

Розрахунок енергетичної ефективності вирощування виконано за методикою О. К. Медведовського та П. І. Іваненка [7] з використанням типових технологічних карт вирощування озимих капустияних культур. Методика передбачає послідовний розрахунок таких показників:

– *Сукупні енерговитрати* (Евх, ГДж/га) – сума енергетичних витрат на всі технологічні операції (механізовані, хімічні, посівні матеріали), у тому числі енергоємність мінеральних добрив (ДЕ N – 86,8 МДж/кг д. р., Р₂O₅ – 12,6 МДж/кг д. р., К₂O – 8,3 МДж/кг д. р.), пального, насіння, засобів захисту рослин;

– *Енергоємність врожаю насіння* (Евих, ГДж/га) – розраховано як добуток урожайності насіння (т/га) на калорійність насіння (для суріпиці – 6280 ккал/кг, ріпаку – 6518 ккал/кг, тифону – 6360 ккал/кг) з перерахунком до ГДж/га;

– *Коефіцієнт енергетичної ефективності* (Кее) – відношення енергоємності врожаю до сукупних енерговитрат (Кее = Евих / Евх); значення Кее > 1 свідчить про енергетичну вигідність технології, Кее = 1 – про беззбитковість;

– *Енергоємність 1 т насіння* (ГДж/т) – відношення сукупних енерговитрат до урожайності насіння; характеризує енергетичну собівартість продукції;

– *Чистий приріст енергії* (ΔЕ, ГДж/га) – різниця між енергоємністю врожаю та сукупними енерговитратами.

Базові показники енерговитрат на технологію за варіантами без удобрення взято з технологічних карт вирощування капустяних культур; додаткові енерговитрати від внесення мінеральних добрив розраховано за енергетичними еквівалентами діючої речовини: ΔE для $N_{80}P_{60}K_{60} = 21,5$ ГДж/га, для $N_{120}P_{90}K_{90} = 37,7$ ГДж/га.

Результати дослідження

За результатами розрахунків встановлено, що сукупні енерговитрати на технологію вирощування озимих капустяних культур істотно залежать від рівня мінерального живлення (рис. 1). На контрольних варіантах без удобрення енерговитрати становили 16,5 ГДж/га для тифону, 17,3 ГДж/га для суріпиці та 19,7 ГДж/га для ріпаку озимого. Дещо вищий рівень енерговитрат на технології вирощування ріпаку зумовлений підвищеними нормами захисту рослин та насінного матеріалу.

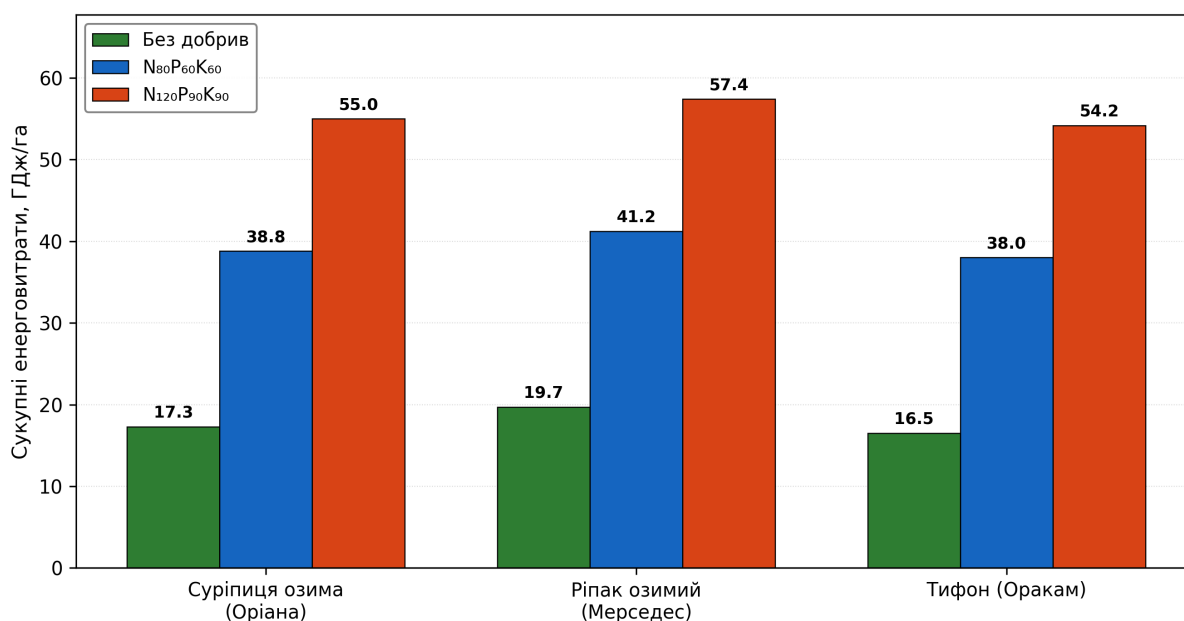


Рис. 1. Сукупні енерговитрати на технологію вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

При застосуванні мінерального удобрення енерговитрати зростали в основному за рахунок енергоємної складової добрив. Зокрема, внесення $N_{80}P_{60}K_{60}$ підвищувало сукупні енерговитрати у 2,1–2,4 раза до 38,0–41,2 ГДж/га, а застосування $N_{120}P_{90}K_{90}$ – у 2,9–3,3 раза до 54,2–57,4 ГДж/га. Слід підкреслити, що серед усіх компонентів технології саме мінеральне удобрення є найбільш енергозатратним, що зумовлено високою енергоємністю синтетичного азоту (близько 86,8 МДж/кг д. р.). Ця обставина має ключове значення при формуванні рекомендацій щодо оптимальних варіантів удобрення з точки зору енергетичного балансу.

Аналіз енергоємності врожаю насіння (рис. 2) показав, що максимальний показник забезпечує ріпак озимий 'Мерседес' – 102,1; 112,4 та 117,1 ГДж/га на варіантах контролю, $N_{80}P_{60}K_{60}$ та $N_{120}P_{90}K_{90}$ відповідно. Тифон 'Оракам' займає друге місце з показниками 91,9; 103,6 та 95,1 ГДж/га, а мінімальну енергоємність врожаю формувала суріпиця озима – 59,7; 65,2 та 68,1 ГДж/га. Зниження енергоємності врожаю тифону при переході від $N_{80}P_{60}K_{60}$ до $N_{120}P_{90}K_{90}$ (з 103,6 до 95,1 ГДж/га) є наслідком зниження врожайності насіння на цьому варіанті, що раніше було пояснено особливостями кореневої системи культури [10].

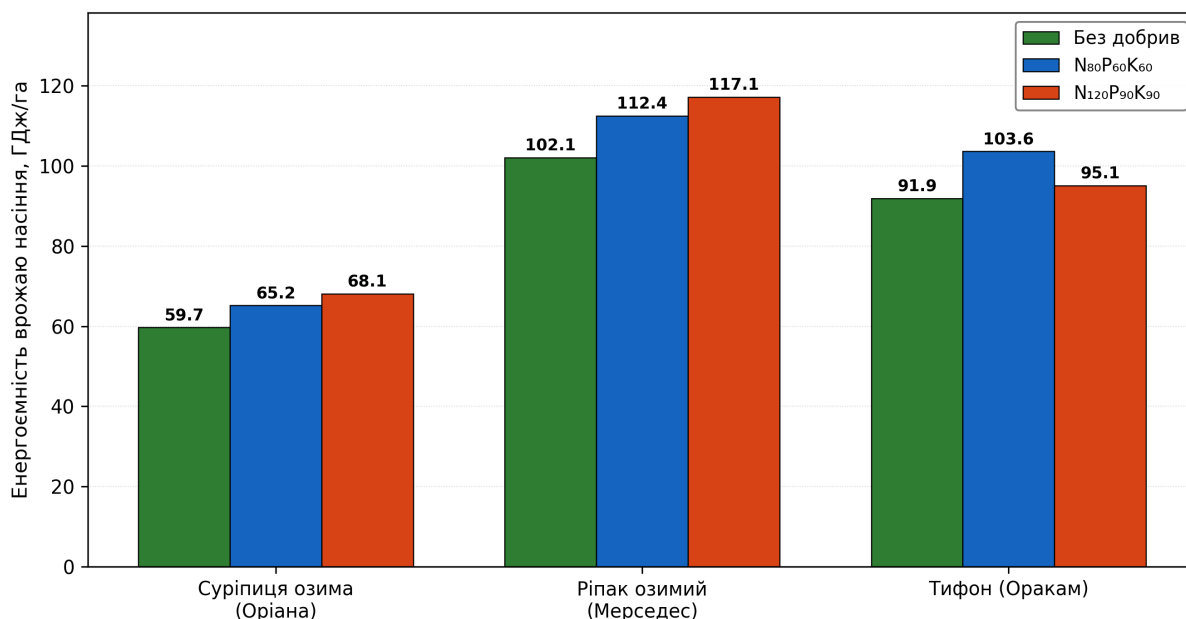


Рис. 2. Енергоємність врожаю насіння озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

Інтегральним показником, що поєднує дані енерговитрат та енергоємності врожаю, є коефіцієнт енергетичної ефективності (K_{ee}). За результатами розрахунків (рис. 3) встановлено, що максимальний K_{ee} забезпечує тифон ‘Оракам’ без застосування добрив – 5,57. Високі показники K_{ee} на контрольних варіантах характерні і для ріпаку озимого (5,18) та суріпиці озимої (3,45). Це пояснюється тим, що на варіантах без добрив виключається найбільш енергомістка стаття витрат – мінеральне удобрення, тоді як рослини використовують природну родючість ґрунту.

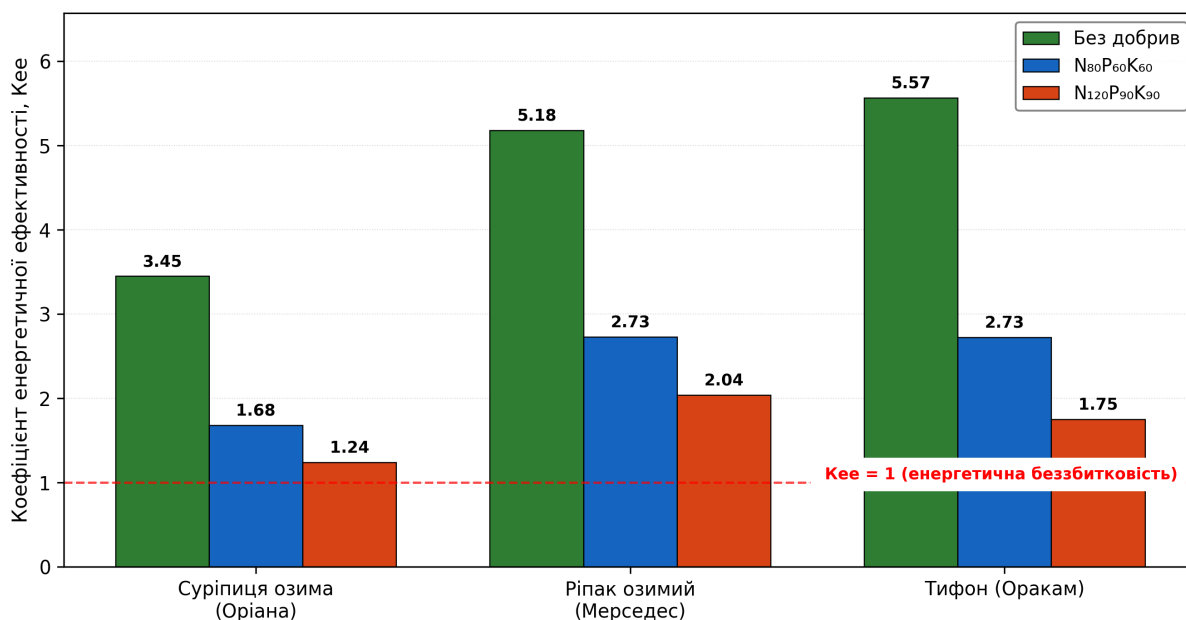


Рис. 3. Коефіцієнт енергетичної ефективності (K_{ee}) вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* з урахуванням лише товарного насіння

Однак висока енергетична ефективність на контролі досягається ціною поступового виснаження ґрунту, оскільки культури родини *Brassicaceae* характеризуються високим виносом макроелементів з надземною біомасою (тифон – 119,7 кг/га азоту, 50,7 кг/га фосфору, 137,3 кг/га калію та 31,8 кг/га кальцію [10]). Тому довготривале вирощування цих культур без застосу-

вання мінерального удобрення є неприйнятним з точки зору раціонального природокористування та сталого розвитку аграрного виробництва.

За застосування мінерального удобрення в нормі $N_{80}P_{60}K_{60}$ Кее тифону та ріпаку озимого виявився практично однаковим – 2,73 в обох випадках, що значно перевищує показник беззбитковості ($K_{ee} = 1$) і свідчить про енергетичну доцільність такого варіанту. Суріпиця озима за аналогічного варіанту удобрення мала Кее лише 1,68, що пов'язано з її нижчою врожайністю та меншою калорійністю насіння.

Підвищення норми мінерального удобрення до $N_{120}P_{90}K_{90}$ закономірно знижувало Кее в усіх досліджуваних культур: для тифону – до 1,75, для ріпаку – до 2,04, а для суріпиці – до критично низького рівня 1,24, що наближається до межі енергетичної беззбитковості. Цей результат однозначно вказує на те, що застосування підвищених норм добрив під суріпицю озиму є енергетично невиправданим.

Щодо ріпаку та тифону, то вони демонструють збереження енергетичної вигідності навіть за високих норм удобрення, проте з істотним зниженням Кее, що ставить під сумнів агрономічну доцільність такого підходу.

Цікавим аспектом енергетичного аналізу є оцінка потенціалу комплексного використання надземної біомаси, коли на енергетичні цілі переробляється не лише товарне насіння, а й солома (рис. 4). За такого підходу Кее зростає в кратному обсязі: для тифону на контрольному варіанті він складає 20,17, для ріпаку – 16,75, для суріпиці – 15,63. Навіть при застосуванні $N_{120}P_{90}K_{90}$ Кее тифону за повного використання біомаси становить 6,33, що демонструє високий біоенергетичний потенціал цієї культури за відповідної організації переробки.

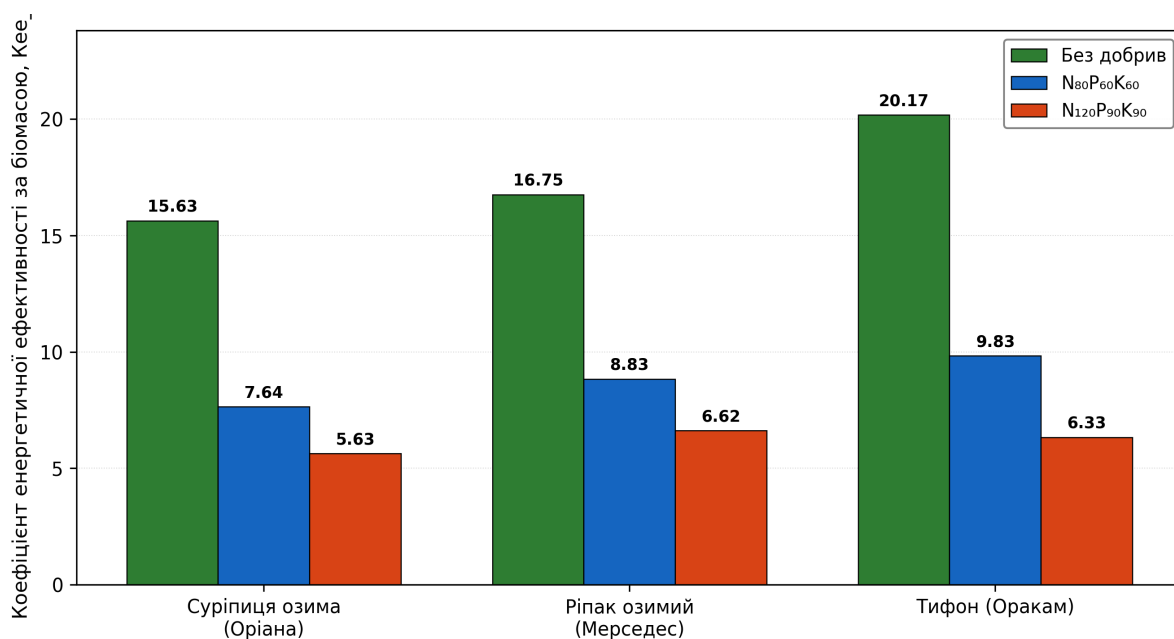


Рис. 4. Коефіцієнт енергетичної ефективності (Кее) вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* за повного використання надземної біомаси (насіння + солома) на біоенергетичні цілі

Енергетична собівартість виробництва 1 т насіння (рис. 5) є зворотним показником продуктивності праці та ресурсоощадності. Найнижчу енергетичну собівартість насіння забезпечує тифон 'Оракам' без удобрення – 4,8 ГДж/т, що пояснюється поєднанням високої врожайності з мінімальними енерговитратами. На варіанті $N_{80}P_{60}K_{60}$ ця величина зростає для тифону до 9,8 ГДж/т, для ріпаку – до 10,0 ГДж/т, а для суріпиці – до 15,6 ГДж/т. Подвоєна норма удобрення $N_{120}P_{90}K_{90}$ призводить до енергетичної собівартості 13,4–21,2 ГДж/т, причому максимальне значення характерне для суріпиці озимой.

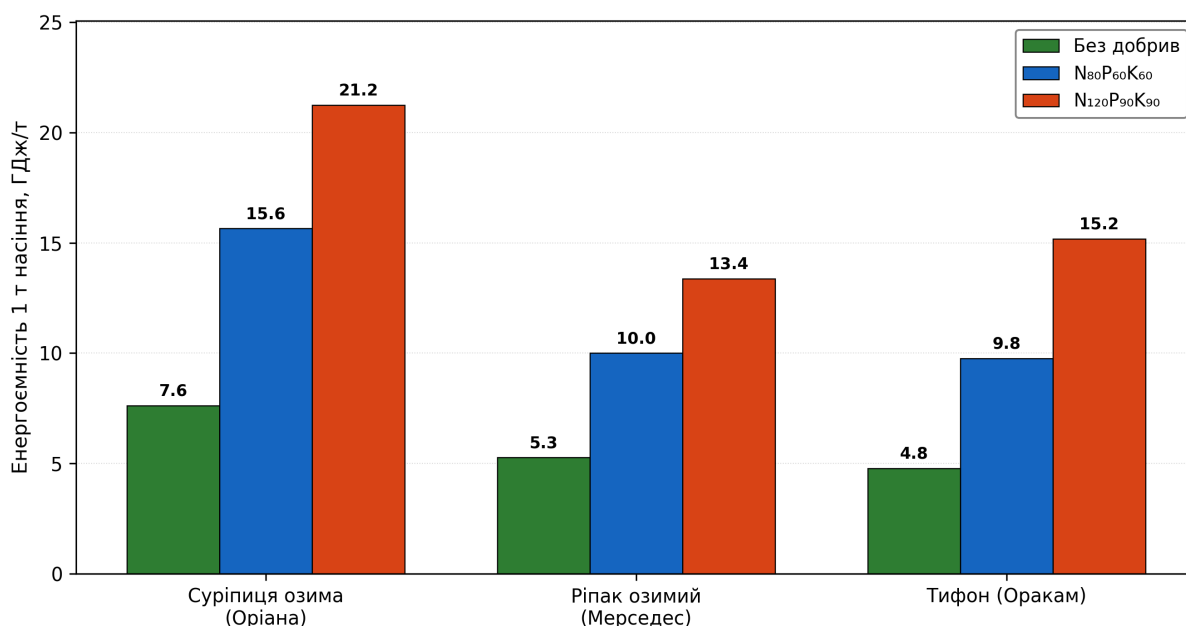


Рис. 5. Енергоємність виробництва 1 тонни насіння озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

Чистий приріст енергії, який характеризує абсолютну величину енергетичного прибутку з одиниці площі за вирахуванням всіх енерговитрат (рис. 6), є важливим показником, особливо при плануванні великих обсягів виробництва біоенергетичної сировини. За цим показником лідером є тифон 'Оракам' за варіанту удобрення N₈₀P₆₀K₆₀ з показником 65,6 ГДж/га (за умови врахування лише товарного насіння). Ріпак озимий за аналогічного варіанту удобрення забезпечує 71,2 ГДж/га, а суріпиця – лише 26,4 ГДж/га.

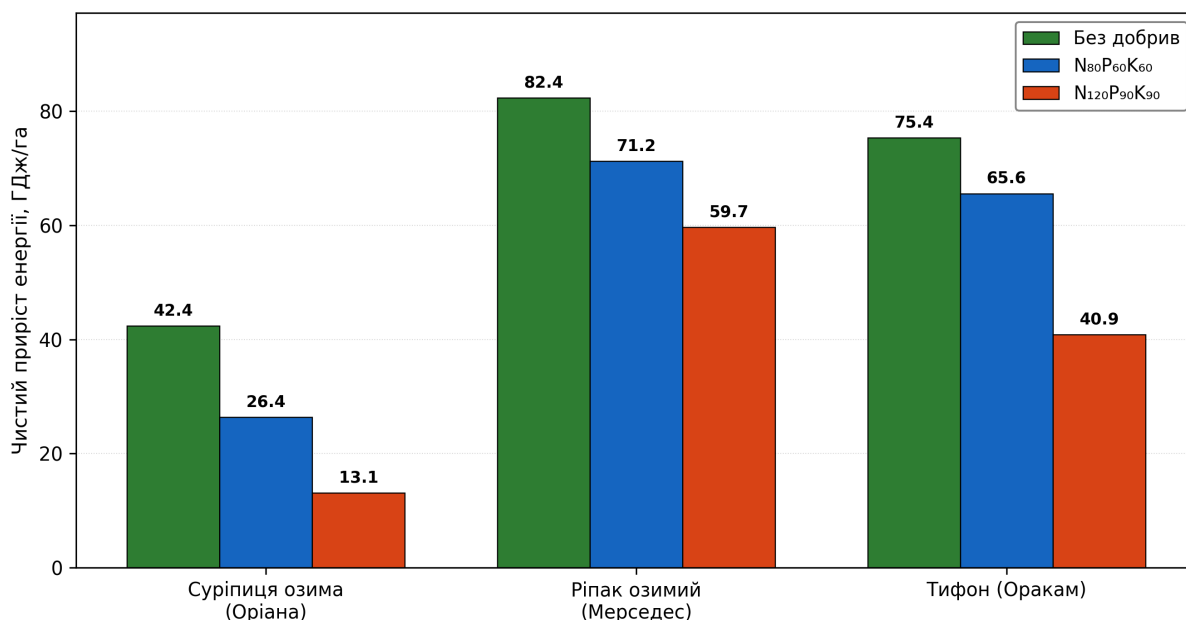


Рис. 6. Чистий приріст енергії за вирощування озимих культур родини *Brassicaceae*

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що з погляду комплексної енергетичної ефективності оптимальним варіантом технології вирощування досліджуваних культур родини *Brassicaceae* в умовах Лівобережного Лісостепу є застосування мінерального удобрення в нормі N₈₀P₆₀K₆₀. Цей варіант поєднує помірний рівень енерговитрат, високий вихід енергії з урожаєм, прийнятний рівень Кеє (2,73 для тифону та ріпаку) та забезпечує підтримку родючості ґрунту. Підвищення норми удобрення до N₁₂₀P₉₀K₉₀ є енергетично невигідним для всіх досліджуваних культур, а особливо критично – для суріпиці озимої.

Висновки

Сукупні енерговитрати на технологію вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* істотно залежать від рівня мінерального удобрення: на варіантах без добрив вони становлять 16,5–19,7 ГДж/га, за внесення N₈₀P₆₀K₆₀ зростають до 38,0–41,2 ГДж/га (у 2,1–2,4 раза), а за N₁₂₀P₉₀K₉₀ – до 54,2–57,4 ГДж/га (у 2,9–3,3 раза). Найбільш енергомісткою статтею витрат є мінеральні добрива, насамперед азотні.

Найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності за врахування лише товарного насіння забезпечує тифон ‘Оракам’ без застосування добрив (К_ее = 5,57); при застосуванні N₈₀P₆₀K₆₀ показник знижується до 2,73, а за N₁₂₀P₉₀K₉₀ – до 1,75. Аналогічна тенденція зниження К_ее зі зростанням рівня удобрення характерна для всіх досліджуваних культур.

Оптимальним варіантом мінерального удобрення з позицій комплексної енергетичної ефективності для тифону ‘Оракам’ та ріпаку озимого ‘Мерседес’ є норма N₈₀P₆₀K₆₀ (К_ее = 2,73 для обох культур, чистий приріст енергії 65,6 та 71,2 ГДж/га відповідно). Для суріпиці озимої ‘Оріана’ навіть помірне удобрення N₈₀P₆₀K₆₀ забезпечує лише К_ее = 1,68, а застосування N₁₂₀P₉₀K₉₀ призводить до критичного зниження ефективності (К_ее = 1,24).

Енергетична собівартість виробництва 1 т насіння є мінімальною для тифону ‘Оракам’ (4,8 ГДж/т на контролі та 9,8 ГДж/т за N₈₀P₆₀K₆₀), що підтверджує його перспективність як ресурсоощадної біоенергетичної культури для умов Лівобережного Лісостепу України.

За повного використання надземної біомаси (насіння + солома) на біоенергетичні цілі коефіцієнт енергетичної ефективності тифону ‘Оракам’ зростає до 20,17 (контроль) та 9,83 (N₈₀P₆₀K₆₀), що обґрунтовує доцільність розробки комплексних технологій переробки культур родини *Brassicaceae* з утилізацією побічної продукції.

Список використаних джерел

1. Kalinichenko, O. V. (2018). Theoretical essence of the categories “energy efficiency” and “energy efficiency in crop production”. *Economics of Agro-Industrial Complex*, 10, 86–95. [In Ukrainian]
2. Vozhehova, R., Halchenko, N., Kotelnikov, D., & Maliarchuk, V. (2021). Energy efficiency of technology of cultivation of agricultural crops on the irrigated lands of the South of Ukraine. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine*, 28, 272–281. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28\(42\)-23](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28(42)-23) [In Ukrainian]
3. Humentyk, M. Ya., & Bondar, V. S. (2018). Economic efficiency of high-yielding bioenergy crops for biofuel production. *Bioenergy*, 1, 16–19. [In Ukrainian]
4. Lykhochvor, V. V., & Petrychenko, V. F. (2020). *Crop production. Modern intensive technologies for growing major field crops* (5th ed., rev.). Ukrainian Technologies. [In Ukrainian]
5. Rakhmetov, D. B. (2011). *Theoretical and applied aspects of plant introduction in Ukraine*. Agrar Media Group. [In Ukrainian]
6. Tsaruk, I. V., & Rakhmetov, D. B. (2020). Typhon is a new plant of multifunctional importance. *Taurian Scientific Bulletin*, 112, 157–160. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.112.22> [In Ukrainian]
7. Medvedovskyi, O. K., & Ivanenko, P. I. (1988). *Energy analysis of intensive technologies in agricultural production*. Urozhai. [In Ukrainian]
8. Ren, T., Zou, J., Wang, Y., Li, X. K., Cong, R. H., & Lu, J. W. (2016). Estimating nutrient requirements for winter oilseed rape based on QUEFTS analysis. *The Journal of Agricultural Science*, 154(3), 425–437. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000301>
9. Mazur, V. A., Matsera, O. O., Shkatula, Yu. M., & Zabarnyi, O. S. (2025). *Influence of cultivation technology elements on productivity and seed quality of winter oilseed rape under conditions of the Right-Bank Forest-Steppe*. Vinnytsia National Agrarian University. [In Ukrainian]
10. Tsaruk, I. V., Ryzhenko, A., Kucher, L., Panchuk, T., Moroz, S., Bordyuzha, N., & Bordiuzha, I. (2025). Ecological characteristics of productivity formation in winter *Brassicaceae* crops under different fertilization rates. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(7), 384–391. <https://doi.org/10.12912/27197050/205573>

Energy efficiency of winter *Brassicaceae* crops under different mineral fertiliser rates

I. V. Tsaruk*, A. S. Ryzhenko

Separate Structural Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Nizhyn Agrotechnical Institute”, 10 Shevchenka St., Nizhyn, Chernihiv Region, 16600, Ukraine

*Corresponding author: Illia Tsaruk, illik_94@ukr.net

Citation: Tsaruk, I. V., & Ryzhenko, A. S. (2026). Energy efficiency of winter *Brassicaceae* crops under different mineral fertiliser rates. *Bioenergy*, 1, 84–91. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp84-91>

Aim. Evaluate energy efficiency of winter crops belonging to the *Brassicaceae* family under different rates of mineral fertilisers in the Left-Bank Forest Steppe zone of Ukraine. **Methods.** Field experiments were carried out in 2019–2023 at the Nizhyn Agrotechnical Institute of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine on podzolised chernozem soil. The study focused on winter cress (*Brassica rapa* var. *oleifera*) cv. ‘Oriiana’, winter oilseed rape (*Brassica napus*) hybrid ‘Mercedes’, and typhon (*Brassica rapa* × *B. napus*) cv. ‘Orakam’. Three fertiliser treatments were applied: no fertiliser (control), N₈₀P₆₀K₆₀ and N₁₂₀P₉₀K₉₀. Energy efficiency was evaluated using the method developed by Medvedovskiy and Ivanenko based on standard technological charts. **Results.** Total energy inputs increased substantially with increasing fertiliser rates, ranging from 16.5–19.7 GJ/ha in the control to 38.0–41.2 GJ/ha under N₈₀P₆₀K₆₀ and 54.2–57.4 GJ/ha under N₁₂₀P₉₀K₉₀. Winter oilseed rape produced the highest energy output from seed yield (102.1–117.1 GJ/ha), followed by typhon (91.9–103.6 GJ/ha), whereas winter cress produced 59.7–68.1 GJ/ha. The highest energy efficiency, calculated considering only marketable seed, was observed in unfertilised typhon (5.57); corresponding values for winter oilseed rape and winter cress were 5.18 and 3.45, respectively. Application of N₈₀P₆₀K₆₀ reduced energy efficiency to 2.73 in typhon and winter oilseed rape and to 1.68 in winter cress. Further increases in fertiliser rates to N₁₂₀P₉₀K₉₀ resulted in a decline in energy efficiency to 1.75–2.04, indicating the energetic inefficiency of excessive fertiliser application. Typhon exhibited the lowest energy cost of seed production, amounting to 4.8 GJ/t in the control treatment. **Conclusions.** When the entire above-ground biomass was utilised, energy efficiency of typhon increased to 20.17. The fertiliser rate N₈₀P₆₀K₆₀ was identified as optimal for winter cress ‘Mercedes’ and typhon ‘Orakam’ in terms of overall energy efficiency, providing high energy output while maintaining soil fertility. Increasing fertiliser application to N₁₂₀P₉₀K₉₀ is energetically unjustified. Typhon is characterised by the highest level of resource-use efficiency and demonstrates considerable potential for bioenergy systems when both seed and straw are utilised.

Keywords: typhon; winter oilseed rape; winter cress; energy efficiency; energy input; mineral fertiliser; bioenergy; Forest Steppe of Ukraine.

ORCID

Ілля Царук / Illia Tsaruk

<https://orcid.org/0000-0002-7383-1919>

Анатолій Риженко / Anatolii Ryzhenko

<https://orcid.org/0000-0001-7850-9171>

УДК 632.51:581.5:631.5

Оптимізація елементів технології вирощування павловнії в умовах Правобережного Лісостепу України

Д. Я. Макух 

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

Автор для листування: Денис Макух, herbolohiya@ukr.net

Цитування: Макух Д. Я. Оптимізація елементів технології вирощування павловнії в умовах Правобережного Лісостепу України. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 92–100. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp92-100>

Мета. Обґрунтувати ефективні елементи технології вирощування павловнії другого року вегетації шляхом оцінювання впливу систем захисту від бур'янів і низькотемпературного стресу на ріст рослин, формування асиміляційної поверхні, продуктивність біомаси та енергетичну ефективність. **Методи.** Дослідження проводили у 2023–2025 рр. на базі ТОВ «Гров Енерджі» (Київська обл.). Схема досліду включала три фактори: гібриди павловнії ('Clone In Vitro 112', 'Pao Tong Zo7' і 'Shan Tong'), система захисту від бур'янів (контроль; Стомп 330, к.е., 5 л/га; Стомп 330, к.е., 5 л/га + Тарга Супер, к.е., 2,0 л/га) та заходи захисту від низьких температур (контроль; осіння обробка ХАРВЕСТ, 5 л/га після опадання понад 40% листя; осіння обробка ХАРВЕСТ, 5 л/га + весняна обробка ХАРВЕСТ, 1 л/га після танення снігу за температури +5 °С; осіння обробка ХАРВЕСТ, 5 л/га + позакореневе підживлення НОВОФЕРТ Ягода за 5–6 діб до можливих заморозків у нормі 10 г/рослину або 6,5 л/га). Визначали динаміку росту рослин, параметри листкового апарату, вміст хлорофілу, урожайність сирої та сухої біомаси, збір енергії й коефіцієнт енергетичної ефективності. **Результати.** Установлено істотний вплив досліджуваних факторів на ріст і продуктивність павловнії. У варіантах без гербіцидного захисту висота рослин наприкінці вегетації становила лише 1,68–1,84 м, а середньодобовий приріст – 0,99–1,10 см/добу. Застосування системи Стомп 330 + Тарга Супер підвищувало кінцеву висоту рослин до 3,46–3,82 м і середньодобовий приріст до 1,97–2,16 см/добу. Найефективніша схема антистресового захисту – ХАРВЕСТ восени + НОВОФЕРТ Ягода перед заморозками – забезпечувала збільшення кількості листків до 54–61 шт./рослину, площі листкової поверхні до 3,67–4,42 м² та вмісту хлорофілу до 43,1–45,6 SPAD-од. Найвищу врожайність біомаси отримано за комплексного поєднання Стомп 330 + Тарга Супер × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ: сира біомаса становила 25,6–29,1 т/га, суха – 9,34–10,83 т/га, збір енергії – 168,1–194,9 ГДж/га, коефіцієнт енергетичної ефективності – 2,69–3,02. Найвищі показники росту, фотосинтетичної активності та продуктивності сформував гібрид 'Shan Tong'. **Висновки.** Для умов Правобережного Лісостепу України ефективність вирощування павловнії другого року вегетації визначається комплексним поєднанням контролювання бур'янів і захисту рослин від низькотемпературного стресу. Найрезультативнішою виявилася система Стомп 330 + Тарга Супер у поєднанні з осіннім застосуванням ХАРВЕСТ і позакореневим підживленням НОВОФЕРТ Ягода. Найбільш адаптивним і продуктивним серед досліджуваних гібридів був 'Shan Tong'.

Ключові слова: павловнія; біомаса; асиміляційна поверхня; фотосинтетична активність; гербіциди; низькотемпературний стрес; енергетична ефективність.

Вступ

Павловнія розглядається як перспективна швидкоросла деревна культура для отримання біомаси та енергетичної сировини. За даними García-Morote та ін. [1], гібрид *Paulownia elongata* × *P. fortunei* здатний формувати значну стовбурову біомасу навіть за умов обмеженого

Одержано 18.02.2026 • Погоджено 27.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

зрощення в напівпосушливому середовищі. Jakubowski [2] узагальнив сучасні підходи до вирощування та використання деревини павловнії, підкресливши її високий продуктивний потенціал і залежність результатів вирощування від кліматичних умов, добору клону та системи догляду.

Дослідження Kadlec та ін. [3] підтверджують можливість адаптації Paulownia 'Clone In Vitro 112'® до умов Центральної Європи, однак автори наголошують на значній ролі погодних умов і агротехнічного супроводу в перші роки вирощування. Подальші роботи цих авторів показали, що обрізування та інші прийоми формування рослин істотно впливають на висотний ріст і продукційний потенціал павловнії [4, 5].

Важливим напрямом є дослідження реакції павловнії на стресові чинники. Katiyar та ін. [6] встановили, що температурний стрес спричиняє суттєві зміни у фізіологічних і молекулярних реакціях *P. elongata*. Це обґрунтовує необхідність застосування технологічних прийомів, спрямованих на підвищення стійкості рослин до несприятливих температурних умов.

Економічну доцільність вирощування павловнії як біомасової культури розглянуто в роботі Testa та ін. [7]. Автори зазначають, що ефективність плантацій залежить від урожайності біомаси, витрат на закладання й догляд, тривалості циклу вирощування та ринкової вартості продукції. Водночас у роботах [8, 9] відзначено, що агротехнічне управління плантаціями павловнії впливає не лише на ріст рослин, а й на біологічну якість ґрунту та мікробіологічну активність.

Методичні підходи до оцінювання енергетичної ефективності короткоротаційних деревних культур наведено в працях Djomo та ін. [10], Rodrigues та ін. [11] і Griffiths та ін. [12]. Автори підкреслюють, що біоенергетична цінність таких насаджень визначається врожайністю біомаси, витратами на технологічні операції, тривалістю ротації та екологічними наслідками вирощування.

Для оцінювання фотосинтетичної активності рослин важливими є показники листової поверхні та вмісту хлорофілу. Liu та ін. [13] довели, що індекс вмісту хлорофілу може бути ефективним показником для прогнозування надземної біомаси та продуктивності рослин. Це є важливим для досліджень павловнії, де формування асиміляційної поверхні прямо пов'язане з накопиченням біомаси.

Окреме значення має оцінювання екологічного навантаження технологій. Shulner та ін. [14] показали, що системи контролю бур'янів і удобрення можуть істотно впливати на показники життєвого циклу та викиди парникових газів. Тому для павловнії доцільно враховувати не лише урожайність, а й енергетичну та екологічну ефективність технології. Вітчизняні дослідження безпосередньо підтверджують важливість контролювання бур'янів у насадженнях павловнії. Макух та ін. [15] встановили, що бур'яни істотно пригнічують ріст і розвиток культури на початкових етапах. Поєднання систем контролю бур'янів із заходами захисту від низьких температур позитивно впливає на ріст, перезимівлю та стабільність насаджень павловнії [16].

Отже, аналіз джерел свідчить, що продуктивність павловнії формується під впливом комплексу чинників: гібрида, умов середовища, системи догляду, контролю бур'янів, захисту від температурного стресу та енергетичної ефективності технології. Саме тому актуальним є комплексне дослідження елементів технології вирощування павловнії в умовах Правобережного Лісостепу України.

Мета дослідження – обґрунтувати ефективні елементи технології вирощування павловнії другого року вегетації шляхом оцінювання впливу систем захисту від бур'янів і низьких температур на ріст, продуктивність біомаси та енергетичну ефективність культури.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконували впродовж 2023–2025 рр. у ТОВ «Гров Енерджі» (с. Ферма, Київська обл.). За рівнем та розподілом опадів територія господарства характеризується як зона нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу. Хоча фактичні погодні умови місцями відрізнялися від середньобагаторічних показників, загалом вони створювали прийнятні умови для ростових процесів і розвитку павловнії.

Ґрунти дослідної ділянки представлені дерново-піщаними та супіщаними відмінами, які характеризуються низьким вмістом гумусу та слабкою водоутримувальною здатністю. Гумусовий горизонт, як правило, малопотужний – 20–30 см, із вмістом гумусу у шарі 0–30 см 0,8–1,2%. Забезпеченість лужногідролізованим азотом є низькою (35–55 мг/кг ґрунту), вміст рухомого фосфору та обмінного калію за Чириковим також невисокий і становить відповідно 3–5 та 4–7 мг/100 г повітряно-сухого ґрунту. Реакція ґрунтового розчину слабкокисла – рН 5,2–5,8, подекуди близька до нейтральної. Ґрунти мають легкий гранулометричний склад, швидко пересихають і є малостійкими до дефляції, що обумовлює необхідність підтримання рослинного покриву або застосування мульчі для поліпшення їх агрофізичних властивостей.

Дослідження проводили за схемою:

Фактор А – гібрид павловнії: 'Clone In Vitro 112', 'Pao Tong Z07', 'Shan Tong'.

Фактор В – система захисту від бур'янів: контроль (без гербіцидів); контроль 2 (насадження без наявності бур'янів), Стомп 330, к. е. (5 л/га); Стомп 330, к. е. (5 л/га) + Тарга Супер, к. е. (2,0 л/га).

Фактор С – захист від впливу низьких температур: без обробки; осіння обробка (Харвест, 5 л/га); осіння + весняна обробка (Харвест, 5 + 1 л/га); осіння обробка (Харвест, 5 л/га) + позакореневе підживлення (Новоферт Ягода).

Насадження павловнії на дослідних ділянках щороку закладали однорічними саджанцями за схемою 4 × 4 м, що забезпечувало густоту 625 рослин/га. Попередником на всіх ділянках був чистий пар, сформований механічним обробітком ґрунту, що максимально зменшувало стартову забур'яненість.

Біометричні показники павловнії – висоту, діаметр стовбура та площу листової поверхні – обліковували в кінці вересня (перед входом у стан спокою). Діаметр стовбура визначали штангенциркулем на висоті 10 см над поверхнею ґрунту, площу листової поверхні – за формулою: $P = D \times Ш \times K$, де P – площа листка, K – перевідний коефіцієнт (0,74), D – довжина листка, $Ш$ – ширина листка [17–19].

Результати дослідження

У другий рік вегетації рослини павловнії характеризуються інтенсивним наростанням наземної маси, активним формуванням листового апарату та посиленням розвитком пагонів. У цей період особливо важливим є забезпечення сприятливих умов для реалізації ростового потенціалу культури, оскільки конкуренція з боку бур'янів може істотно обмежувати доступ рослин до вологи, елементів живлення та світла. Внаслідок цього знижується інтенсивність лінійного приросту, уповільнюється формування асиміляційної поверхні та послаблюється загальний фізіологічний стан насаджень. Оцінювання динаміки висоти рослин упродовж вегетаційного періоду дає змогу визначити реакцію різних гібридів павловнії на умови вирощування та ефективність застосованих систем захисту від бур'янів. Важливими показниками при цьому є висота рослин на початку, у середині та наприкінці вегетації, а також середньодобовий приріст, який відображає інтенсивність ростових процесів за дії досліджуваних технологічних прийомів.

Аналіз динаміки росту рослин павловнії другого року вегетації свідчить, що інтенсивність лінійного приросту істотно залежала як від гібридних особливостей, так і від ефективності системи захисту насаджень від бур'янів. На початку вегетації висота рослин у досліджуваних варіантах змінювалася в межах 0,39–0,51 м, що свідчить про відносно вирівняний стартовий стан рослин після відновлення весняної вегетації. Водночас уже в середині вегетаційного періоду різниця між варіантами суттєво зростала, що вказує на посилення впливу бур'янової конкуренції на реалізацію ростового потенціалу павловнії.

У варіантах контролю без гербіцидів спостерігалось найслабше наростання висоти рослин. Залежно від гібрида, у середині вегетації висота павловнії становила лише 1,10–1,25 м, а наприкінці вегетаційного періоду – 1,68–1,84 м. Середньодобовий приріст у цих варіантах був найнижчим і становив 0,99–1,10 см/добу. Це свідчить про істотне пригнічення росту рослин за умов природної забур'яненості, коли бур'яни конкурували з павловнією за вологу, поживні речовини та світло.

Варіант без бур'янів забезпечував значне покращення ростових процесів. У цьому разі висота рослин у середині вегетації зростала до 2,20–2,48 м, а наприкінці вегетації – до 3,28–3,66 м. Середньодобовий приріст становив 1,85–2,08 см/добу, що майже удвічі перевищувало показники контролю без гербіцидів. Це підтверджує, що усунення конкуренції з боку бур'янів є однією з основних умов формування інтенсивного приросту павловнії у другий рік вегетації.

Застосування ґрунтового гербіциду Стомп 330 у нормі 5 л/га також позитивно впливало на динаміку росту рослин. У цьому варіанті висота павловнії у середині вегетації становила 2,06–2,32 м, а наприкінці – 3,12–3,48 м. Середньодобовий приріст коливався в межах 1,75–1,97 см/добу. Порівняно з контролем без гербіцидів, застосування Стомп 330 забезпечувало приріст кінцевої висоти рослин на 1,40–1,64 м, залежно від гібрида. Це вказує на ефективність ґрунтового гербіцидного захисту в період активного росту павловнії.

Найвищі показники росту одержано за комбінованої системи захисту Стомп 330 + Тарга Супер. У цьому варіанті висота рослин у середині вегетації становила 2,31–2,56 м, а наприкінці вегетації – 3,46–3,82 м. Середньодобовий приріст досягав 1,97–2,16 см/добу. Така система захисту забезпечувала найкращі умови для росту павловнії завдяки зменшенню конкуренції як з боку дводольних, так і злакових бур'янів. Порівняно з контролем без гербіцидів, кінцева висота рослин за комбінованого захисту була більшою на 1,78–2,04 м, що підтверджує високу ефективність цього технологічного прийому.

Серед досліджуваних гібридів найвищу інтенсивність росту мав 'Shan Tong'. У всіх системах захисту він формував вищі показники порівняно з іншими гібридами. За комбінованої системи Стомп 330 + Тарга Супер висота рослин 'Shan Tong' наприкінці вегетації досягала 3,82 м, а середньодобовий приріст становив 2,16 см/добу. Гібрид 'Clone In Vitro 112' також характеризувався високим ростовим потенціалом: у найкращому варіанті його висота становила 3,58 м, а середньодобовий приріст – 2,03 см/добу. Найнижчі показники серед гібридів мав 'Pao Tong ZO7', однак і він позитивно реагував на поліпшення фітосанітарного стану насаджень: за комбінованого гербіцидного захисту висота рослин досягала 3,46 м, а приріст – 1,97 см/добу (табл. 1).

Таблиця 1. Динаміка росту рослин павловнії другого року вегетації залежно від гібрида та системи захисту (2023–2025 рр.)

Гібрид	Система захисту	Висота рослин ... вегетації, м			Середньодобовий приріст, см/добу
		на початку	у середині	наприкінці	
'Clone In Vitro 112'	Контроль, без гербіцидів	0,42	1,18	1,76	1,05
	Без бур'янів	0,48	2,36	3,42	1,92
	Стомп 330, 5 л/га	0,46	2,18	3,24	1,82
	Стомп 330 + Тарга Супер	0,49	2,44	3,58	2,03
'Pao Tong ZO7'	Контроль, без гербіцидів	0,39	1,10	1,68	0,99
	Без бур'янів	0,45	2,20	3,28	1,85
	Стомп 330, 5 л/га	0,44	2,06	3,12	1,75
	Стомп 330 + Тарга Супер	0,46	2,31	3,46	1,97
'Shan Tong'	Контроль, без гербіцидів	0,43	1,25	1,84	1,10
	Без бур'янів	0,50	2,48	3,66	2,08
	Стомп 330, 5 л/га	0,48	2,32	3,48	1,97
	Стомп 330 + Тарга Супер	0,51	2,56	3,82	2,16
	НІР _{0,05}	0,05	0,18	0,22	0,14

Показники найменшої істотної різниці підтверджують істотність різниці між варіантами дослідів. Для висоти рослин на початку вегетації НІР_{0,05} становила 0,05 м, у середині вегетації – 0,18 м, наприкінці вегетації – 0,22 м, а для середньодобового приросту – 0,14 см/добу. Отже, відмінності між контролем без гербіцидів і варіантами із застосуванням систем захисту були статистично значущими.

Формування асиміляційної поверхні є одним із ключових показників фізіологічного стану рослин павловнії, оскільки саме листковий апарат забезпечує інтенсивність фотосинтезу, накопичення органічної речовини та подальше формування біомаси. Дані таблиці 2 свідчать, що застосування заходів захисту від впливу низьких температур позитивно впливало на кількість листків, середню площу одного листка, загальну площу листової поверхні, індекс листової поверхні та вміст хлорофілу в листках усіх досліджуваних гібридів павловнії.

У контрольному варіанті без обробки показники розвитку листового апарату були найнижчими. У гібрида 'Clone In Vitro 112' кількість листків становила 38 шт./рослину, середня площа одного листка – 520 см², площа листової поверхні однієї рослини – 1,98 м², індекс листової поверхні – 1,24 м²/м², а вміст хлорофілу – 34,6 SPAD-од. У 'Pao Tong ZO7' ці показники були дещо нижчими: кількість листків становила 35 шт./рослину, площа одного листка – 495 см², площа листової поверхні – 1,73 м², індекс листової поверхні – 1,08 м²/м², вміст хлорофілу – 33,8 SPAD-од. Найвищі показники серед контрольних варіантів мав 'Shan Tong', у якого кількість листків становила 40 шт./рослину, площа одного листка – 545 см², площа листової поверхні – 2,18 м², індекс листової поверхні – 1,36 м²/м², а вміст хлорофілу – 35,2 SPAD-од.

Осіння обробка препаратом ХАРВЕСТ у нормі 5 л/га забезпечувала помітне поліпшення розвитку асиміляційної поверхні. У гібрида 'Clone In Vitro 112' кількість листків зросла з 38 до 46 шт./рослину, середня площа одного листка – з 520 до 610 см², а площа листової поверхні – з 1,98 до 2,81 м². Вміст хлорофілу підвищився до 38,9 SPAD-од. У гібрида 'Pao Tong ZO7' осіння обробка сприяла збільшенню кількості листків до 43 шт./рослину, площі листової поверхні – до 2,52 м², а вмісту хлорофілу – до 37,6 SPAD-од. У гібрида 'Shan Tong' ці показники були ще вищими: кількість листків становила 49 шт./рослину, площа листової поверхні – 3,11 м², індекс листової поверхні – 2,16 м²/м², а вміст хлорофілу – 41,7 SPAD-од. У гібрида 'Pao Tong ZO7' відповідні показники становили 49 шт./рослину, 635 см², 3,11 м², 1,94 м²/м² і 40,4 SPAD-од. У 'Shan Tong' за цієї схеми сформувалися ще вищі значення: 55 листків на рослину, середня площа одного листка – 690 см², загальна площа листової поверхні – 3,80 м², індекс листової поверхні – 2,38 м²/м², вміст хлорофілу – 42,8 SPAD-од. Це свідчить про те, що поєднання осінньої та весняної обробки сприяло активнішому відновленню рослин після зимового періоду та посиленню фотосинтетичної активності.

Найвищі показники формування асиміляційної поверхні отримано за комбінованого застосування ХАРВЕСТ восени 5 л/га + НОВОФЕРТ Ягода перед можливими заморозками. У гібрида 'Clone In Vitro 112' кількість листків становила 57 шт./рослину, середня площа одного листка – 705 см², площа листової поверхні – 4,02 м², індекс листової поверхні – 2,51 м²/м², вміст хлорофілу – 44,3 SPAD-од. У гібрида 'Pao Tong ZO7' цей варіант також забезпечував найкращі показники: 54 листки на рослину, площа одного листка – 680 см², площа листової поверхні – 3,67 м², індекс листової поверхні – 2,29 м²/м², вміст хлорофілу – 43,1 SPAD-од. Найбільш виражений ефект спостерігався у гібрида 'Shan Tong', де кількість листків досягала 61 шт./рослину, середня площа одного листка – 725 см², площа листової поверхні – 4,42 м², індекс листової поверхні – 2,76 м²/м², а вміст хлорофілу – 45,6 SPAD-од.

Порівняно з контролем без обробки, застосування найефективнішої схеми ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ Ягода забезпечувало істотне збільшення площі листової поверхні. У гібрида 'Clone In Vitro 112' вона зросла з 1,98 до 4,02 м², тобто на 2,04 м². У 'Pao Tong ZO7' приріст становив 1,94 м² (з 1,73 до 3,67 м²). У 'Shan Tong' площа листової поверхні збільшилася з 2,18 до 4,42 м², тобто на 2,24 м². Така динаміка свідчить про високу ефективність антистресового захисту для підтримання функціональної активності листового апарату павловнії.

Індекс листової поверхні також істотно зростав за застосування захисних заходів. У контрольному варіанті він становив 1,08–1,36 м²/м², тоді як за комбінованої схеми ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ Ягода підвищувався до 2,29–2,76 м²/м². Це вказує на збільшення фотосинтетично активної поверхні насаджень, що є важливою передумовою інтенсивного накопичення біомаси.

Вміст хлорофілу в листках також мав чітку тенденцію до зростання. Якщо в контролі без обробки він становив 33,8–35,2 SPAD-од., то за найефективнішого варіанта захисту підвищувався до 43,1–45,6 SPAD-од. Підвищення цього показника свідчить про кращий фізіологічний стан рослин, активніше функціонування фотосинтетичного апарату та вищу стійкість до стресових чинників.

Серед досліджуваних гібридів найкращі показники формування асиміляційної поверхні стабільно забезпечував 'Shan Tong'. Він перевищував інші гібриди за кількістю листків, середньою площею листка, загальною площею листової поверхні, індексом листової поверхні та вмістом хлорофілу. 'Clone In Vitro 112' займав проміжне положення, тоді як 'Pao Tong Zo7' мав дещо нижчі показники, хоча також позитивно реагував на застосування захисних заходів (табл. 2).

Таблиця 2. Формування асиміляційної поверхні павловнії залежно від захисту від низьких температур (2023–2025 рр.)

Захист від впливу низьких температур	Кількість листків на рослині, шт.	Середня площа одного листка, см ²	Площа листової поверхні однієї рослини, м ²	Індекс листової поверхні, м ² /м ²	Вміст хлорофілу, SPAD-од.
'Clone In Vitro 112'					
Контроль, без обробки	38	520	1,98	1,24	34,6
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га	46	610	2,81	1,76	38,9
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га + ХАРВЕСТ навесні, 1 л/га	52	665	3,46	2,16	41,7
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га + НОВОФЕРТ Ягода перед заморозками	57	705	4,02	2,51	44,3
'Pao Tong Zo7'					
Контроль, без обробки	35	495	1,73	1,08	33,8
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га	43	585	2,52	1,58	37,6
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га + ХАРВЕСТ навесні, 1 л/га	49	635	3,11	1,94	40,4
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га + НОВОФЕРТ Ягода перед заморозками	54	680	3,67	2,29	43,1
'Shan Tong'					
Контроль, без обробки	40	545	2,18	1,36	35,2
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га	49	635	3,11	1,94	39,7
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га + ХАРВЕСТ навесні, 1 л/га	55	690	3,80	2,38	42,8
ХАРВЕСТ восени, 5 л/га + НОВОФЕРТ Ягода перед заморозками	61	725	4,42	2,76	45,6
НІР _{0,05}	4	38	0,26	0,16	2,0

Урожайність біомаси павловнії другого року вегетації є інтегральним показником ефективності досліджуваних елементів технології, оскільки відображає вплив захисту від бур'янів і низьких температур на реалізацію продуктивного потенціалу рослин. Для оцінювання доцільності застосування цих прийомів було визначено вихід сирової та сухої біомаси, збір енергії з урожаю і коефіцієнт енергетичної ефективності.

Дані таблиці 3 свідчать, що врожайність біомаси та енергетична ефективність вирощування павловнії другого року вегетації істотно залежали від поєднання системи захисту від бур'янів і заходів захисту від низьких температур. Найнижчі показники продуктивності сформувалися у варіантах без гербіцидів і без антистресової обробки, де сира біомаса становила лише 10,5–12,6 т/га, суха біомаса – 3,55–4,35 т/га, а Кеє – 1,24–1,46.

Значне підвищення продуктивності відмічено у варіантах, де насадження утримували без бур'янів і застосовували осінню обробку ХАРВЕСТ. За таких умов сира біомаса зростала до 20,2–23,4 т/га, а збір енергії з біомасою – до 127,3–150,8 ГДж/га. Це свідчить про важливу роль усунення бур'янової конкуренції у формуванні продуктивності павловнії.

Таблиця 3. Урожайність біомаси та енергетична ефективність вирощування павловнії другого року вегетації (2023–2025 рр.)

Гібрид	Захист від бур'янів і низьких температур	Сира біомаса, т/га	Суша речовина, %	Суша біомаса, т/га	Збір енергії з біомасою, ГДж/га	Коефіцієнт енергетичної ефективності
'Clone In Vitro 112'	Без гербіцидів × без обробки	11,8	34,2	4,04	72,7	1,38
	Без бур'янів × ХАРВЕСТ осінь	21,6	35,4	7,65	137,7	2,31
	Стомп 330 × ХАРВЕСТ осінь + весна	24,8	36,1	8,95	161,1	2,58
	Стомп 330 + Тарга × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ	27,4	36,8	10,08	181,4	2,84
	Без гербіцидів × без обробки	10,5	33,8	3,55	63,9	1,24
'Pao Tong Zo7'	Без бур'янів × ХАРВЕСТ осінь	20,2	35,0	7,07	127,3	2,18
	Стомп 330 × ХАРВЕСТ осінь + весна	23,1	35,7	8,25	148,5	2,44
	Стомп 330 + Тарга × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ	25,6	36,5	9,34	168,1	2,69
	Без гербіцидів × без обробки	12,6	34,5	4,35	78,3	1,46
	Без бур'янів × ХАРВЕСТ осінь	23,4	35,8	8,38	150,8	2,47
'Shan Tong'	Стомп 330 × ХАРВЕСТ осінь + весна	26,2	36,4	9,54	171,7	2,72
	Стомп 330 + Тарга × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ	29,1	37,2	10,83	194,9	3,02
	НІР _{0,05}	1,8	1,1	0,74	13,4	0,18

Застосування системи Стомп 330 × ХАРВЕСТ осінь + весна забезпечувало подальше підвищення продуктивності: суха біомаса становила 8,25–9,54 т/га, а коефіцієнт енергетичної ефективності – 2,44–2,72. Найвищі результати отримано за комплексної системи Стомп 330 + Тарга Супер × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ, де сира біомаса досягала 25,6–29,1 т/га, суха біомаса – 9,34–10,83 т/га, а збір енергії – 168,1–194,9 ГДж/га.

Серед досліджуваних гібридів найпродуктивнішим був 'Shan Tong', який у найкращому варіанті сформував 29,1 т/га сирової біомаси, 10,83 т/га сухої біомаси та забезпечив найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності – 3,02. Гібрид 'Clone In Vitro 112' займав проміжне положення, тоді як 'Pao Tong Zo7' дещо поступався за продуктивністю, хоча також позитивно реагував на інтенсифікацію захисту.

Висновки

У другий рік вегетації павловнія інтенсивно реагувала на умови вирощування, а найбільший вплив на ріст, формування листкової поверхні та накопичення біомаси мали системи захисту від бур'янів і низьких температур.

У варіантах без гербіцидного захисту рослини формували найнижчі показники висоти, середньодобового приросту, площі листкової поверхні та врожайності біомаси, що свідчить про сильне пригнічення культури бур'яновою конкуренцією. Застосування системи Стомп 330, 5 л/га, а особливо комбінації Стомп 330 + Тарга Супер, забезпечувало активніше наростання рослин, вищу кінцеву висоту та кращу реалізацію ростового потенціалу павловнії. Заходи захисту від низьких температур позитивно впливали на формування асиміляційного апарату: збільшували кількість листків, середню площу листка, індекс листкової поверхні та вміст хлорофілу в листках.

Найефективнішою схемою антистресового захисту було поєднання ХАРВЕСТ восени + НОВОФЕРТ Ягода перед можливими заморозками, яке забезпечувало найкращий фізіологічний стан рослин і найвищу фотосинтетичну активність. Найвищу урожайність сирової та сухої біо-

маси, а також найбільший збір енергії з урожаєм забезпечувала комплексна система Стомп 330 + Тарга Супер × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ. Серед досліджуваних гібридів найбільш продуктивним був 'Shan Tong', який стабільно формував найвищі показники росту, листкової поверхні, біомаси та енергетичної ефективності. Гібриди 'Clone In Vitro 112' і 'Pao Tong Z07' також позитивно реагували на застосування технологічних прийомів, однак дещо поступалися за продуктивністю.

Загалом результати підтверджують, що для умов Правобережного Лісостепу України найбільш доцільним є комплексне поєднання ефективного контролювання бур'янів із заходами захисту рослин від низькотемпературного стресу.

Список використаних джерел

- García-Morote, F., López-Serrano, F., Martínez-García, E., Andrés-Abellán, M., Dadi, T., Candel, D., Rubio, E., & Lucas-Borja, M. (2014). Stem biomass production of *Paulownia elongata* × *P. fortunei* under low irrigation in a semi-arid environment. *Forests*, 5(10), 2505–2520. <https://doi.org/10.3390/f5102505>
- Jakubowski, M. (2022). Cultivation potential and uses of paulownia wood: A review. *Forests*, 13(5), Article 668. <https://doi.org/10.3390/f13050668>
- Kadlec, J., Novosadová, K., & Pokorný, R. (2021). Preliminary results from a plantation of semi-arid hybrid of *Paulownia* 'Clone In Vitro 112'® under conditions of the Czech Republic from the first two years. *Baltic Forestry*, 27(1), Article 477. <https://doi.org/10.46490/BF477>
- Kadlec, J., Novosadová, K., & Pokorný, R. (2022). Impact of different pruning practices on height growth of *Paulownia* Clon in Vitro 112®. *Forests*, 13(2), Article 317. <https://doi.org/10.3390/f13020317>
- Kadlec, J., Novosadová, K., Kománek, M., & Pokorný, R. (2023). Testing the production potential of *Paulownia* Clon In Vitro 112® in the Czech Republic. *Forests*, 14(8), Article 1526. <https://doi.org/10.3390/f14081526>
- Katiyar, N., Ramadoss, N., Gupta, D., Pakala, S. B., Cooper, K., & Basu, C. (2021). Transcriptomic profiling of *Paulownia elongata* in response to heat stress. *Plant Gene*, 28, Article 100330. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2021.100330>
- Testa, R., Schifani, G., Rizzo, G., & Migliore, G. (2022). Assessing the economic profitability of Paulownia as a biomass crop in Southern Mediterranean area. *Journal of Cleaner Production*, 336, Article 130426. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130426>
- Moreno, J. L., Bastida, F., Ondoño, S., García, C., Andrés-Abellán, M., & López-Serrano, F. R. (2017). Agroforestry management of *Paulownia* plantations and their impact on soil biological quality: The effects of fertilization and irrigation treatments. *Applied Soil Ecology*, 117–118, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.05.001>
- Lucas-Borja, M. E., Wic-Baena, C., Moreno, J. L., Dadi, T., García, C., & Andrés-Abellán, M. (2011). Microbial activity in soils under fast-growing *Paulownia* (*Paulownia elongata* × *fortunei*) plantations in Mediterranean areas. *Applied Soil Ecology*, 51, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.08.011>
- Njakou Djomo, S., Ac, A., Zenone, T., De Groote, T., Bergante, S., Facciotto, G., Sixto, H., Ciria Ciria, P., Weger, J., & Ceulemans, R. (2015). Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 845–854. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.058>
- Rodrigues, A. M., Costa, M. M. G., & Nunes, L. J. R. (2021). Short rotation woody coppices for biomass production: An integrated analysis of the potential as an energy alternative. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 8, 70–89. <https://doi.org/10.1007/s40518-020-00171-3>
- Griffiths, N. A., Rau, B. M., Vaché, K. B., Starr, G., Bitew, M. M., Aubrey, D. P., Martin, J. A., Benton, E., & Jackson, C. R. (2019). Environmental effects of short-rotation woody crops for bioenergy: What is and isn't known. *GCB Bioenergy*, 11(4), 554–572. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12536>
- Liu, C., Liu, Y., Lu, Y., Liao, Y., Nie, J., Yuan, X., & Chen, F. (2019). Use of a leaf chlorophyll content index to improve the prediction of above-ground biomass and productivity. *PeerJ*, 6, Article e6240. <https://doi.org/10.7717/peerj.6240>
- Shulner, I., Lati, R. N., Eizenberg, H., Asaf, E., Saadi, I., Laor, Y., Bar-Tal, A., & Kissinger, M. (2025). Implementing a life cycle assessment (LCA) to evaluate organic farming weed control and fertilizers environmental implications. *Science of The Total Environment*, 995, Article 180114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180114>
- Makukh, Ya. P., Remeniuk, S. O., Riznyk, V. M., & Moshkivska, S. V. (2022). The influence of weeds on the growth and development of paulownia. *Bioenergy*, 1–2, 45–47. <https://doi.org/10.47414/be.1-2.2022.271358> [In Ukrainian]

16. Remeniuk, S. O., & Makukh, D. Ya. (2025). Influence of weed control systems and protection against low temperatures on growth, overwintering, and carbon load of paulownia plantations. *Bioenergy*, 2, 67–73. <https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp67-73> [In Ukrainian]

17. Prysiazhniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2> [In Ukrainian]

18. Roik, M. V., & Hizbullin, N. H. (Eds.). (2014). *Methods of research in sugar beet growing*. FOP Korzun D. Yu. [In Ukrainian]

19. Trybel, S. O. (Ed.). (2001). *Methods of testing and applying pesticides* (pp. 174–175). Svit. [In Ukrainian]

Optimisation of cultivation technology elements for paulownia in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine

D. Ya. Makukh

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine

Corresponding author: Denys Makukh, herbolohiya@ukr.net

Citation: Makukh, D. Ya. (2026). Optimisation of cultivation technology elements for paulownia in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. *Bioenergy*, 1, 92–100. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp92-100>

Aim. To substantiate effective elements of cultivation technology for second-year paulownia by evaluating the influence of weed control systems and low-temperature stress protection on plant growth, leaf area formation, biomass productivity, and energy efficiency. **Methods.** The study was conducted in 2023–2025 at Grow Energy LLC (Kyiv region). The experimental design included three factors: paulownia hybrids ('Clone In Vitro 112', 'Pao Tong ZO7', and 'Shan Tong'); weed control system (control; Stomp 330 EC, 5 l/ha; Stomp 330 EC, 5 l/ha + Targa Super EC, 2.0 l/ha); and low-temperature protection measures (control; autumn application of HARVEST, 5 l/ha after >40% leaf fall; autumn HARVEST, 5 l/ha + spring HARVEST, 1 l/ha after snowmelt at +5°C; autumn HARVEST, 5 l/ha + foliar feeding with NOVOFERT Berry 5–6 days before possible frosts at 10 g/plant or 6.5 l/ha). Measurements included plant growth dynamics, leaf apparatus parameters, chlorophyll content, yield of fresh and dry biomass, energy accumulation, and energy efficiency coefficient. **Results.** The studied factors had a significant effect on paulownia growth and productivity. In treatments without herbicide protection, plant height at the end of vegetation was only 1.68–1.84 m, with an average daily increment of 0.99–1.10 cm/day. Application of Stomp 330 + Targa Super increased final plant height to 3.46–3.82 m and average daily increment to 1.97–2.16 cm/day. The most effective anti-stress protection scheme was autumn HARVEST + NOVOFERT Berry before frosts. It increased leaf number to 54–61 per plant, leaf area to 3.67–4.42 m², and chlorophyll content to 43.1–45.6 SPAD units. The highest biomass yield was obtained with the combined application of Stomp 330 + Targa Super × HARVEST + NOVOFERT: fresh biomass 25.6–29.1 t/ha, dry biomass 9.34–10.83 t/ha, energy accumulation 168.1–194.9 GJ/ha, and energy efficiency 2.69–3.02. The hybrid 'Shan Tong' demonstrated the highest growth, photosynthetic activity, and productivity. **Conclusions.** In the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine, the efficiency of second-year paulownia cultivation is determined by the integrated combination of weed control and protection against low-temperature stress. The most effective system was Stomp 330 + Targa Super combined with autumn HARVEST and foliar feeding with NOVOFERT Berry. Among the studied hybrids, 'Shan Tong' proved to be the most adaptive and productive.

Keywords: paulownia; biomass; leaf area photosynthetic activity; herbicides; low-temperature stress; energy efficiency.

ORCID

Денис Макух / Denys Makukh

<https://orcid.org/0000-0001-9085-4496>

УДК 633.15:632.51:632.954:631.811.98

Особливості функціонування фотосинтетичного апарату гібридів кукурудзи залежно від гербіцидного захисту та позакореневого удобрення

Д. М. Козаченко 

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

Автор для листування: Дмитро Козаченко, herbolohiya@ukr.net

Цитування: Козаченко Д. М. Особливості функціонування фотосинтетичного апарату гібридів кукурудзи залежно від гербіцидного захисту та позакореневого удобрення. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 101–108. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp101-108>

Мета. Установити особливості формування та функціонування фотосинтетичного апарату середньоранніх гібридів кукурудзи залежно від системи гербіцидного захисту та позакореневого удобрення, а також оцінити їх вплив на продукційні процеси й формування врожайності зерна в умовах Правобережного Лісостепу України. **Методи.** Польові дослідження проводили у 2023–2025 рр. у ТОВ «Світанок Плюс» (Київська обл.) на сірих лісових опідзолених середньосуглинкових ґрунтах. Схема досліду включала три гібриди кукурудзи ('ДБ Хотин', 'ДМ Стікер', 'KWS Рабат'), чотири варіанти гербіцидного захисту (контроль без гербіцидів; контроль без бур'янів; Лаудіс + Меро; Стеллар Плюс) та три варіанти позакореневого удобрення (без удобрення; Райкат Фінал; Текамін Брікс + EGROW). Визначали площу листової поверхні, фотосинтетичний потенціал, чисту продуктивність фотосинтезу та врожайність зерна. **Результати.** Установлено істотний вплив гербіцидного захисту та позакореневого удобрення на формування фотосинтетичного апарату кукурудзи. Найнижчі показники площі листової поверхні формувалися на контролі без гербіцидів – 10,5–18,4 тис. м²/га, що супроводжувалося зниженням фотосинтетичного потенціалу до 0,57–1,03 млн м²×дб/га та чистої продуктивності фотосинтезу до 6,62–8,55 г/м² за добу. Ефективне пригнічення бур'янів у варіантах із застосуванням гербіцидів Лаудіс + Меро та Стеллар Плюс забезпечувало істотне збільшення площі листової поверхні до 45,6–52,2 тис. м²/га та підвищення фотосинтетичної активності рослин. Найвищі значення показників отримано у варіанті без бур'янів, де площа листової поверхні досягала 48,0–54,0 тис. м²/га, фотосинтетичний потенціал – 2,50–3,08 млн м²×дб/га, а чиста продуктивність фотосинтезу – 17,15–18,24 г/м² за добу. Позакореневе удобрення позитивно впливало на функціонування листового апарату, причому найефективнішою була комбінація Текамін Брікс + EGROW. Найвищу врожайність зерна серед варіантів із гербіцидним захистом сформував гібрид 'ДМ Стікер' за застосування Стеллар Плюс + Текамін Брікс + EGROW – 10,91 т/га. **Висновки.** Формування та функціонування фотосинтетичного апарату кукурудзи значною мірою залежали від рівня гербіцидного захисту, позакореневого удобрення та біологічних особливостей гібридів. Застосування гербіцидів істотно підвищувало фотосинтетичну активність рослин і продуктивність посівів порівняно з варіантами без контролювання бур'янів. Найефективнішою технологічною моделлю виявилось поєднання гібрида 'ДМ Стікер', гербіциду Стеллар Плюс і позакореневого удобрення Текамін Брікс + EGROW, що забезпечувало найкращі показники фотосинтетичного потенціалу та реалізацію продуктивного потенціалу кукурудзи.

Ключові слова: кукурудза; гібриди; фотосинтетичний апарат; площа листової поверхні; фотосинтетичний потенціал; чиста продуктивність фотосинтезу; гербіцидний захист; позакореневе удобрення; урожайність зерна.

Одержано 23.02.2026 • Погоджено 03.04.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026



© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.

Вступ

Кукурудза є однією з провідних зернових культур світу з високим потенціалом продуктивності, реалізація якого значною мірою залежить від формування потужного та функціонально активного фотосинтетичного апарату. Площа листової поверхні, фотосинтетичний потенціал і чиста продуктивність фотосинтезу визначають інтенсивність накопичення органічної речовини та безпосередньо впливають на формування врожайності зерна. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що оптимізація густоти рослин, просторової структури посіву та підтримання функціональної активності листового апарату сприяють ефективнішому використанню світлової енергії, підвищують інтенсивність фотосинтетичних процесів і сповільнюють старіння листків кукурудзи.

Одним із головних чинників, що обмежують фотосинтетичну діяльність рослин кукурудзи, є забур'яненість посівів. Бур'яни конкурують із культурою за світло, вологу та елементи живлення, унаслідок чого зменшуються площа листової поверхні, висота рослин, накопичення сухої речовини та рівень урожайності. Evans et al. [1] встановили, що тривалість конкурентного впливу бур'янів істотно впливає на ріст і розвиток кукурудзи, а негативний ефект особливо посилюється за недостатнього азотного живлення. За таких умов пригнічення ростових процесів супроводжується зниженням ефективності фотосинтезу та погіршенням реалізації продуктивного потенціалу культури.

Важливим елементом сучасних технологій вирощування кукурудзи є застосування післясходових гербіцидів, які забезпечують ефективне зниження бур'янової конкуренції та створюють сприятливі умови для формування фотосинтетичного апарату культури. Ефективність гербіцидного захисту залежить від діючої речовини, спектра бур'янів, фази розвитку культури та погодних умов у період внесення.

Dayan [2] зазначає, що сучасні гербіциди повинні поєднувати високу ефективність проти широкого спектра бур'янів із достатньою селективністю щодо культурних рослин. Особливе значення для захисту посівів кукурудзи мають гербіциди групи інгібіторів HPPD, зокрема темботріон і топразамезон. Їхній механізм дії пов'язаний із порушенням синтезу каротиноїдів у чутливих бур'янів, що спричиняє знебарвлення тканин і припинення росту.

Водночас селективність цих препаратів щодо кукурудзи значною мірою визначається генетичними особливостями гібрида та здатністю рослин швидко детоксикувати діючу речовину. Williams і Pataky [3] встановили, що реакція рослин кукурудзи на темботріон може істотно відрізнятися залежно від генотипу. Дослідження Damalas et al. [4] також підтвердили, що застосування темботріону в бакових сумішах забезпечує ефективний контроль бур'янів за належної селективності до культури. Зменшення рівня забур'яненості сприяє поліпшенню світлового режиму агроценозу, підвищенню доступності ресурсів та підтриманню функціональної активності листового апарату.

Поряд із гербіцидним захистом важливу роль у підтриманні фізіологічного стану рослин кукурудзи відіграє позакореневе удобрення. За даними Brankov et al. [5], реакція кукурудзи на позакореневе внесення добрив залежить від генотипу, а застосування таких препаратів сприяє поліпшенню біометричних показників, елементів структури врожаю та загального фізіологічного стану рослин. Поєднання гербіцидів із позакореневими добривами розглядається як перспективний елемент інтегрованих технологій вирощування, оскільки дає змогу не лише ефективно контролювати бур'яни, а й підтримувати фізіологічну активність культурних рослин. Brankov et al. [6] у дослідженнях інтегрованого застосування гербіцидів і позакореневого удобрення встановили, що позакореневе підживлення може підвищувати толерантність кукурудзи до гербіцидного навантаження.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють використанню біостимуляторів і ріст-регулюючих препаратів як засобів підвищення адаптивності рослин до стресових чинників. Sobiech et al. [7] повідомляють, що післясходове застосування біостимуляторів і ґрунтових поліпшувачів позитивно впливало на ріст, фізіологічні показники та врожайність кукурудзи. Це свідчить про доцільність поєднання гербіцидного захисту з препаратами, здатними підтримувати метаболічну активність рослин і зменшувати негативний вплив стресових факторів.

Отже, аналіз літературних джерел свідчить, що формування фотосинтетичного апарату кукурудзи є результатом комплексної взаємодії генотипу, рівня забур'яненості, ефективності

гербіцидного захисту та системи позакореневого живлення. Найбільш перспективним напрямом підвищення продуктивності культури є поєднання селективного гербіцидного захисту з позакореновими препаратами, які підтримують фізіологічну активність рослин, сприяють збереженню площі листової поверхні та забезпечують ефективнішу реалізацію продуктивного потенціалу кукурудзи.

Мета дослідження – установити особливості формування та функціонування фотосинтетичного апарату середньоранніх гібридів кукурудзи залежно від системи гербіцидного захисту та позакореневого удобрення, а також оцінити їх вплив на продукційні процеси й формування врожайності зерна в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження виконували впродовж 2023–2025 рр. у ТОВ «Світанок Плюс» (с. Григорівка, Обухівський р-н, Київська обл.). За режимом і кількістю опадів територія господарства належить до зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу. Незважаючи на певні відхилення фактичних погодних умов від середньобагаторічних норм, вони загалом забезпечували сприятливі умови для росту й розвитку кукурудзи.

Ґрунти дослідної ділянки належать до сірих лісових опідзолених, середньосуглинкових на лесовій породі. Вміст гумусу в орному шарі становив 1,6–1,9% (за Тюрнімом), рН сольової витяжки – 5,1–6,0. Гідролітична кислотність перебувала в межах 200–250 мг-екв/кг ґрунту, сума ввібраних основ – 120–160 мг-екв/кг ґрунту. В одному кілограмі ґрунту містилося 100–120 мг легкогідролізованого азоту, 100–140 мг обмінного калію та 100–150 мг рухомого фосфору.

Дослідження проводили за схемою:

Фактор А – гібриди кукурудзи: 'ДБ Хотин', 'ДМ Стікер', 'КВС РАБАТО'.

Фактор Б – гербіциди:

1. Контроль – без гербіцидів;
2. Контроль 2 – посіви без присутності бур'янів;
3. Лаудіс, в. г. [ізоксадіфен (антидот), 100 г/кг + темботріон, 200 г/кг], 0,4–0,5 кг/га + Мєро (прилипач), 1,0–2,0 л/га]. Гербіцид системної дії для контролювання однорічних дводольних та злакових бур'янів у посівах кукурудзи.
4. Стеллар Плюс (топрамезон, 50 г/л + дикамба, 160 г/л), 1,25 л/га. Гербіцид системної дії для контролювання одно- та багаторічних злакових і дводольних бур'янів.

Фактор С. Позакореневе удобрення у фазі ВВСН 85 (воскова стиглість)

1. без удобрення;
2. Райкат Фінал Atlantica Agricola, 1,0 л/га;
3. Текамін Брікс, 3 л/га + EGROW, 1,0 л/га.

Облікова площа ділянки становила 50 м², повторність – чотириразова, розміщення ділянок – рендомізоване.

Сівбу виконували сівалкою прямого висіву Massey Ferguson MF 555, агрегатованою з трактором Challenger 8122. Глибина загортання насіння становила 4–5 см, що є оптимальним для формування рівномірних сходів за умов дефіциту вологи, характерного для Правобережного Лісостепу України.

Оптимальна густина сівби – 75–80 тис. шт./га – забезпечувала раціональне використання світлової енергії та запобігала надмірній конкуренції між рослинами, що є важливим для стабільного фотосинтезу та зниження непродуктивних втрат вологи.

Система удобрення складалася з двох етапів. Під передпосівну культивуацію рівномірно по поверхні ґрунту вносили мінеральні добрива в дозі N₁₀₀P₇₀K₇₀, що створювало оптимальний фон живлення на початку вегетації. Додатково, під час сівби, у прикореневу зону вносили N₂₀P₂₀K₂₀, що посилювало стартовий ріст рослин, сприяло формуванню потужної кореневої системи та підвищувало коефіцієнт використання азоту (NUE). Такий підхід дозволяв мінімізувати ризики ранньої конкуренції бур'янів за доступні форми N, а отже – зменшував потенційну емісію N₂O.

До моменту внесення гербіцидів проводили обстеження поля для визначення густоти сходів та первинної сегетальної рослинності. Гербіциди вносили у фазі 2–6 листків культури (ВВСН 12–16) за швидкості вітру до 3–4 м/с у ранкові години. Для забезпечення чистоти

«контролю 2» (посіви без бур'янів) проводили регулярне ручне прополовання через кожні 5–7 днів протягом усього періоду вегетації, що гарантувало повну відсутність сегетальних видів.

Облік забур'яненості здійснювали у фазі ВВСН 12–17 перед внесенням гербіцидів та повторно – через 21–28 днів після обробки. На кожній ділянці закладали чотири облікові рамки площею 0,25 м², у межах яких визначали загальну кількість бур'янів, видовий склад, співвідношення однорічних і багаторічних форм. Ефективність дії препаратів визначали за зменшенням чисельності бур'янів у порівнянні з контролем.

Оцінювання морфологічних показників рослин кукурудзи проводили у фазах ВВСН 75–85 (налив – повна стиглість). На кожній ділянці вимірювали висоту прикріплення качана (за 20 рослинами), довжину качана, кількість рядів зерен (за 15–20 качанами), визначали масу 1000 зерен методом подвійного зважування наважок по 100 зерен. Урожайність встановлювали на основі суцільного обмолоту ділянки із приведенням вологості зерна до 14%. Експериментальні дослідження проводили згідно з методиками [10–12].

Результати дослідження

Площа листової поверхні є одним із ключових показників формування фотосинтетичного апарату кукурудзи, оскільки саме листки забезпечують накопичення органічної речовини та реалізацію продуктивного потенціалу рослин. Її величина залежить від біологічних особливостей гібрида, рівня конкуренції з боку бур'янів, ефективності гербіцидного захисту та застосування позакореневого удобрення. Тому оцінювання цього показника дає змогу встановити, як досліджувані елементи технології впливають на формування асиміляційної поверхні культури.

За результатами досліджень встановлено, що площа листової поверхні гібридів кукурудзи істотно залежала від системи гербіцидного захисту, позакореневого удобрення та біологічних особливостей гібрида. Найменші показники площі листової поверхні сформувалися у варіанті контроль без гербіцидів, де рослини кукурудзи розвивалися за умов природної забур'яненості. У цьому варіанті площа листової поверхні становила від 10,5 до 18,4 тис. м²/га залежно від гібрида та варіанту позакореневого удобрення. Найбільш пригніченим за формуванням асиміляційної поверхні був гібрид 'KWS Рабато', у якого на контролі без гербіцидів показник становив лише 10,5–11,7 тис. м²/га. Це свідчить про істотний негативний вплив бур'янів на ріст і розвиток листового апарату кукурудзи (табл. 1).

Таблиця 1. Площа листової поверхні гібридів кукурудзи залежно від гербіцидного захисту та позакореневого удобрення, тис. м²/га (середнє за 2023–2025 рр.)

Гібрид	Гербіцидний захист	Без удобрення	Райкат Фінал, 1,0 л/га	Текамін Брікс, 3,0 л/га + EGROW, 1,0 л/га
'ДБ Хотин'	Контроль без гербіцидів	14,8	15,4	15,9
	Контроль без бур'янів	48,0	49,1	49,8
	Лаудіс + Мєро	45,6	46,7	47,4
	Стеллар Плюс	46,3	47,5	48,1
'ДМ Стікер'	Контроль без гербіцидів	17,2	17,9	18,4
	Контроль без бур'янів	52,0	53,2	54,0
	Лаудіс + Мєро	49,4	50,5	51,3
	Стеллар Плюс	50,1	51,4	52,2
'KWS Рабато'	Контроль без гербіцидів	10,5	11,1	11,7
	Контроль без бур'янів	50,0	51,1	51,8
	Лаудіс + Мєро	47,2	48,3	49,0
	Стеллар Плюс	48,0	49,2	49,8

НІР_{0,05} А 0,8; В 1,2; С 0,6; АВ 1,7, АС 1,2, ВС 1,5; АВС 2,1

Найвищі показники площі листової поверхні одержано у варіанті контроль без бур'янів, де рослини не зазнавали конкурентного впливу сегетальної рослинності. У цьому варіанті площа листової поверхні становила 48,0–54,0 тис. м²/га. Найбільшу асиміляційну поверхню

сформував гібрид 'ДМ Стікер' – 52,0 тис. м²/га без позакореневого удобрення, 53,2 тис. м²/га за внесення Райкат Фінал і 54,0 тис. м²/га за застосування Текамін Брікс + EGROW.

Застосування гербіцидів Лаудіс + Метро та Стеллар Плюс сприяло істотному збільшенню площі листової поверхні порівняно з контролем без гербіцидів. У варіантах із Лаудіс + Метро цей показник становив 45,6–51,3 тис. м²/га, Стеллар Плюс – 46,3–52,2 тис. м²/га. Це свідчить про те, що ефективно пригнічення бур'янів поліпшувало умови освітлення, живлення і вологозабезпечення рослин кукурудзи, що позитивно впливало на формування листового апарату.

Позакореневе удобрення також мало позитивний вплив на площу листової поверхні. Застосування Райкат Фінал забезпечувало приріст показника порівняно з варіантом без удобрення, а найвищі значення формувалися за внесення Текамін Брікс + EGROW. У середньому по варіантах цей препаратний комплекс сприяв кращому збереженню функціональної активності листків і формуванню більшої асиміляційної поверхні.

Серед досліджуваних гібридів найвищою здатністю до формування листової поверхні характеризувався 'ДМ Стікер', який у більшості варіантів перевищував 'ДБ Хотин' і 'KWS Рабато'. Це свідчить про вищу фізіологічну активність цього гібрида та кращу реалізацію його адаптивного потенціалу за оптимізованих умов гербіцидного захисту і позакореневого удобрення.

Фотосинтетичний потенціал і чиста продуктивність фотосинтезу є важливими показниками, що характеризують не лише розміри листового апарату, а й ефективність його роботи впродовж вегетації. Вони відображають здатність рослин кукурудзи накопичувати органічну речовину, використовувати сонячну енергію та формувати урожай за різних умов гербіцидного захисту і позакореневого удобрення.

За даними таблиці 2 встановлено, що найнижчі значення фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу формувалися у варіанті контроль без гербіцидів. У цьому варіанті фотосинтетичний потенціал становив лише 0,57–1,03 млн м²×діб/га, а чиста продуктивність фотосинтезу – 6,62–8,55 г/м² за добу. Це свідчить про істотне пригнічення фотосинтетичної діяльності кукурудзи внаслідок конкуренції бур'янів за світло, вологу та елементи живлення.

Таблиця 2. Фотосинтетичний потенціал і чиста продуктивність фотосинтезу гібридів кукурудзи залежно від гербіцидного захисту та позакореневого удобрення (середнє за 2023–2025 рр.)

Гібрид	Гербіцидний захист	Без	Райкат Фінал,	Текамін Брікс, 3,0 л/га
		удобрення	1,0 л/га	+ EGROW, 1,0 л/га
		ФП / ЧПФ		
'ДБ Хотин'	Контроль без гербіцидів	0,77 / 7,45	0,81 / 7,68	0,84 / 7,82
	Контроль без бур'янів	2,50 / 17,15	2,58 / 17,42	2,63 / 17,61
	Лаудіс + Метро	2,37 / 16,58	2,45 / 16,84	2,50 / 17,02
	Стеллар Плюс	2,41 / 16,73	2,49 / 16,98	2,54 / 17,18
'ДМ Стікер'	Контроль без гербіцидів	0,96 / 8,15	1,00 / 8,38	1,03 / 8,55
	Контроль без бур'янів	2,91 / 17,78	3,00 / 18,05	3,08 / 18,24
	Лаудіс + Метро	2,77 / 17,18	2,86 / 17,46	2,93 / 17,66
	Стеллар Плюс	2,81 / 17,35	2,91 / 17,64	2,99 / 17,85
'KWS Рабато'	Контроль без гербіцидів	0,57 / 6,62	0,61 / 6,84	0,64 / 7,05
	Контроль без бур'янів	2,70 / 17,51	2,78 / 17,76	2,84 / 17,95
	Лаудіс + Метро	2,55 / 16,92	2,62 / 17,18	2,68 / 17,37
	Стеллар Плюс	2,59 / 17,08	2,67 / 17,34	2,73 / 17,56
		НІР _{0,05} А 0,07 / 0,20; В 0,11 / 0,31; С 0,05 / 0,16; АВ 0,16 / 0,43; АС 0,12 / 0,34; ВС 0,14 / 0,40; АВС 0,21 / 0,56		

Примітка. ФП – фотосинтетичний потенціал, млн м²×діб/га; ЧПФ – чиста продуктивність фотосинтезу, г/м² за добу.

Найвищі показники отримано у варіанті контроль без бур'янів, де фотосинтетичний потенціал досягав 2,50–3,08 млн м²×діб/га, а чиста продуктивність фотосинтезу – 17,15–18,24 г/м² за добу. Це характеризує потенційні можливості гібридів кукурудзи за відсутності конкурентного впливу сегетальної рослинності.

Застосування гербіцидів Лаудіс + Мєро та Стеллар Плюс сприяло істотному підвищенню фотосинтетичної активності рослин порівняно з контролем без гербіцидів. Деццо вищі показники формувалися за внесення Стеллар Плюс, особливо у поєднанні з позакореневим удобренням Текамін Брікс + EGROW. Серед гібридів найвищими показниками фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу характеризувався 'ДМ Стікер'. У варіанті Стеллар Плюс + Текамін Брікс + EGROW він сформував 2,99 млн м²×дб/га фотосинтетичного потенціалу та 17,85 г/м² за добу чистої продуктивності фотосинтезу. Це свідчить про кращу функціональну активність його листкового апарату та вищу здатність до реалізації продуктивного потенціалу.

Урожайність зерна є інтегральним показником ефективності досліджуваних елементів технології вирощування кукурудзи, оскільки відображає сумарний вплив гібрида, рівня забур'яненості, гербіцидного захисту та позакореневого удобрення. Дані таблиці з дають змогу оцінити, наскільки формування фотосинтетичного апарату пов'язане з реалізацією продуктивного потенціалу гібридів кукурудзи.

За результатами досліджень встановлено, що найнижча урожайність зерна формувалася у варіанті контроль без гербіцидів. У цьому варіанті вона становила лише 0,15–1,03 т/га залежно від гібрида та позакореневого удобрення. Такий рівень продуктивності свідчить про сильне пригнічення рослин кукурудзи бур'янами, які істотно обмежували доступ культури до світла, води, елементів живлення та простору.

Найвищі показники врожайності отримано у варіанті контроль без бур'янів, де продуктивність гібридів становила 9,82–11,08 т/га. Цей варіант характеризує потенційну продуктивність кукурудзи за повного усунення конкурентного впливу сегетальної рослинності. Найвищу врожайність у цьому варіанті сформував гібрид 'ДМ Стікер' – 11,08 т/га за застосування Текамін Брікс + EGROW (табл. 3).

Таблиця 3. Урожайність зерна гібридів кукурудзи залежно від гербіцидного захисту та позакореневого удобрення, т/га (середнє за 2023–2025 рр.)

Гібрид	Гербіцидний захист	Без удобрення	Райкат Фінал, 1,0 л/га	Текамін Брікс, 3,0 л/га + EGROW, 1,0 л/га
'ДБ Хотин'	Контроль без гербіцидів	0,62	0,68	0,71
	Контроль без бур'янів	9,82	10,05	10,18
	Лаудіс + Мєро	8,94	9,18	9,31
	Стеллар Плюс	9,12	9,34	9,47
'ДМ Стікер'	Контроль без гербіцидів	0,92	0,98	1,03
	Контроль без бур'янів	10,74	10,96	11,08
	Лаудіс + Мєро	10,12	10,36	10,49
	Стеллар Плюс	10,47	10,73	10,91
'KWS Рабато'	Контроль без гербіцидів	0,15	0,20	0,24
	Контроль без бур'янів	10,32	10,51	10,69
	Лаудіс + Мєро	9,49	9,62	9,76
	Стеллар Плюс	10,18	10,41	10,62

НІР_{0,05} А 0,16; В 0,24; С 0,12; АВ 0,35; АС 0,27; ВС 0,31; АВС 0,46

Застосування гербіцидів Лаудіс + Мєро та Стеллар Плюс забезпечувало істотне підвищення врожайності порівняно з контролем без гербіцидів. У варіантах із Лаудіс + Мєро врожайність становила 8,94–10,49 т/га, а Стеллар Плюс – 9,12–10,91 т/га. Деццо вищі показники продуктивності формувалися за внесення Стеллар Плюс, що свідчить про його кращу ефективність у системі захисту посівів кукурудзи від бур'янів.

Позакореневе удобрення позитивно впливало на врожайність зерна. Застосування Райкат Фінал забезпечувало помірне підвищення продуктивності, тоді як найвищі показники формувалися за внесення Текамін Брікс + EGROW. Це свідчить про доцільність використання позакореневого удобрення у фазі ВВСН 85 для підтримання фізіологічної активності рослин і поліпшення наливу зерна.

Серед досліджуваних гібридів найвищою продуктивністю характеризувався 'ДМ Стікер'. У варіанті Стеллар Плюс + Текамін Брікс + EGROW його урожайність становила 10,91 т/га, що було найбільшим показником серед варіантів із застосуванням гербіцидного захисту.

Отже, найкраще поєднання технологічних елементів для формування врожайності зерна кукурудзи забезпечувало застосування Стеллар Плюс у поєднанні з Текамін Брікс + EGROW. Найвищу реалізацію продуктивного потенціалу за цих умов мав гібрид 'ДМ Стікер', що узгоджується з його вищими показниками площі листкової поверхні, фотосинтетичного потенціалу та чистої продуктивності фотосинтезу.

Висновки

Формування фотосинтетичного апарату кукурудзи істотно залежало від гібрида, гербіцидного захисту та позакореневого удобрення. Найменші показники площі листкової поверхні, фотосинтетичного потенціалу й чистої продуктивності фотосинтезу отримано на контролі без гербіцидів.

За відсутності гербіцидного захисту площа листкової поверхні становила лише 10,5–18,4 тис. м²/га, фотосинтетичний потенціал – 0,57–1,03 млн м²×дїб/га, що свідчить про сильне пригнічення рослин бур'янами. Застосування гербіцидів Лаудіс + Метро та Стеллар Плюс забезпечувало істотне поліпшення фотосинтетичної діяльності кукурудзи. Деякі вищі показники формувалися за внесення Стеллар Плюс. Позакореневе удобрення позитивно впливало на функціональний стан рослин. Найкращий ефект забезпечувала комбінація Текамін Брікс + EGROW. Найвищими показниками фотосинтетичної активності та урожайності характеризувався гібрид 'ДМ Стікер'. За поєднання Стеллар Плюс + Текамін Брікс + EGROW урожайність становила 10,91 т/га.

Найбільш ефективною технологічною моделлю було поєднання гібрида 'ДМ Стікер', гербіцидного захисту Стеллар Плюс і позакореневого удобрення Текамін Брікс + EGROW, що забезпечувало краще функціонування фотосинтетичного апарату та реалізацію продуктивного потенціалу кукурудзи.

Список використаної літератури

1. Evans, S. P., Knezevic, S. Z., Lindquist, J. L., & Shapiro, C. A. (2003). Influence of nitrogen and duration of weed interference on corn growth and development. *Weed Science*, 51(4), 546–556. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2003\)051\[0546:IONADO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2003)051[0546:IONADO]2.0.CO;2)
2. Dayan, F. E. (2019). Current status and future prospects in herbicide discovery. *Plants*, 8(9), Article 341. <https://doi.org/10.3390/plants8090341>
3. Williams, M. M., & Pataky, J. K. (2008). Genetic basis of sensitivity in sweet corn to tembotrione. *Weed Science*, 56(3), 364–370. <https://doi.org/10.1614/WS-07-149.1>
4. Chhokar, R., Gill, S., Sharma, R., & Singh, G. (2020). Tank-mix application of p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (HPPD) inhibiting herbicide (mesotrione, tembotrione or topramezone) with atrazine improves weed control in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Research in Weed Science*, 3(4), 556–581. <https://doi.org/10.26655/jrweedsci.2020.4.9>
5. Brankov, M., Simić, M., Dolijanović, Ž., Rajković, M., Mandić, V., & Dragičević, V. (2020). The response of maize lines to foliar fertilizing. *Agriculture*, 10(9), Article 365. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090365>
6. Brankov, M., Simić, M., Dolijanović, Ž., Rajković, M., Mandić, V., & Dragičević, V. (2020). Integrated effects of herbicides and foliar fertilizer on corn inbred line. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(1), 50–60. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000100050>
7. Sobiech, Ł., Grzanka, M., Idziak, R., & Blecharczyk, A. (2025). The effect of post-emergence application of biostimulants and soil amendments in maize cultivation on the growth and yield of plants. *Plants*, 14(9), Article 1274. <https://doi.org/10.3390/plants14091274>
8. Prysiazhniuk, O. I., Klymowych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Ya. V., Tretiakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Yu. M. (2021). *Methodology and organization of scientific research in agriculture and food technologies*. Nilan-LTD. <https://doi.org/10.47414/978-966-924-927-2>
9. Roik, M. V., & Hizbullin, N. H. (Eds.). (2014). *Methods of research in beet growing*. FOP Korzun D. Yu. [In Ukrainian]
10. Trybel, S. O. (Ed.). (2001). *Methods of testing and applying pesticides* (pp. 174–175). Svit. [In Ukrainian]

Functioning of the maize photosynthetic apparatus as affected by herbicide protection and foliar application of fertilisers

D. M. Kozachenko

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine

Corresponding author: Dmytro Kozachenko, herbolohiya@ukr.net

Citation: Kozachenko, D. M. (2026). Functioning of the maize photosynthetic apparatus as affected by herbicide protection and foliar application of fertilisers. *Bioenergy*, 1, 101–108. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp101-108>

Aim. To determine the characteristics of the formation and functioning of the photosynthetic apparatus of medium-early maize hybrids under different systems of herbicide protection and foliar application of fertilisers, and to assess the influence of the herbicide protection and foliar dressing on production processes and grain yield formation the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** Field experiments were conducted in 2023–2025 at Svitanok Plus LLC (Kyiv region) on grey forest podzolic medium-loam soils. The experimental design included three maize hybrids ('DB Khotyn', 'DM Stiker', 'KWS Rabato'), four herbicide protection treatments (control without herbicides; weed-free control; Laudis + Mero; Stellar Plus), and three foliar dressing options (no fertilisation; Raikat Final; Tekamin Brix + EGROW). Measurements included leaf area, photosynthetic potential, net photosynthetic productivity, and grain yield. **Results.** Herbicide protection and foliar fertilisation had a significant effect on the formation of the maize photosynthetic apparatus. The lowest leaf area values, ranging from 10.5 to 18.4 thousand m²/ha were recorded in the untreated control accompanied by a reduction in photosynthetic potential to 0.57–1.03 million m²·days/ha and net photosynthetic productivity to 6.62–8.55 g/m² per day. Effective weed suppression in the treatments with Laudis + Mero and Stellar Plus ensured a substantial increase in leaf area to 45.6–52.2 thousand m²/ha and enhanced photosynthetic activity. The highest values were obtained in the weed-free control, where leaf area reached 48.0–54.0 thousand m²/ha, photosynthetic potential 2.50–3.08 million m²·days/ha, and net photosynthetic productivity 17.15–18.24 g/m² per day. Foliar fertilisation positively influenced leaf apparatus functioning, with the most effective combination being Tekamin Brix + EGROW. The highest grain yield among the herbicide protection treatments (10.91 t/ha) was achieved by the hybrid 'DM Stiker' with Stellar Plus + Tekamin Brix + EGROW. **Conclusions.** The formation and functioning of the maize photosynthetic apparatus largely depended on the level of herbicide protection, foliar application of fertilisers, and the biological characteristics of the hybrids. Herbicide application significantly increased photosynthetic activity and crop productivity compared with the treatments without weed control. The most effective technological model was the combination of the hybrid 'DM Stiker', the herbicide Stellar Plus, and foliar fertilisation with Tekamin Brix + EGROW, which ensured the best photosynthetic potential indicators and the realisation of the productive potential of maize.

Keywords: maize; hybrids; photosynthetic apparatus; leaf area; photosynthetic potential; net photosynthetic productivity; herbicide protection; foliar application of fertilisers; grain yield.

ORCID

Дмитро Козаченко / Dmytro Kozachenko

<https://orcid.org/0000-0002-5502-7628>