ISSN 2707-3653 (Print)
DOI: https://doi.org/10.47414/be.2025.No2

БІОЕНЕРГЕТИКА

Науково-виробничий журнал
№ 2(26) • 2025

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 вченою радою Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (протокол № 22 від 24.12.2025)

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

Підписано до друку 27.12.2025
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
2025 • No 2(26)

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. 22 of December 24, 2025)

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

Signed for printing: December 27, 2025
Format 60×84 1/8. Offset paper.
Conventional printed sheets: ----
Print run: 50 copies. Order: ----

Printing House:
LLC “TVORY”
62a Nemyrivske Highway,
Vinnytsia, 21034, Ukraine
Tel.: 0(800) 33-00-90
E-mail: info@tvoru.com.ua
Website: http://www.tvoru.com.ua

ЗМІСТ CONTENTS

2025 ● № 2 ● С. 3–14
https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp3-14

Оригінальні дослідження

УДК 631.81:631.45

Вплив диференційованого вапнування на родючість сірого опідзоленого ґрунту

Я. І. Бойко

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

Автор для листування: Ярослав Бойко, iaroslavboik@gmail.com

Цитування: Бойко Я. І. Вплив диференційованого вапнування на родючість сірого опідзоленого ґрунту. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 3–14. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp3-14

Мета. Виявити особливості впливу диференційованого вапнування на родючість сірого опідзоленого ґрунту в умовах Полісся України. **Методи.** Науково-дослідні роботи виконували впродовж 2020–2024 рр. на полі площею 165 га (с. Панасівка, Житомирська обл.). Відбір ґрунтових зразків здійснювали за адаптивною сіткою (10 га) із застосуванням автомобіля Mitsubishi L200 з автоматичним пробовідбірником AgriSoilSampler та ГІС-навігацією. Основні фізико-хімічні та агрохімічні показники ґрунту визначали за стандартними методиками (LOI, FIA, Mehlich-3, ICP, DTPA). Просторовий розподіл показників аналізували методом Крігінга у QGIS для диференційованого планування вапнування. **Результати.** Агрохімічний стан ґрунтів дослідного поля характеризувався високою просторовою неоднорідністю. Початковий pH (1:1) варіював від 4,7 до 6,4, середнє – 5,7, буферний pH – 6,4, органічна речовина – 3,6%, рухомі форми фосфору – 23,0 мг/кг, калію – 119 мг/кг, обмінний кальцій – 2071 мг/кг, магній – 226 мг/кг. Виявлено значну строкатість просторового розподілу кислотності, органічної речовини та рухомих форм макро- і мікроелементів. Після диференційованого вапнування переважна частина площі набула слабкокислого та близького до нейтрального pH (6,1–6,7), зменшилася просторова варіабельність фосфору та калію, підвищився вміст обмінного кальцію та стабілізувався катіонний баланс ґрунту. Вміст обмінного магнію та рухомих форм цинку залишався у задовільних межах, що підтверджує безпечність обраних доз меліорантів. **Висновки.** Отримані результати свідчать, що диференційоване вапнування є ефективним інструментом управління кислотністю ґрунту, сприяє зниженню просторової варіабельності агрохімічних показників та формує науково обґрунтовані передумови для підвищення ефективності системи удобрення в умовах точного землеробства.

Ключові слова: диференційоване вапнування; кислотність ґрунту; pH; агрохімічні показники; рухомий фосфор; рухомий калій; обмінний кальцій; магній; цинк; просторова неоднорідність; точне землеробство; Полісся України.

Вступ

Кислотність ґрунтів залишається однією з ключових агроекологічних проблем землеробства в зоні Полісся, де значна частина орних земель представлена дерново-підзолистими та сірими опідзоленими ґрунтами з підвищеною буферною кислотністю. Кисла реакція ґрунтового середовища негативно впливає на фізико-хімічні й біологічні властивості ґрунту, обмежує доступність елементів живлення, порушує катіонний баланс ґрунтового вбирного комплексу та знижує ефективність застосування мінеральних добрив. Унаслідок цього продуктивність сільськогосподарських культур за таких умов характеризується значною просторовою мінливістю та нестабільністю [1–4].

Одержано 13.11.2025 ● **Погоджено** 09.12.2025 ● **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

Особливої актуальності зазначена проблема набуває на великих виробничих масивах, ґрунтовий покрив яких відзначається мозаїчною структурою та високим рівнем просторової неоднорідності агрохімічних показників. Навіть у межах одного поля можуть одночасно поєднуватися ділянки із сильно кислою, кислою та близькою до нейтральної реакцією ґрунтового розчину. За таких умов традиційне суцільне вапнування часто виявляється недостатньо ефективним, оскільки спричиняє локальне перевапнування окремих зон або, навпаки, збереження надмірної кислотності на інших ділянках [5–8].

Вапнування є базовим агрохімічним заходом хімічної меліорації кислих ґрунтів, спрямованим на нейтралізацію надлишкової кислотності, підвищення насиченості ґрунту основами та оптимізацію катіонного складу ґрунтового вбирного комплексу. Водночас результати сучасних досліджень свідчать, що максимальний ефект від вапнування досягається лише за умови врахування просторової мінливості ґрунтових властивостей. У цьому контексті розвиток технологій точного землеробства відкриває нові можливості для диференційованого внесення вапнякових меліорантів на основі детального агрохімічного обстеження та побудови цифрових карт кислотності ґрунтів [9–13].

Попри наявність значної кількості наукових публікацій, присвячених впливу вапнування на окремі агрохімічні показники [14–16], недостатньо дослідженим залишається питання комплексного оцінювання змін кислотності, а також макро- та мікроелементного складу ґрунту за умов диференційованого вапнування на великих виробничих полях Полісся. Особливої уваги потребує аналіз ефективності таких заходів у контексті зменшення просторової варіабельності агрохімічних показників і формування більш однорідного агрохімічного фону.

Мета дослідження – виявити особливості впливу диференційованого вапнування на родючість сірого опідзоленого ґрунту в умовах Полісся України.

Матеріали та методи дослідження

Науково-дослідні роботи проводили на сільськогосподарських землях, розташованих поблизу населеного пункту Панасівка Житомирського району Житомирської області, що належать до зони Житомирського Полісся. Цей регіон є одним із природно-географічно своєрідних районів України та вирізняється складною структурою природних умов і значною біогеографічною різноманітністю.

Ґрунтовий покрив Житомирського Полісся характеризується високою строкатістю та просторовою неоднорідністю, що зумовлено поєднанням кліматичних, геоморфологічних і біологічних чинників ґрунтоутворення. Помірно континентальний клімат із вологими зимами та теплим літом сприяє формуванню різних типів і підтипів ґрунтів навіть у межах одного поля. Така строкатість ґрунтового покриву створює істотні виклики для аграрного виробництва, у зв'язку з чим застосування технологій диференційованого внесення добрив і вапнякових меліорантів є важливою передумовою забезпечення стабільної родючості та вирівнювання продуктивності сільськогосподарських угідь.

Клімат Житомирського Полісся помірно континентальний, з теплим вологим літом і м'якою, переважно хмарною зимою. Формування кліматичних умов регіону визначається комплексом кліматоутворювальних чинників, зокрема сонячною радіацією, атмосферною циркуляцією, особливостями рельєфу, а також значною лісистістю й заболоченістю території, що зумовлюють розвиток локальних мікрокліматичних відмітностей. Середня багаторічна температура повітря найхолоднішого місяця (січня) становить близько –6 °C, найтеплішого (липня) – +17...19 °C. Середня річна температура повітря коливається в межах +6...7 °C. Абсолютний мінімум температури повітря в окремі роки досягає –30 °C, переважно в січні та лютому. Тривалість безморозного періоду становить 150–170 діб.

Оцінка вологозабезпечення в роки проведення досліджень (2020–2024 рр.) свідчить, що сумарна кількість атмосферних опадів загалом була достатньою для нормального росту й розвитку сільськогосподарських культур (табл. 1). Водночас упродовж останніх років простежується тенденція до зменшення кількості опадів у регіоні, особливо в період вегетації ранніх культур, а також до зростання нерівномірності їх випадання протягом вегетаційного періоду пізніх культур. Найчіткіше ці особливості проявилися у 2022–2024 роках.

Попри те, що річна кількість опадів у досліджувані роки загалом була близькою до середньобагаторічних значень (678–682 мм), найкритичнішим щодо вологозабезпечення залишається весняний період та перша половина вегетації сільськогосподарських культур. Саме в цей час закладаються основи формування врожайності більшості культур, зокрема пізньостиглих.

Таблиця 1. Кількість опадів у роки проведення досліджень (за даними додатку Geosys, Житомирський р-н, 2020–2024 рр.)

Кількість опадів, мм	2020	2021	2022	2023	2024	Середнє
За рік	619	745	705	671	717	678
За вегетаційний період:						
озимих культур	443	608	439	608	642	533
ранніх ярих культур (03–06)	257	291	179	242	258	255
пізніх ярих культур (04–09)	381	447	415	330	403	393

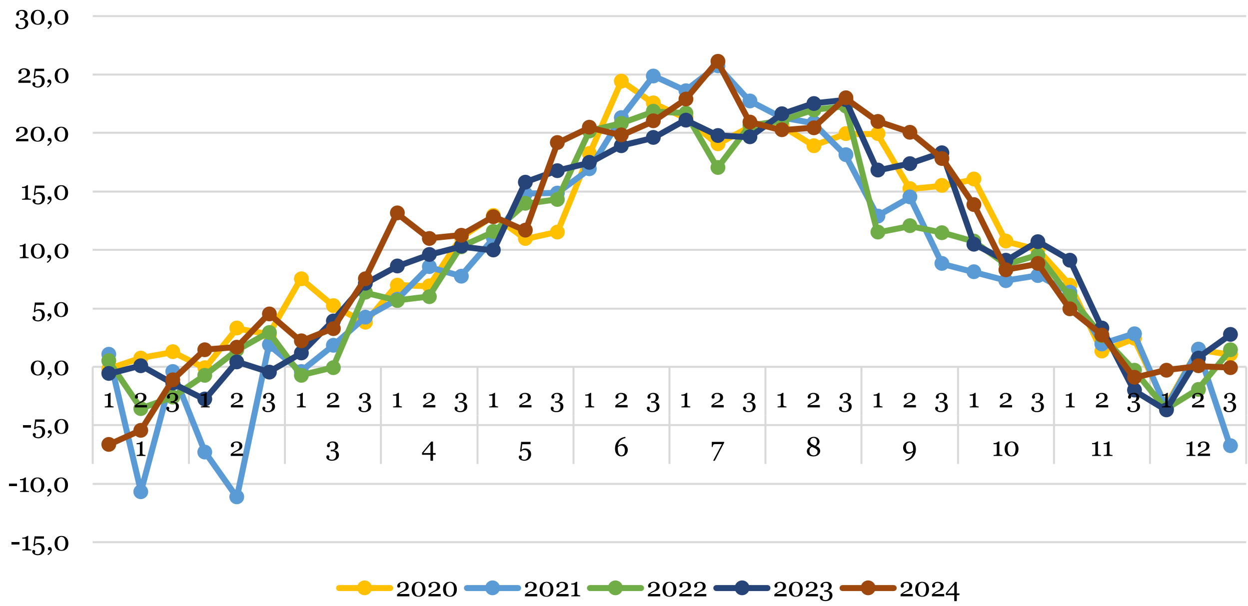


Рис. 1. Середньодобова температура повітря у роки проведення досліджень (за даними додатку Geosys, Житомирський р-н, 2020–2024 рр.)

Відбір ґрунтових зразків здійснювали із застосуванням автомобіля типу пікап Mitsubishi L200, оснащеного автоматичним пробовідбірником AgriSoilSampler (AgriLab). Пробовідбірник дистанційно керувався з кабіни автомобіля та був інтегрований із планшетом, обладнаним ГІС-програмним забезпеченням для формування й навігації за попередньо розробленими маршрутами відбору ґрунтових зразків. Автомобіль було обладнано GPS-антеною з точністю позиціювання до 30 см.

Автоматичний відбір ґрунтових зразків проводили за адаптивною сіткою, де площа елементарної ділянки становила 10 га. З кожної елементарної ділянки відбирали один змішаний зразок, сформований із 20 точкових проб, відібраних ґрунтовим буром з глибини до 30 см. Застосована схема відбору проб забезпечила отримання репрезентативної інформації про агрохімічні властивості ґрунту по всій площі поля та створила надійну аналітичну основу для подальшого планування й реалізації диференційованих агротехнічних заходів (рис. 2).

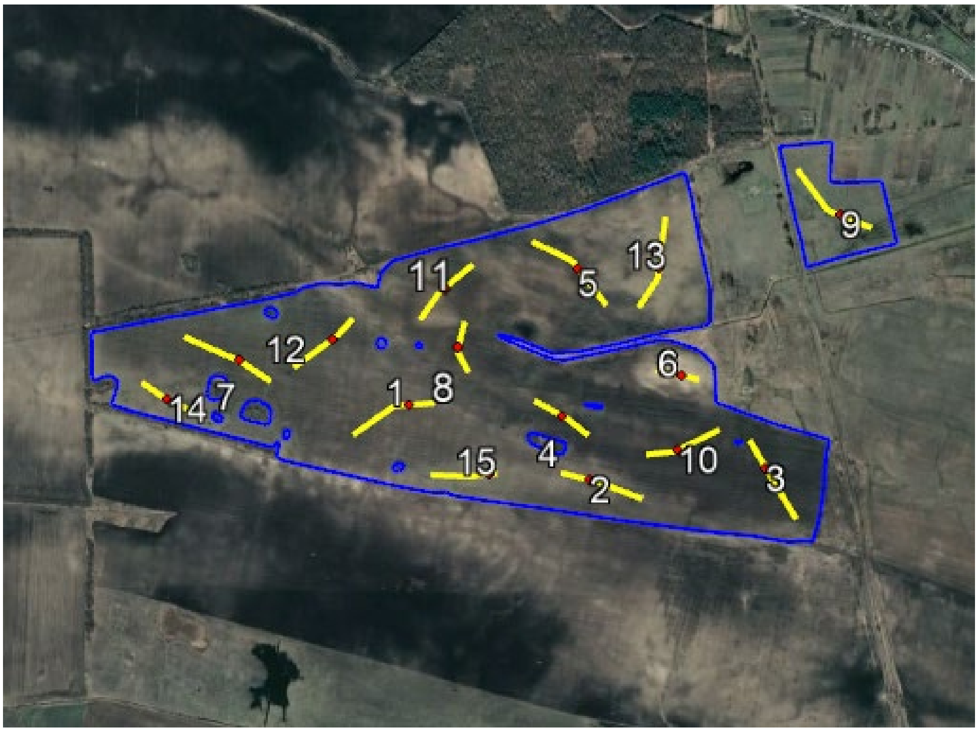


Рис. 2. Схема відбору ґрунтових зразків на досліджуваному полі (Панасівка, 165 га)

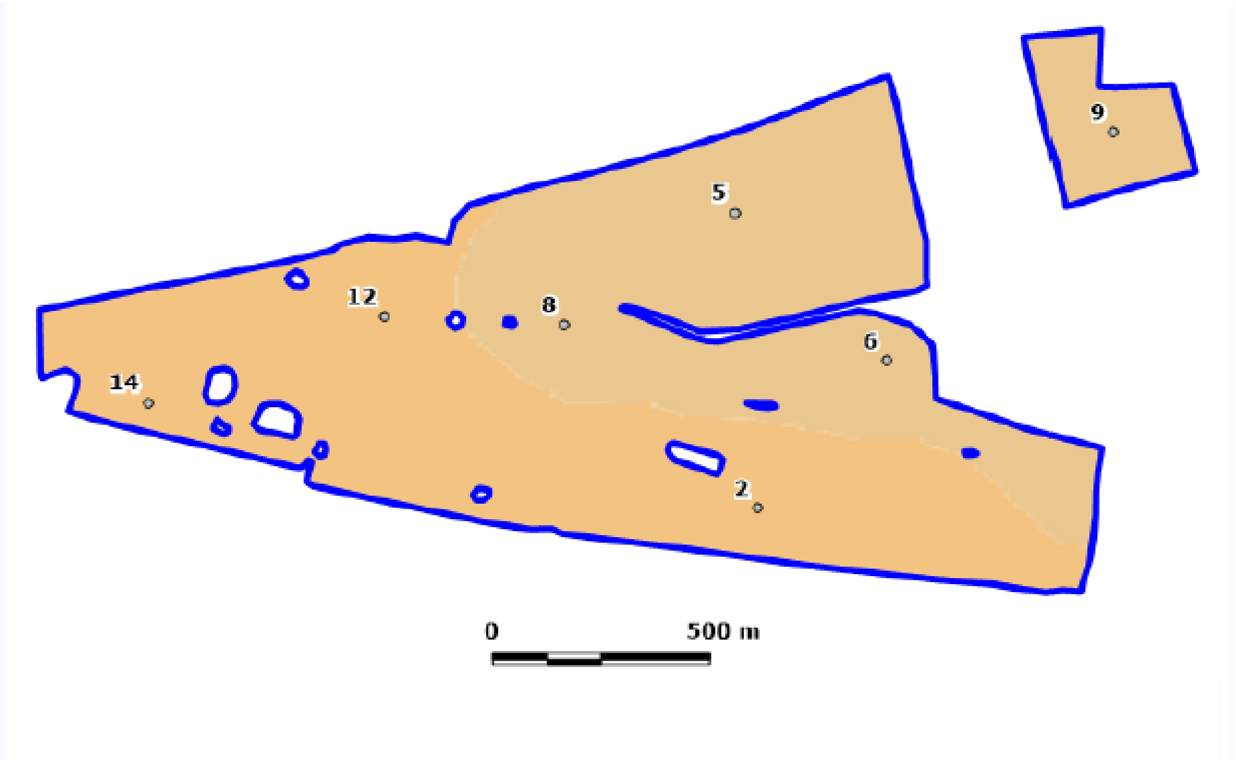
Для визначення фізико-хімічних і агрохімічних показників ґрунтів застосовували методи, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Методи визначення агрохімічних та фізико-хімічних показників ґрунту

Показник	Одиниці виміру	Метод визначення
pH ґрунту	од. pH	pH водний (1:1) потенціометрія
pH буферний	од. pH	Wdrf буфер потенціометрія
Органічна речовина	%	Пряме визначення за втратами при спалюванні (LOI)
Нітрати (NO_3)	мг/кг	Метод відновлення кадмієм (FIA)
Фосфор (P)	мг/кг	Mehlich-3 (Екстрагент: 0,2N CH_3COOH, 0,25N NH_4NO_3, 0,015N NH_4F, 0,013N HNO_3, 0,001M ЕДТА)
Калій (K)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH_3COONH_4, pH 7,0 (ICP)
Кальцій (Ca)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH_3COONH_4, pH 7,0 (ICP)
Магній (Mg)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH_3COONH_4, pH 7,0 (ICP)
Натрій (Na)	мг/кг	Амонійно-ацетатна витяжка (Ac) Екстрагент: 1 M CH_3COONH_4, pH 7,0 (ICP)
Сірка (S)	мг/кг	Монокальцій фосфатна витяжка (Ca-P)
Цинк (Zn)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Залізо (Fe)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Марганець (Mn)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Мідь (Cu)	мг/кг	Діетилен триамін пентаоцтова кислота (DTPA) (ICP)
Бор (B)	мг/кг	Екстрагент: гаряча H_2O
Уміст водорозчинних солей	ммоль/см	Кондуктометрія (Cond 1:1)
Сума катіонів	мг-екв/100 г	Розрахунковий
Насиченість основами	%	Відсоток від базового насичення катіонами

Досліджуване поле загальною площею 165 га характеризується високою неоднорідністю ґрунтового покриву та значною строкатістю ґрунтових властивостей, зокрема рівня кислотності ґрунтового середовища. Закладання досліду здійснювали відповідно до зон просторової неоднорідності за показником pH. Повторність досліду – триразова.

Ґрунтовий покрив дослідного поля представлений сірими опідзоленими та сірими опідзоленими оглеєними ґрунтами піщаного, суглинкового, важкосуглинкового і піщано-важкосуглинкового гранулометричного складу. Агрохімічні та фізико-хімічні показники орного шару ґрунту (0–30 см) характеризувалися такими межами варіювання: pH водної витяжки (1:1) – 4,7–6,4 од.; pH буферний – 6,0–6,7 од.; уміст органічної речовини – 1,6–5,8%. Уміст рухомих форм елементів живлення становив: фосфору (P) – 9–59 мг/кг ґрунту, калію (K) – 70–285 мг/кг, кальцію (Ca) – 516–3106 мг/кг, магнію (Mg) – 99–405 мг/кг.



Групування грунтів за гранулометричним складом					
Точка	Тип грунту	Вміст, %			Гранулометричний склад
		піску	мулу	глини	
5	Сірі опідзолені оглеєні грунти	44	29	27	Суглинок
6		44	37	19	Суглинок
8		34	29	37	Важкий суглинок
9		48	21	31	Піщановажкосуглинковий
2	Сірі опідзолені грунти	54	25	21	Піщановажкосуглинковий
12		46	33	21	Суглинок
14		36	41	23	Суглинок

Рис. 3. Групування ґрунтів за гранулометричним складом у межах дослідного поля (165 га)

Результати дослідження

Дослідне поле має ґрунти сірі опідзолені та сірі опідзолені оглеєні (піщаного, суглинкового, важко-суглинкового та піщано-важко-суглинкового гранулометричного складу).

Результати аналізу ґрунтових зразків, відібраних на початковому етапі досліджень у межах дослідного поля площею 165 га, наведено в таблиці 3.

Якщо докладніше проаналізувати вихідні агрохімічні показники стану ґрунту дослідної ділянки, то попри варіювання значень у межах деяких локаціях поля середні значення були такими: pH сольової витяжки – 5,7, pH буферний – 6,4, уміст розчинних солей – 0,15 ммоль/см, органічної речовини – 3,6%. Концентрація нітратів становила 7,9 мг/кг, рухомого фосфору – 23,0 мг/кг, обмінного калію – 119,0 мг/кг ґрунту.

Таблиця 3. Результати аналізу зразків ґрунту, відібраних на початку досліджень у межах дослідного поля № 2 (165 га), вихідні дані

Номер зразка	pH (1:1) ґрунту	pH буф.	Розчинні солі, ммоль/см	Орг. речовина, %	Нітрати (NO_3), мг/кг	Фосфор (P), мг/кг	Амонійно-ацетатний буфер, мг/кг				Сірка (S), мг/кг	Мікроелементи (DTPA), мг/кг				Сума катіонів, мг-екв/100 г	Насиченість основами, %				
							K	Ca	Mg	Na		Zn	Fe	Mn	Cu		H	K	Ca	Mg	Na
1	6,0	6,6	0,08	2,7	7,2	27	105	1567	115	10	17	0,48	61,9	18,5	0,87	12,7	28	2	62	8	0
2	5,9	6,6	0,08	2,6	4,5	18	103	1625	122	9	20	0,46	62,9	25,4	1,01	13,5	30	2	60	7	0
3	6,0	6,5	0,12	5,1	6,1	15	106	3062	345	18	18	0,54	121,0	14,1	1,60	23,1	20	1	66	12	0
4	5,4	6,0	0,14	5,2	8,4	13	89	2748	327	18	19	0,75	161,4	21,7	1,78	26,7	37	1	52	10	0
5	5,3	6,3	0,09	3,4	6,8	9	70	1780	214	13	14	0,48	139,6	19,9	1,47	18,1	40	1	49	10	0
6	4,7	6,4	0,15	1,6	18,9	56	81	516	99	12	24	0,55	153,6	22,6	0,71	10,0	63	2	26	8	1
7	5,8	6,5	0,11	3,3	3,8	21	134	1978	160	11	22	0,71	74,9	18,7	1,00	16,2	28	2	61	8	0
8	5,5	6,1	0,30	4,6	17,3	10	124	2960	368	17	17	0,52	120,0	20,5	1,85	27,1	33	1	55	11	0
9	6,4	6,7	0,29	5,2	10,3	59	285	3003	405	26	20	1,23	142,6	12,4	1,91	22,5	15	3	66	15	1
10	5,6	6,1	0,20	5,8	11,9	10	140	3106	384	16	14	0,57	120,9	15,3	1,60	28,2	32	1	55	11	0
11	5,4	6,3	0,18	4,6	5,8	7	100	2692	347	21	18	0,44	142,2	17,9	1,88	23,3	28	1	58	12	0
12	6,4	6,7	0,15	3,3	3,9	48	157	2188	139	12	17	0,58	73,1	16,3	0,94	16,1	22	3	68	7	0
13	5,5	6,5	0,11	2,7	5,3	9	74	1459	165	14	16	0,45	110,3	22,1	1,49	13,6	35	1	54	10	0
14	5,8	6,6	0,12	2,6	4,0	19	93	1648	129	10	13	0,40	102,3	20,2	1,29	13,4	28	2	62	8	0
15	5,3	6,6	0,07	1,6	4,6	25	131	729	74	10	20	0,43	76,2	30,8	0,85	8,5	46	4	43	7	0

Уміст кальцію визначено на рівні 2071,0 мг/кг ґрунту, магнію – 226,0 мг/кг, натрію – 14,0 мг/кг, сірки – 18,0 мг/кг, заліза – 111,0 мг/кг, мангану – 20,0 мг/кг. Сума катіонів становила 18,2 мг-екв/100 г ґрунту.

Для картографування ґрунтових властивостей та інтерпретації просторових варіацій використовували інтерполяцію методом Кригінга за допомогою ГІС-програми QGIS. Цей метод дає змогу створювати точні карти розподілу ґрунтових показників, ураховуючи просторову кореляцію даних та підвищуючи точність прогнозів для диференційованого управління агротехнічними процесами.

На рисунку 4 дослідної локації поля 165 га наведені дані з просторового розподілу показника pH.

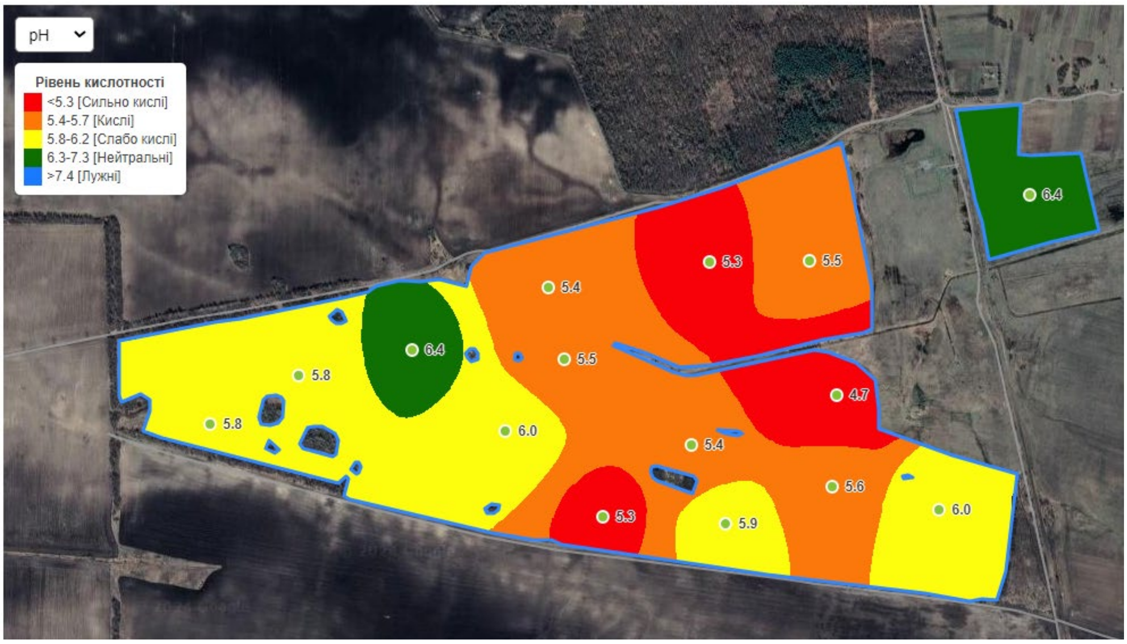
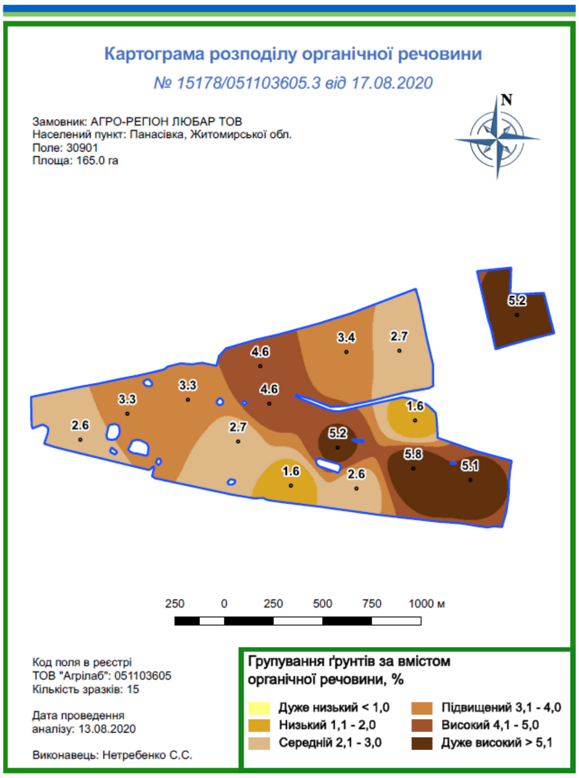


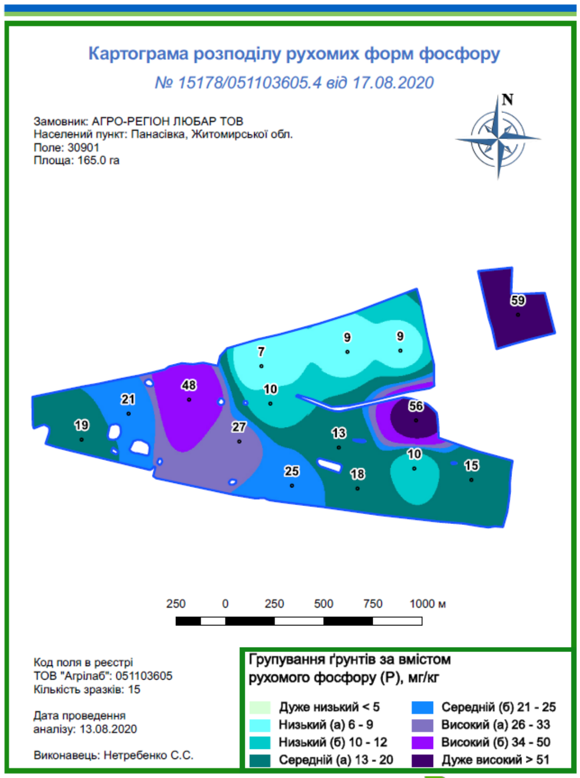
Рис. 4. Картограма розподілу показника pH (Kriging), поле 165 га, 2020 р.

Якщо аналізувати поле зліва направо, то простежується чітка тенденція зміни реакції ґрунтового середовища від слабкокислої (pH 5,8–6,0) та близької до нейтральної (pH 6,4) до кислої (pH 5,4–5,6) з формуванням локалізованих ділянок із сильно кислою реакцією (pH 4,7–5,3).

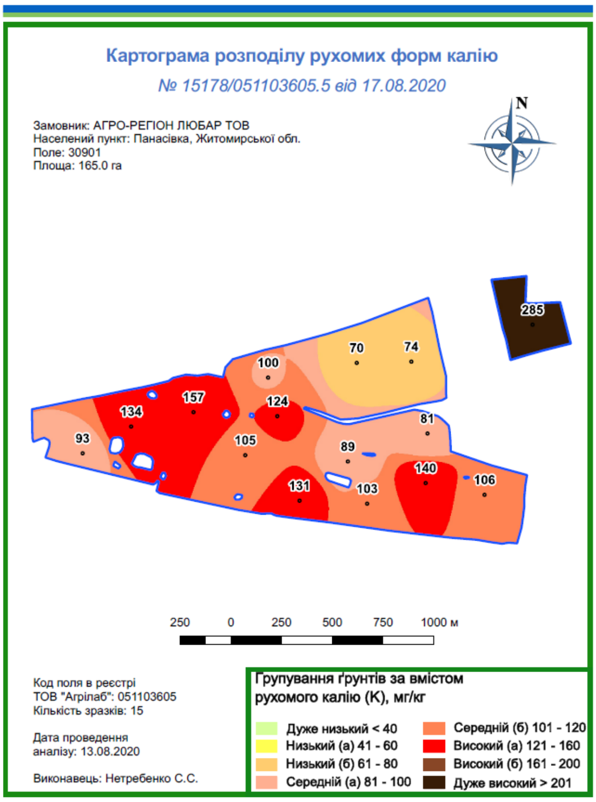
Аналіз просторового розподілу вмісту органічної речовини, а також рухомих форм фосфору й калію свідчить про значну строкатість цих показників у межах поля (рис. 5).



Уміст органічної речовини



Уміст рухомих форм фосфору

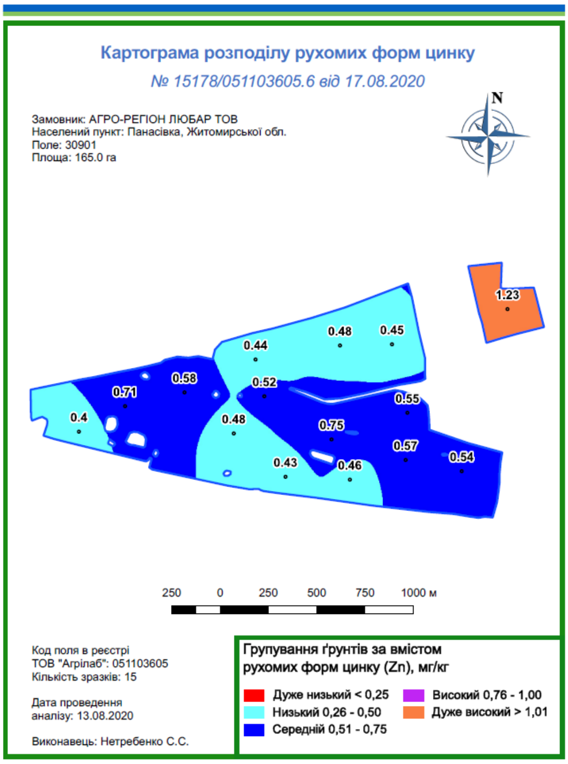


Уміст рухомих форм калію

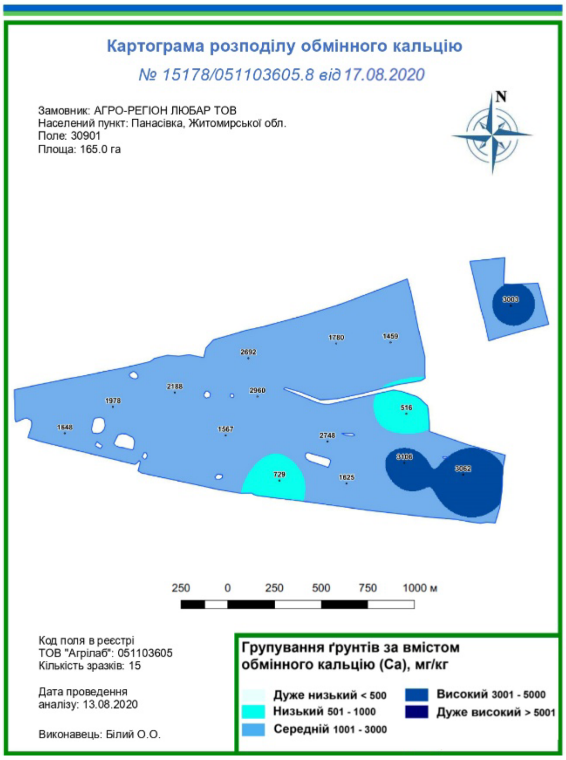
Рис. 5. Картограма розподілу вмісту органічної речовини, рухомих форм фосфору та калію, поле 165 га

Водночас установлено тісний взаємозв’язок між умістом органічної речовини та концентрацією рухомих форм фосфору й калію, тоді як кореляція цих показників із кислотністю ґрунту є слабкою. Зокрема, у лівій частині поля підвищений уміст органічної речовини поєднувався з високими концентраціями рухомих форм фосфору та калію. Натомість у правій частині поля, попри відносно високий рівень органічної речовини, чіткої залежності з умістом фосфору та калію не виявлено, що відображалося в середньому та низькому рівнях забезпеченості фосфором і середньому вмісті калію.

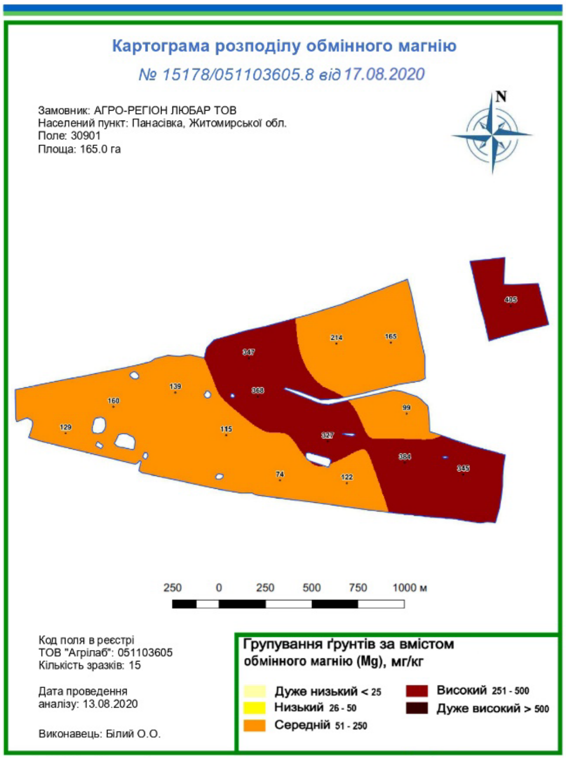
Цікавим є також просторовий розподіл рухомих форм цинку та обмінних форм кальцію і магнію (рис. 6), який, порівняно з іншими агрохімічними показниками, характеризується меншою строкатістю.



Уміст рухомих форм цинку



Уміст обмінного кальцію



Уміст обмінного магнію

Рис. 6. Картограма розподілу вмісту рухомих форм цинку та обмінного кальцію і магнію, поле 165 га

За результатами аналізу встановлено переважно низький і середній уміст рухомих форм цинку, низький рівень забезпеченості обмінним кальцієм, а також середній і високий уміст обмінного магнію.

Отримані результати свідчать, що агрохімічний стан ґрунтів дослідного поля площею 165 га характеризується високою просторовою неоднорідністю, що є типовою ознакою сірих опідзолених та сірих опідзолених оглеєних ґрунтів Житомирського Полісся. Вихідні значення кислотності ґрунту варіювали в широких межах pH(1:1) 4,7–6,4, охоплюючи діапазон від сильно кислої до близької до нейтральної реакції. Середнє значення pH по полю становило 5,7, тоді як буферний pH дорівнював 6,4, що свідчить про наявність значного резерву кислотності та обґрунтовує потенційну потребу в хімічній меліорації.

Просторовий аналіз картограм кислотності виявив чітко виражену мозаїчність ґрунтового покриву. У лівій частині поля переважали слабкокислі та близькі до нейтральних ґрунти (pH 5,8–6,4), тоді як у правій частині формувалися осередки кислих і сильно кислих ґрунтів (pH 4,7–5,6). Наявність таких локалізованих «острівців» підвищеної кислотності, ймовірно, зумовлена відмінностями ґрунтового генезису, гранулометричного складу та неоднаковою історією агротехнічного використання окремих ділянок поля. Саме така просторово диференційована структура кислотності є науковим обґрунтуванням доцільності застосування диференційованого вапнування, оскільки суцільне внесення меліорантів у подібних умовах неминуче призвело б до локального перевапнування або недовапнування ґрунту.

Уміст органічної речовини характеризувався значною варіабельністю – від 1,6 до 5,8%, із середнім значенням 3,6%. Аналіз картограм засвідчив наявність зон підвищеної гумусованості, які частково збігалися з ділянками високого вмісту рухомих форм фосфору та калію, однак цей зв'язок мав переважно локальний характер. Зокрема, у лівій частині поля підвищений уміст органічної речовини супроводжувався високими концентраціями рухомого фосфору та калію, тоді як у правій частині аналогічний рівень гумусу не забезпечував відповідної забезпеченості цими елементами. Це вказує на те, що доступність елементів живлення визначається не лише вмістом органічної речовини, а й кислотністю ґрунту, гранулометричним складом і катіонним балансом.

Уміст рухомих форм фосфору був у межах 9–59 мг/кг, за середнього значення 23,0 мг/кг, що відповідає переважно низькому та середньому рівням забезпеченості. Просторовий аналіз показав відсутність чіткої кореляції між концентрацією фосфору та показниками кислотності ґрунту, що свідчить про суттєвий вплив історії удобрення та локальних умов фіксації фосфатів. Водночас у кислих і сильно кислих зонах зберігається високий ризик зв'язування фосфору сполуками алюмінію та заліза, що знижує його доступність для рослин і посилює необхідність оптимізації pH шляхом вапнування.

Рухомі форми калію характеризувалися ще більшою амплітудою значень – від 70 до 285 мг/кг, за середнього вмісту 119 мг/кг. Поєднання ділянок із дуже високим умістом калію із зонами низького та середнього забезпечення свідчить про істотну просторову строкатість калійного режиму. Така неоднорідність зумовлює ризик неефективного використання калійних добрив за умов суцільного внесення та підтверджує доцільність диференційованого підходу до системи удобрення.

Обмінний кальцій, як ключовий елемент у контексті вапнування, характеризувався значним діапазоном концентрацій – від 516 до 3106 мг/кг, за середнього значення 2071 мг/кг. У значній частині поля його вміст відповідав низькому та середньому рівням забезпеченості, що тісно пов'язано з підвищеною кислотністю ґрунту. Уміст обмінного магнію варіював від 99 до 405 мг/кг (середнє значення 226 мг/кг) і загалом перебував у межах середнього та високого забезпечення, що є характерною рисою сірих опідзолених ґрунтів регіону. Виявлений дисбаланс між кальцієм і магнієм може негативно впливати на фізичні властивості ґрунту та мінеральне живлення рослин, тоді як вапнування в цьому разі є ефективним інструментом корекції катіонного складу ґрунтового вбирного комплексу.

Окремої уваги заслуговує просторовий розподіл рухомих форм цинку, який, порівняно з макроелементами, характеризувався меншою строкатістю. Переважна частина площі поля мала низький і середній рівень забезпеченості Zn, що є типовим для кислих ґрунтів. Водночас відсутність різко виражених контрастів у його розподілі вказує на потенційну чутливість цього мікроелемента до змін кислотності після вапнування, зокрема через можливе зниження його доступності за підвищення pH, що треба враховувати в подальшому агрохімічному супроводі.

Загалом результати досліджень переконливо демонструють, що агрохімічні показники ґрунтів дослідного поля формуються під впливом комплексу взаємопов'язаних факторів, серед яких кислотність ґрунту відіграє системоутворювальну роль. Висока просторова неоднорідність pH, умісту органічної речовини та елементного складу обумовлює доцільність застосування диференційованого вапнування як базового елемента системи точного землеробства та створює наукове підґрунтя для подальшої оцінки його післядії, змін агрохімічного статусу ґрунту й впливу на продуктивність сільськогосподарських культур.

Висновки

Агрохімічний стан ґрунтів дослідного поля до проведення вапнування характеризувався високою просторовою неоднорідністю кислотності, з діапазоном pH(1:1) 4,7–6,4, що охоплював умови від сильно кислих до близьких до нейтральних. Така строкатість обумовлювала нерівномірні умови живлення рослин і обмежувала ефективність використання мінеральних добрив.

Диференційоване вапнування забезпечило ефективну нейтралізацію кислотності ґрунту та вирівнювання реакції середовища: переважна частина площі перейшла у слабкокислий та близький до нейтрального діапазон pH (6,1–6,7), що свідчить про високу точність просторово орієнтованого внесення вапнякових меліорантів.

Уміст органічної речовини (1,6–5,8%) відзначався значною варіабельністю. Після вапнування спостерігалася тенденція до часткового зниження органічної речовини в окремих зонах, що можна пояснити активізацією мікробіологічної мінералізації за оптимізованої кислотності, без переходу ґрунтів у нижчі групи гумусованості.

Рухомі форми фосфору (7–59 мг/кг) перебували на низькому та середньому рівнях і відзначалися значною просторовою строкатістю. Підвищення pH у результаті вапнування створило передумови для підвищення доступності фосфору, особливо в раніше кислих зонах, де спостерігалася його фіксація.

Калійний режим (70–285 мг/кг) характеризувався значною амплітудою, що свідчило про локальну неоднорідність забезпеченості. Після вапнування відзначалася тенденція до більш вирівняного просторового розподілу калію, що підвищує ефективність його засвоєння рослинами та зменшує ризики надлишкового або недостатнього живлення.

Обмінний кальцій (516–3106 мг/кг) є ключовим показником ефективності вапнування. Після внесення меліорантів його концентрація зросла, що сприяло покращенню катіонного балансу ґрунтового вбирного комплексу, стабілізації структури ґрунту та зменшенню кислотної токсичності.

Обмінний магній (99–405 мг/кг) перебував переважно на середньому та високому рівнях. Після вапнування його вміст зростав менш інтенсивно, ніж кальцію, без ознак негативного дисбалансу Ca:Mg, що підтверджує адекватність підібраних доз меліорантів.

Рухомі форми цинку характеризувалися відносно рівномірним розподілом, а після вапнування не зазнали критичного зниження, незважаючи на підвищення pH. Це свідчить, що диференційоване вапнування не погіршило мікроелементне живлення рослин.

Узагальнюючи, диференційоване вапнування забезпечило зменшення просторової варіабельності агрохімічних показників, покращення умов живлення рослин та формування більш однорідного агрохімічного фону, що є ключовою передумовою стабілізації врожайності та підвищення ефективності системи удобрення.

Список використаних джерел

1. Berger, T. W., Türtscher, S., Berger, P., & Lindebner, L. (2016). A slight recovery of soils from acid rain over the last three decades is not reflected in the macro nutrition of beech (*Fagus sylvatica*) at 97 forest stands of the Vienna Woods. *Environmental Pollution*, *216*, 624–635. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.024

2. Majdi, H., & Viebke, C.-G. (2004). Effects of fertilization with dolomite lime + PK or wood ash on root distribution and morphology in a Norway spruce stand in Southwest Sweden. *Forest Science*, *50*(6), 802–809. https://doi.org/10.1093/forestscience/50.6.802

3. Cudlin, P., Kieliszewska-Rokicka, B., Rudawska, M., Grebenc, T., Alberton, O., Lehto, T., Bakker, M. R., Børja, I., Konôpka, B., Leski, T., Kraigher, H., & Kuyper, T. W. (2007). Fine roots and ectomycorrhizas as indicators of environmental change. *Plant Biosystems*, *141*(3), 406–425. https://doi.org/10.1080/11263500701626028

4. Wellbrock, N., Eickenscheidt, N., Grüneberg, E., & Bögelein, R. (2019). Environmental settings and their changes in the last decades. In N. Wellbrock & A. Bolte (Eds.), *Status and dynamics of forests in Germany: Results of the national forest monitoring* (Vol. 237, pp. 29–54). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_2

5. Homan, C., Beier, C., McCay, T., & Lawrence, G. (2016). Application of lime ($CaCO_3$) to promote forest recovery from severe acidification increases potential for earthworm invasion. *Forest Ecology and Management*, *368*, 39–44. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.002

6. Baek, S. H., Kanzaki, Y., Lora, J. M., Planavsky, N., Reinhard, C. T., & Zhang, S. (2023). Impact of climate on the global capacity for enhanced rock weathering on croplands. *Earth's Future*, *11*(8), Article e2023EF003698. https://doi.org/10.1029/2023EF003698

7. Aramburu Merlos, F., Silva, J. V., Baudron, F., & Hijmans, R. J. (2023). Estimating lime requirements for tropical soils: Model comparison and development. *Geoderma*, *432*, Article 116421. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116421

8. Matus, C., Stopic, S., Etzold, S., Kremer, D., Wotruba, H., Dertmann, C., Telle, R., Friedrich, B., & Knops, P. (2020). Mechanism of nickel, magnesium, and iron recovery from olivine bearing ore during leaching with hydrochloric acid including a carbonation pre-treatment. *Metals*, *10*(6), Article 811. https://doi.org/10.3390/met10060811

9. Drápelová, I., & Kulhavý, J. (2012). Comparison of soil and seepage water properties in the limed and not-limed spruce forest stands in the Beskydy Mts. *Beskydy*, *5*(1), 55–64. https://doi.org/10.11118/beskyd201205010055

10. Pavlu, L., Drabek, O., Stejskalova, S., Tejnecky, V., Hradilova, M., Nikodem, A., & Boruvka, L. (2018). Distribution of aluminium fractions in acid forest soils: Influence of vegetation changes. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, *11*(6), 721–727. https://doi.org/10.3832/ifor2498-011

11. Meesenburg, H., Riek, W., Ahrends, B., Eickenscheidt, N., Grüneberg, E., Evers, J., Fortmann, H., König, N., Lauer, A., Meiwes, K. J., Nagel, H.-D., Schimming, C.-G., & Wellbrock, N. (2019). Soil acidification in German forest soils. In N. Wellbrock & A. Bolte (Eds.), *Status and dynamics of forests in Germany: Results of the national forest monitoring* (Vol. 237, pp. 93–121). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_4

12. Court, M., van der Heijden, G., Didier, S., Nys, C., Richter, C., Pousse, N., Saint-André, L., & Legout, A. (2018). Long-term effects of forest liming on mineral soil, organic layer and foliage chemistry: Insights from multiple beech experimental sites in Northern France. *Forest Ecology and Management*, *409*, 872–889. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.007

13. Swoboda, P., Döring, T. F., & Hamer, M. (2022). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of The Total Environment*, *807*, Article 150976. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976

14. Makaza, W., & Khiari, L. (2026). The meta-analysis study on the effects of the quality of lime materials on the soil physicochemical properties and crop yields in acid soils. *Frontiers in Soil Science*, *6*. https://doi.org/10.3389/fsoil.2026.1725559

15. Dinkecha, K., & Tsegaye, D. (2017). Effects of liming on physicochemical properties and nutrient availability of acidic soils in Welmera Woreda, Central Highlands of Ethiopia. *Biochemistry and Molecular Biology*, *2*(6), 102–109. https://doi.org/10.11648/j.bmb.20170206.16

16. Hosna, K. T., Rahman, M., Al-Solaimani, S. G., Yeasmin, N., Islam, M. N., & El-Wahed, M. H. (2024). Effect of liming on soil pH, nutrient availability, growth and yield of wheat in acidic soils of Tista Floodplain in Bangladesh. *International Journal of Plant & Soil Science*, *36*(10), 103–115. https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i105058

Effect of differential liming on the fertility of grey podzolic soil

Ya. I. Boiko

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

Corresponding author: Yaroslav Boiko, iaroslavboik@gmail.com

Citation: Boiko, Ya. I. (2025). Effect of differential liming on the fertility of grey podzolic soil. *Bioenergy*, *2*, 3–14. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp3-14

Aim. To identify the specific effects of differential liming on the fertility of grey podzolic soil in the Polissia region of Ukraine. **Methods.** Research was carried out during 2020–2024 on a field of 165 ha (Panasivka, Zhytomyr region). Soil samples were collected using an adaptive grid (10 ha) with a Mitsubishi L200 vehicle equipped with an automatic AgriSoilSampler and GIS navigation. The main physico-chemical and agrochemical charatceristics of soil were determined by standard methods (LOI, FIA, Mehlich-3, ICP, DTPA). Spatial distribution of indicators was analysed by Kriging in QGIS for differential liming planning. **Results.** The agrochemical state of the soils of the experimental field was characterised by high spatial heterogeneity. Initial pH (1:1) ranged from 4.7 to 6.4 (average 5.7), buffer pH 6.4, organic matter 3.6%, available phosphorus 23.0 mg/kg, potassium 119 mg/kg, exchangeable calcium 2071 mg/kg, magnesium 226 mg/kg. Significant variability was observed in the spatial distribution of acidity, organic matter, and available macro- and microelements. After differential liming, most of the area acquired slightly acidic to near-neutral pH (6.1–6.7), spatial variability of phosphorus and potassium decreased, exchangeable calcium content increased, and the soil cation balance stabilised. Exchangeable magnesium and available zinc remained within satisfactory limits, confirming the safety of the chosen ameliorant doses. **Conclusions.** The results indicate that differential liming is an effective tool for managing soil acidity, reducing spatial variability of agrochemical indicators, and creating scientifically substantiated prerequisites for improving the efficiency of fertilisation systems under precision farming conditions.

Keywords: differential liming; soil acidity; pH; agrochemical indicators; available phosphorus; available potassium; exchangeable calcium; magnesium; zinc; spatial heterogeneity; precision farming; Polissia of Ukraine.

ORCID

Ярослав Бойко / Yaroslav Boiko https://orcid.org/0009-0006-6402-7730

https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp15-24

Оригінальні дослідження

УДК 633.174: 631.86

Вплив обробки насіння біологічними препаратами на формування продуктивності рослин сорго звичайного (двокольорового) на малопродуктивних землях

О. М. Ганженко*, **І. І. Злиденний**

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

**Автор для листування: Олександр Ганженко, ganzhenko74@gmail.com*

Цитування: Ганженко О. М., Злиденний І. І. Вплив обробки насіння біологічними препаратами на формування продуктивності рослин сорго звичайного (двокольорового) на малопродуктивних землях. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 15–24. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp15-24

Мета. Установити закономірності формування продуктивності сорго звичайного (двокольорового) за комбінованої передпосівної обробки насіння різними нормами біопрепаратів на малопродуктивних ґрунтах у зоні нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України. **Методи.** Польові дослідження виконано у 2023–2025 рр. на Ялтушківській дослідно-селекційній станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (Вінницька обл.) у двофакторному досліді: фактор А – мікоризоутворювальний препарат Мікофренд (0, 4, 8 г/кг), фактор В – вуглецевмісний адсорбент БМ-нанобіочар (0, 4, 8 г/кг). Висівали ранньостиглий гібрид ‘СВАТ’. Обліковували польову схожість, біометричні показники (кущистість, висоту, діаметр стебла, кількість листків), урожайність сухої біомаси та насіння. **Результати.** Комбінована інокуляція насіння достовірно активізувала початкові етапи органогенезу та подальше формування врожаю. Польова схожість зросла з 74,9% у контролі до 82,7% за сумісного внесення обох препаратів у нормі 4 г/кг (+7,8% до контролю; $НІР_{0,05}$ = 3,6%). Посилення ростових процесів проявилося у збільшенні кущистості на 36,3%, висоти рослин – на 41,0%, діаметра стебла – на 43,9% порівняно з контролем. Найвища врожайність сухої біомаси (8,16 т/га) отримана за поєднання препаратів по 4 г/кг, що на 30,1% перевищувало контрольний варіант (6,27 т/га; $НІР_{0,05}$ = 1,06 т/га). Підвищення норм до 8 г/кг не забезпечувало додаткового приросту, що свідчить про дозозалежний ефект із вираженим біологічним оптимумом. Аналогічна тенденція встановлена для насіннєвої продуктивності: максимальний показник 7,41 т/га перевищував контроль (6,23 т/га) на 18,9% ($НІР_{0,05}$ = 0,73 т/га). У формуванні врожайності сухої біомаси домінував фактор БМ-нанобіочару (57,9%), тоді як внесок Мікофренду становив 31,8%. Варіювання насіннєвої продуктивності найбільше залежало від погодних умов року (35,2%) і застосування БМ-нанобіочару (32,2%), що підкреслює адаптивну роль обробки насіння в різних гідротермічних режимах. **Висновки.** Установлено наявність оптимуму норми витрати для комбінованої обробки насіння сорго – 4 г/кг кожного препарату, що забезпечує статистично підтверджене зростання морфоструктурних показників і врожайності в умовах малопродуктивних сірих лісових ґрунтів. Отримані результати доводять доцільність включення досліджених біопрепаратів до адаптивних технологій вирощування сорго звичайного (двокольорового) в умовах кліматичної мінливості.

Ключові слова: висота рослин; діаметр стебла; кущистість; нанобіочар; мікоризоутворювальний препарат; польова схожість насіння; урожайність насіння; урожайність сухої біомаси.

Одержано 21.11.2025 ● **Погоджено** 18.12.2025 ● **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

Вступ

Сорго звичайне (двокольорове) [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] на сучасному етапі розвитку агрономії розглядається як одна з найбільш перспективних культур для адаптації рослинництва до глобальних екологічних викликів. Завдяки низькому коефіцієнту транспірації та винятковій посухостійкості, сорго стає стратегічним ресурсом для сільськогосподарських виробників в умовах прогресуючого дефіциту вологи та підвищення середньорічних температур. Універсальність цієї культури дає змогу комплексно використовувати її біомасу (як зерно, так і стебла) для продовольчих потреб, створення високоякісної кормової бази та як сировину для біоенергетичної галузі [1].

Посилення інтересу до сорго тісно пов'язане з трансформацією світової економіки в напрямку циркулярних моделей та кліматичної нейтральності. Це корелює з положеннями Паризької Кліматичної Угоди [2] та стратегічними цілями Зеленого Європейського Курсу [3]. У межах цих ініціатив особливе значення має впровадження ресурсоефективних технологій, які мінімізують антропогенне навантаження на екосистеми. Зокрема, йдеться про поступову відмову від надмірного застосування синтетичних добрив та пестицидів на користь препаратів біологічного походження, що дає змогу зберегти біорізноманіття ґрунту та підвищити екологічність кінцевої продукції сорго.

На сьогодні наукова спільнота накопичила значний масив даних щодо оптимізації типових технологій вирощування сорго звичайного (двокольорового) у різноманітних ґрунтово-кліматичних зонах України [4–8]. Окремі дослідження присвячені інноваційним методам передпосівної підготовки, зокрема вивченню впливу нанобіочару та Мікофренду на посівні якості насіння [9]. Проте, попри наявність бази щодо агротехніки, у науковій літературі спостерігається певний дефіцит системних досліджень, спрямованих на вивчення комплексного впливу сучасних біопрепаратів на процеси формування продуктивності рослин сорго звичайного (двокольорового) на малопродуктивних землях.

Одним із найперспективніших напрямів інтенсифікації вирощування сорго є застосування біочару. Цей меліорант не лише сприяє зростанню врожайності та поліпшенню агрофізичних показників ґрунту, а й виконує важливу функцію депонування вуглецю, зменшуючи емісію парникових газів [10, 11]. Особливий науковий інтерес викликає синергетичний ефект від поєднання біочару з мікоризоутворювальними біопрепаратами [12, 13]. Така комбінація стимулює активне заселення кореневої системи мікоризними грибами, а також оптимізацію водного режиму рослин, що критично важливо в умовах змін клімату [14–16].

Ураховуючи доведену ефективність обробки насіння мікоризувальними препаратами для підвищення енергії проростання та схожості насіння різних культур [17, 18], актуальним завданням постає глибше вивчення цих механізмів саме для сорго звичайного (двокольорового) як ключового елемента сталого агроценозу.

Мета дослідження – установити закономірності формування продуктивності сорго звичайного (двокольорового) за комбінованої передпосівної обробки насіння різними нормами біопрепаратів на малопродуктивних ґрунтах у зоні достатнього зволоження Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження виконували впродовж 2023–2025 рр. на Ялтушківській дослідно-селекційній станції (ЯДСС) Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (Вінницька обл.), що розташована в умовах нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України.

Ґрунт дослідного поля – сірий лісовий легкосуглинковий. Агрохімічні показники орного шару (0–30 см) характеризувалися такими значеннями: вміст гумусу (за Тюріним) – 0,86%; лужногідролізованого азоту (за Корнфілдом) – 63,0 мг/кг; рухомого фосфору та калію (за Чириковим) – 109 і 119 мг/кг ґрунту відповідно; pH сольове – 5,3; гідролітична кислотність (за Каппеном) – 2,9 мг-екв/100 г ґрунту; сума ввібраних основ – 22,4 мг-екв/100 г ґрунту; ступінь насичення основами – 80–83%.

Погодні умови 2023 року характеризувалися підвищеним температурним фоном і дефіцитом опадів порівняно із середніми багаторічними показниками (рис. 1). Упродовж усього вегетаційного періоду середньомісячна температура повітря перевищувала кліматичну норму. Найменше відхилення зафіксовано у квітні (0,4 °С), найбільше – у серпні та вересні (4,4 і 4,3 °С відповідно). У середньому за вегетаційний період температура повітря перевищувала норму на 2,4 °С, а дефіцит опадів становив 73,5 мм. За ГТК (0,77) умови 2023 року відповідали слабкій посусі.

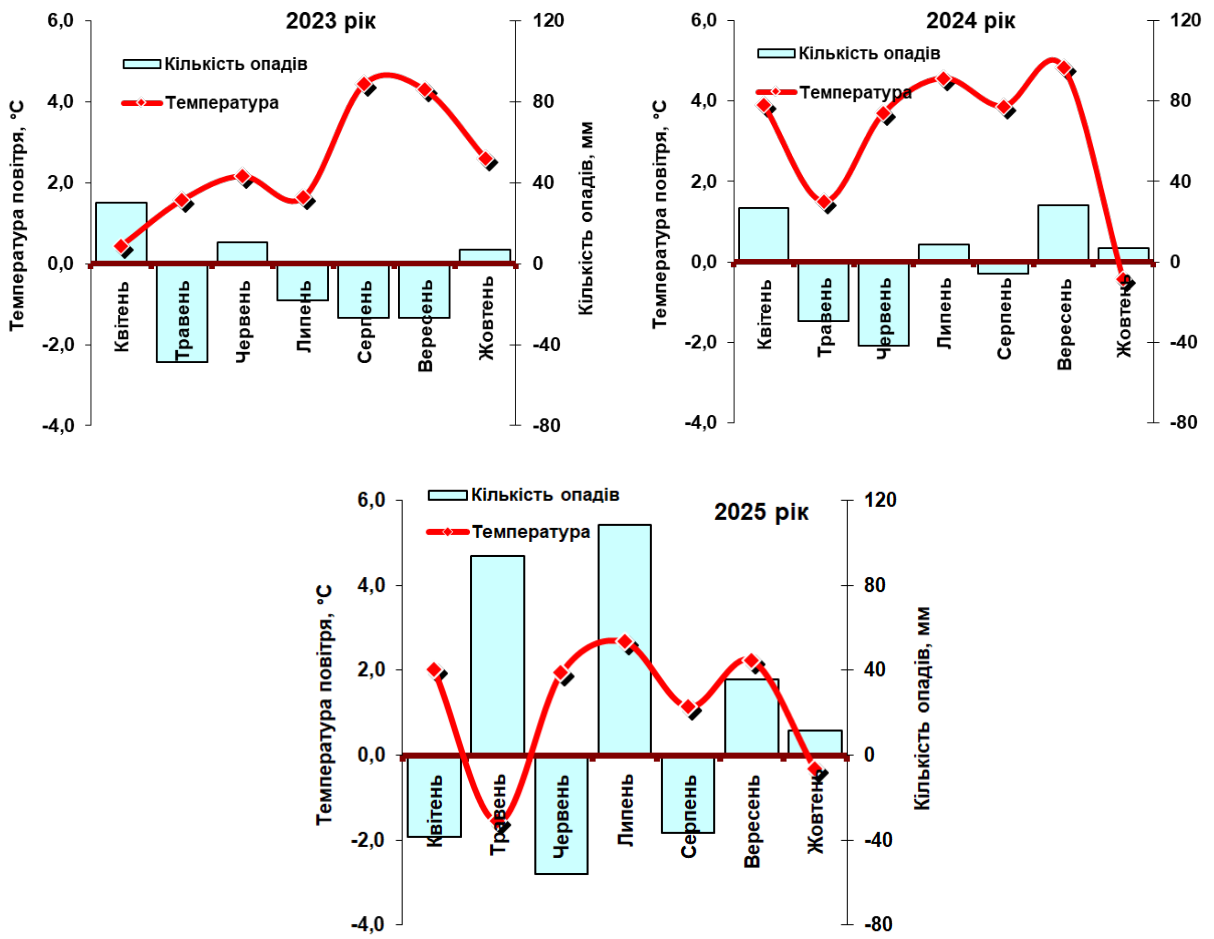


Рис. 1. Відхилення від середніх багаторічних значень температури повітря та кількості опадів (2023–2025 рр.)

У 2024 р. температурний режим упродовж вегетаційного періоду характеризувався перевищенням середніх багаторічних значень, за винятком жовтня. Найменше відхилення від кліматичної норми зафіксовано у жовтні (–0,4 °С) та травні (+1,5 °С), найбільше – у квітні (+3,9 °С), серпні (+3,7 °С) і вересні (+4,8 °С). У середньому за вегетаційний період температура повітря перевищувала норму на 3,1 °С. Дефіцит опадів становив 6,6 мм. За гідротермічним коефіцієнтом (ГТК = 1,1) умови 2024 року оцінювалися як достатньо вологі.

Метеорологічні умови 2025 року відзначалися значною строкатістю та відхиленнями від типових для зони показників, насамперед за режимом зволоження. За винятком травня та жовтня, середньомісячна температура повітря перевищувала середні багаторічні значення. У середньому за вегетаційний період перевищення становило 1,2 °С, що є меншим порівняно з 2023–2024 рр.

Надходження опадів у період вегетації рослин сорго звичайного (двокольорового) характеризувалося вираженою нерівномірністю. Значний надлишок вологи зафіксовано у травні (+94,0 мм) і липні (+108,7 мм), а також у вересні (+35,5 мм) та жовтні (+11,5 мм). Водночас у квітні, червні та серпні спостерігався дефіцит опадів, який становив відповідно 38,5; 55,9 і

36,7 мм відносно середніх багаторічних показників. Загалом за вегетаційний період кількість опадів перевищила норму на 118,6 мм, а значення ГТК дорівнювало 1,7, що відповідає надмірно вологим умовам.

Узагальнений аналіз метеорологічних показників за 2023–2025 рр., що склалися впродовж вегетації на ЯДСС, свідчить про стійку тенденцію до підвищення середньодобової температури повітря порівняно з багаторічними нормами. Рівень перевищення варіював від 1,2 °C у 2025 році до 2,4–3,1 °C у 2023–2024 рр. Режим зволоження характеризувався значною міжрічною мінливістю: у 2023 році відзначено дефіцит опадів і прояви слабкої посухи (ГТК = 0,77), у 2024 році – достатнє зволоження (ГТК = 1,1), тоді як у 2025 році сформувалися надмірно вологі умови з профіцитом опадів 118,6 мм за період вегетації рослин сорго звичайного (двокольорового) (ГТК = 1,7).

Насіння сорго звичайного (двокольорового) безпосередньо перед сівбою обробляли мікоризоутворювальним біопрепаратом Мікофренд (фактор А) та вуглецевмісним адсорбентом БМ-нанобіочар (фактор В) у нормах кожного 0, 4 і 8 г на 1 кг насіння (табл. 1).

Таблиця 1. Схема двофакторного польового досліду

Фактор А – норма застосування БМ-нанобіочар	Фактор В – норма застосування Мікофренд
А1 (контроль)	В1 (контроль)
А2 – 4 г/кг	В2 – 4 г/кг
А3 – 8 г/кг	В3 – 8 г/кг

Площа посівної ділянки становила 50 м², облікової – 25 м². Повторність досліду – чотириразова. Загальна площа досліду – 0,18 га.

Дослід закладено за методом систематичних повторювань, згідно з яким у межах кожного повторення варіанти розміщували послідовно. Сівбу проводили на глибину 4–6 см із шириною міжрядь 45 см та розрахунковою густотою стояння 150 тис. шт./га (6–7 схожих насінин на 1 м рядка). У досліді використовували насіння сорго звичайного (двокольорового) ранньостиглого гібрида 'Сват' селекції Інституту зернових культур НААН [19]. Маса 1000 насінин становила 28,2 ± 0,4 г за вологості 14,1 ± 0,3 %.

Мікоризоутворювальний біопрепарат Мікофренд (ТУ У 24.1-30165603-020:2010) виготовлено на основі грибів роду *Glomus* із додаванням мікроорганізмів, що стимулюють формування мікоризи та розвиток ризосфери, а також фосфатмобілізувальних бактерій і біологічно активних речовин.

Біопрепарат БМ-нанобіочар (ТУ У 20.1-2571100774-001:2021) отримано шляхом термохімічного перетворення біомаси; розмір частинок становить менше ніж 5 мкм, загальна площа поверхні – 864 м²/г, уміст вуглецю – 95%.

Експериментальні дані опрацьовано методами описової статистики із застосуванням регресійного та дисперсійного аналізу (ANOVA) у програмному середовищі Statistica [20].

Результати досліджень

Аналіз результатів польових досліджень засвідчив позитивний вплив передпосівної обробки насіння сорго звичайного (двокольорового) біопрепаратами на показники польової схожості. У контрольному варіанті без застосування препаратів схожість становила 74,9% (табл. 2).

Найвище значення показника – 82,7% – зафіксовано за поєднання обох біопрепаратів у нормі 4 г/кг насіння. Самостійне застосування БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг забезпечило підвищення польової схожості до 78,4%, тоді як використання Мікофренду в аналогічній нормі сприяло зростанню показника до 81,2%.

Збільшення норми БМ-нанобіочару до 8 г/кг за відсутності мікоризації супроводжувалося незначним зниженням схожості до 77,2% порівняно з варіантом 4 г/кг. Подібна тенденція відмічалася і за сумісного внесення обох препаратів у максимальній нормі (8 г/кг), де польова схожість становила 77,9%, що лише на 3,0% перевищувало контроль ($НІР_{0,05}$ = 3,6%). Водночас застосування Мікофренду в нормах 4 і 8 г/кг без додавання БМ-нанобіочару забезпечило однаковий рівень схожості – 81,2%.

Статистичний аналіз підтвердив достовірність виявлених відмінностей, оскільки різниця між найефективнішими варіантами та контролем перевищувала $НІР_{0,05}$ (3,6%). Отже, найдоцільнішою для стимулювання початкових етапів росту й розвитку сорго на малопродуктивних ґрунтах є комбіноване оброблення насіння препаратами в помірних нормах (4 г/кг).

Таблиця 2. Польова схожість насіння, біометричні показники та елементи продуктивності рослин сорго звичайного (двокольорового) залежно від норм застосування біопрепаратів Мікофренд і БМ-нанобіочар

Фактор А – норма Мікофренду, г/кг	Фактор В – норма БМ-нанобіочару, г/кг	Польова схожість насіння, %	Кількість стебел, шт.	Висота рослин, см	Діаметр стебел, мм	Кількість листя, шт.	Урожайність біомаси (волога), т/га	Уміст сухої речовини, %	Урожайність сухої біомаси, т/га	Урожайність насіння, т/га
0*	0	74,9	2,15	79,4	15,5	6,47	11,9	52,7	6,27	6,23
0	4	78,4	2,73	100,7	18,9	6,38	13,3	54,8	7,30	6,15
0	8	77,2	2,58	100,8	19,3	6,39	13,4	52,5	7,01	6,07
4	0	81,2	2,64	98,9	18,9	6,65	13,3	52,5	6,99	6,13
4	4	82,7	2,93	110,8	21,3	7,16	14,7	55,6	8,16	7,41
4	8	79,1	2,75	105,2	20,3	7,01	14,3	55,2	7,87	6,30
8	0	81,2	2,84	104,5	20,1	6,78	13,6	50,5	6,83	5,75
8	4	81,1	2,93	112,0	22,3	6,86	15,1	52,7	7,90	6,77
8	8	77,9	2,75	105,0	21,1	6,62	13,6	52,6	7,12	6,20
$НІР_{0,05}$		3,6	0,30	8,1	1,6	0,72	1,6	4,6	1,06	0,73

* контрольний варіант.

Результати досліджень засвідчили, що передпосівна обробка насіння біопрепаратами істотно стимулювала процеси кущення сорго звичайного (двокольорового). У контрольному варіанті без обробки коефіцієнт кущистості був мінімальним і становив 2,15 стебла на рослину. Найінтенсивніше формування стеблостою відмічено за сумісного застосування БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг із Мікофрендом у нормах 4–8 г/кг, де кількість стебел досягала 2,93 шт. Використання лише БМ-нанобіочару (4 г/кг) підвищувало показник до 2,73 шт., тоді як ізольоване застосування Мікофренду в аналогічній нормі – до 2,64 шт. Поєднання обох факторів забезпечувало виражений синергетичний ефект. Відмітності у кращих варіантах істотно перевищували $НІР_{0,05}$ = 0,30, що підтверджує їх статистичну достовірність.

Аналіз біометричних показників виявив суттєвий вплив препаратів на формування висоти рослин і діаметра стебла. У контролі ці показники були найнижчими – 79,4 см і 15,5 мм відповідно. Застосування БМ-нанобіочару (4 г/кг) сприяло зростанню висоти до 100,7 см, діаметра стебла – до 18,9 мм. Найвищі показники розвитку вегетативної маси отримано за поєднання Мікофренду (8 г/кг) із БМ-нанобіочаром (4 г/кг): висота рослин становила 112,0 см, діаметр стебла – 22,3 мм, що на 43,9% перевищувало контрольні значення за діаметром. Підвищення норми БМ-нанобіочару до 8 г/кг за високого рівня мікоризації (8 + 8 г/кг) супроводжувалося незначним, у межах $НІР_{0,05}$, зменшенням висоти до 105,0 см і діаметра стебла до 21,1 мм. Варіанти з окремим застосуванням Мікофренду також стабільно перевищували контроль, забезпечуючи висоту рослин у межах 98,9–104,5 см. Отримані прирости перевищували $НІР_{0,05}$, що становив 8,1 см для висоти та 1,6 мм для діаметра стебла.

Формування асиміляційної поверхні також залежало від передпосівної обробки, однак цей показник виявився менш варіабельним. У контролі кількість листків становила 6,47 шт. на рослину. Максимальне значення – 7,16 шт. – зафіксовано за сумісного внесення обох препаратів у нормі 4 г/кг, що на 0,69 шт. більше порівняно з контролем ($НІР_{0,05}$ = 0,72 шт.). Самостійне застосування БМ-нанобіочару в різних нормах істотно не впливало на кількість листків. Отже, достовірне збільшення листкового апарату забезпечувалося переважно за комбінованої дії мікоризації та вуглецевого адсорбенту.

Формування врожайності сухої листково-стеблової біомаси на малопродуктивних землях також суттєво залежало від обробки насіння. У контрольному варіанті врожайність становила 6,27 т/га. Найвищий показник – 8,16 т/га – отримано за сумісного застосування Мікофренду та БМ-нанобіочару в помірних нормах (по 4 г/кг), що забезпечило приріст 1,89 т/га відносно контролю ($НІР_{0,05}$ = 1,06 т/га). Використання максимальних норм обох препаратів (8 г/кг) виявилося менш ефективним – 7,12 т/га. Окреме застосування БМ-нанобіочару (4 г/кг) та Мікофренду (4 г/кг) забезпечило врожайність 7,30 і 6,99 т/га відповідно.

У середньому по досліду внесення Мікофренду в нормі 4 г/кг забезпечувало найвищий середній рівень урожайності сухої біомаси – 7,68 т/га (рис. 2). Підвищення дози до 8 г/кг зумовлювало зниження показника до 7,29 т/га, хоча він залишався вищим за варіант без обробки (6,86 т/га). Аналогічна закономірність установлена для БМ-нанобіочару: оптимальною виявилася доза 4 г/кг із середнім рівнем продуктивності 7,80 т/га, тоді як 8 г/кг забезпечувало 7,34 т/га, що істотно перевищувало контроль (6,70 т/га). Конфігурація довірчих інтервалів на графічному матеріалі свідчить про стабільність позитивного ефекту застосування помірних норм обох біопрепаратів.

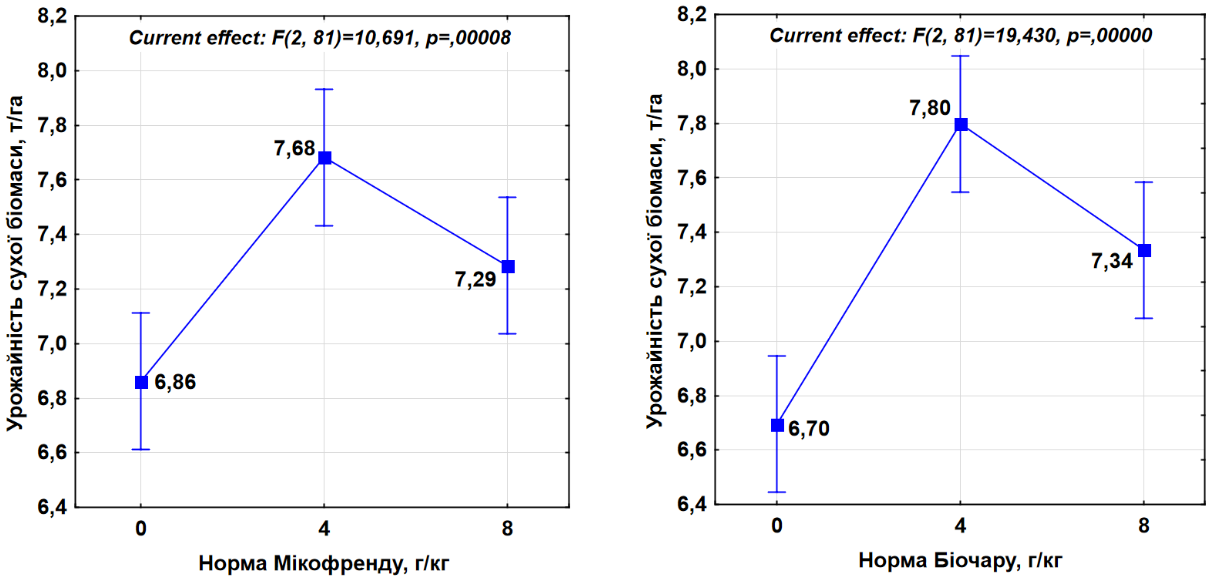


Рис. 2. Залежність урожайності сухої біомаси сорго звичайного (двокольорового) від обробки насіння біопрепаратами

Аналіз частки впливу досліджуваних факторів на формування сухої біомаси сорго звичайного (двокольорового) підтвердив провідну роль вуглецевого адсорбенту. За результатами дисперсійного аналізу найбільший внесок у загальну варіабельність ознаки забезпечував фактор В (БМ-нанобіочар) – 57,9% (рис. 3). Суттєвий вплив спостерігався також з боку фактора А (Мікофренд) – 31,8%, тоді як роль погодних умов (фактор С) була відносно незначною – 2,9%. Взаємодія факторів між собою (А × В, А × С, В × С) та їх сумісна дія мали мінімальний вплив у межах 0,7–1,9%, що свідчить про стабільну та самостійну ефективність обраних біопрепаратів незалежно від року вирощування.

Обробка насіння біопрепаратами сприяла підвищенню врожайності насіння сорго звичайного (двокольорового). У контрольному варіанті без обробки dрожайність становила 6,23 т/га (див. табл. 2). Найвищий показник – 7,41 т/га – зафіксовано за комбінованого застосування Мікофренду та БМ-нанобіочару в помірних нормах (по 4 г/кг), що забезпечило приріст 1,18 т/га порівняно з контролем ($НІР_{0,05}$ = 0,73 т/га). Самостійне застосування препаратів або збільшення їхньої норми до 8 г/кг не давало додаткового позитивного ефекту: зокрема, у варіанті з максимальною нормою обох компонентів (8 г/кг) урожайність становила 6,20 т/га, що фактично відповідало рівню контролю.

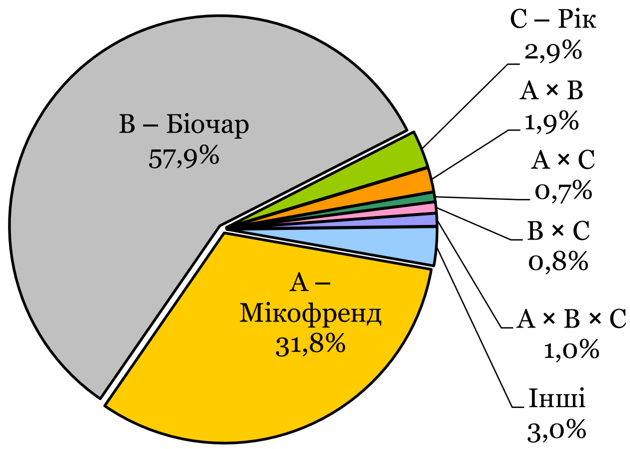


Рис. 3. Вплив факторів досліду на врожайність сухої біомаси сорго звичайного (двокольорового)

У середньому за фактором А (норма Мікофренду) найвища врожайність насіння (6,39 т/га) забезпечувалася в разі застосування препарату в нормі 4 г/кг (рис. 4). Підвищення норми до 8 г/кг зменшувало врожай до 6,14 т/га, що все ж залишалося вищим за контроль (6,04 т/га). Конфігурація довірчих інтервалів свідчить, що саме середня доза Мікофренду забезпечує найбільш стабільний та достовірний приріст урожаю на малопродуктивних ґрунтах.

За фактором В (норма БМ-нанобіочару) максимальна насіннєва продуктивність (6,45 т/га) досягається в разі застосування адсорбенту в нормі 4 г/кг. Збільшення норми до 8 г/кг знижувало врожайність до 6,19 т/га, що залишалося вищим за контрольний варіант (5,93 т/га). Розташування довірчих інтервалів підтверджує високу стабільність та достовірність позитивного ефекту БМ-нанобіочару саме в помірній нормі.

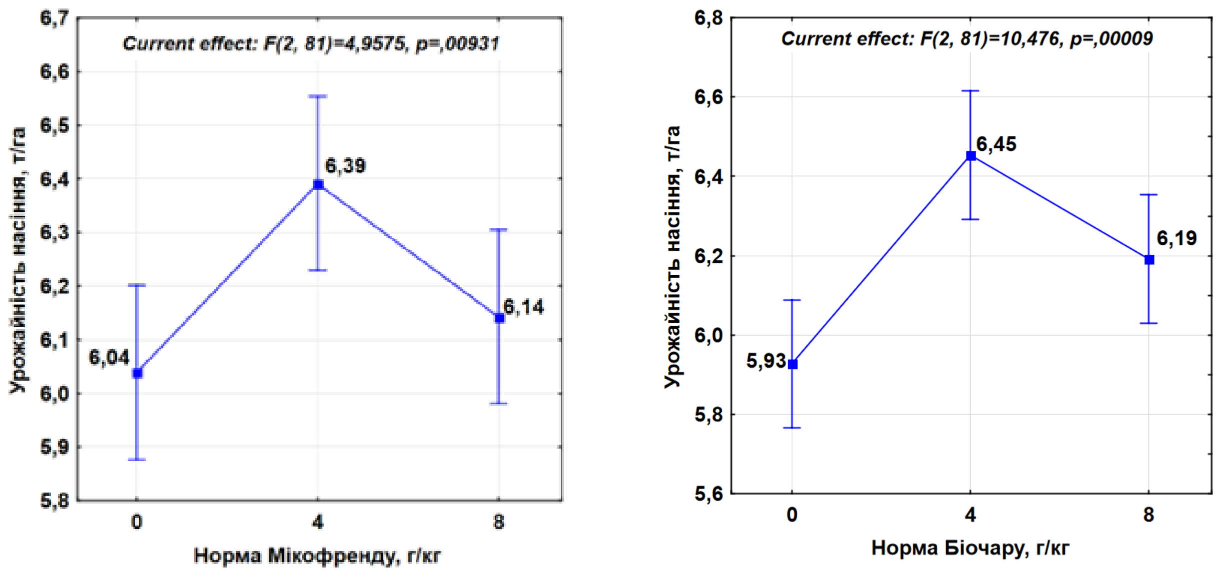


Рис. 4. Залежність врожайності насіння сорго звичайного (двокольорового) від обробки насіння біопрепаратами

Результати дисперсійного аналізу показали, що на формування насіннєвої продуктивності сорго звичайного (двокольорового) найбільший вплив мали погодні умови років вирощування (фактор С) – 35,2% (рис. 5). Важливим чинником також виявився вуглецевий адсорбент БМ-нанобіочар (фактор В) із часткою впливу 32,2%, тоді як внесок мікоризоутворювального препарату Мікофренд (фактор А) був дещо меншим – 15,2%.

Суттєву роль відіграла взаємодія мікоризації з погодними умовами (А × С), частка якої становила 7,9%, що свідчить про адаптивну дію біопрепарату за мінливих гідротермічних умов.

Інші комбінації факторів та похибка досліду мали мінімальний вплив у межах 1,2–3,1%, підтверджуючи високу достовірність отриманих результатів.

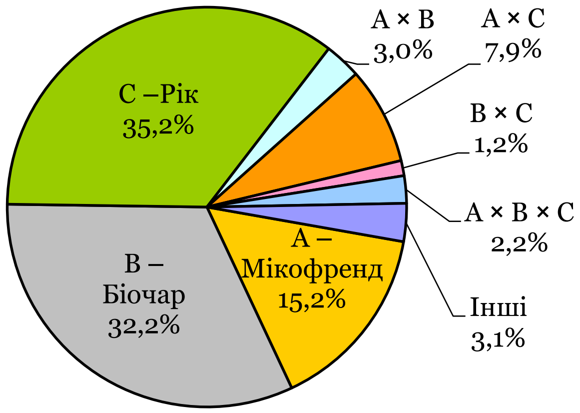


Рис. 5. Вплив факторів досліду на врожайність насіння сорго звичайного (двокольорового)

Висновки

Передпосівна обробка насіння біопрепаратами істотно покращує стартові умови розвитку сорго звичайного (двокольорового), підвищуючи польову схожість до 82,7% порівняно з контролем – 74,9%. Комплексне застосування Мікофренду та БМ-нанобіочару стимулює лінійний ріст і розвиток рослин, забезпечуючи висоту до 112,0 см та діаметр стебла – до 22,3 мм.

Максимальна продуктивність культури спостерігалася за поєднання помірних норм обох біопрепаратів (4 г/кг), що забезпечило 8,16 т/га сухої біомаси та 7,41 т/га насіння. Це відповідає достовірному приросту порівняно з контролем, де врожайність сухої маси становила 6,27 т/га, а насіння – 6,23 т/га.

Для стабільного підвищення продуктивності сорго на малопродуктивних землях (сірих лісових ґрунтах із низьким вмістом гумусу 1,86%) рекомендовано проводити передпосівну обробку насіння комбінацією Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормі 4 г на 1 кг насіння.

Список використаних джерел

1. Hossain, Md. S., Islam, Md. N., Rahman, Md. M., Mostofa, M. G., & Khan, Md. A. R. (2022). Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, *8*, Article 100300. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100300

2. Bombelli, A., Di Paola, A., Chiriacò, M. V., Perugini, L., Castaldi, S., & Valentini, R. (2019). Climate change, sustainable agriculture and food systems: The world after the Paris Agreement. In *Achieving the Sustainable Development Goals through sustainable food systems* (pp. 25–34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23969-5_2

3. Kanatas, P., Travlos, I., Gazoulis, I., Antonopoulos, N., Tataridas, A., Mpechliouli, N., & Petraki, D. (2023). Biostimulants and herbicides: A promising approach towards Green Deal implementation. *Agronomy*, *12*(12), Article 3205. https://doi.org/10.3390/agronomy12123205

4. Ivanina, V. V., Pashynska, K. L., & Smirnykh, V. M. (2021). Removal and balance of nutritional elements in the agrocenosis of sorghum for grain depending on fertilizer system. *Bulletin of Agricultural Science*, *12*(99), 28–32. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202112-03 [In Ukrainian]

5. Pravdyva, L. A., & Yalanskyi, O. V. (2022). Productivity and yield structure elements of different varieties of ordinary two-color sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Advanced Agritechnologies*, *10*(3). https://doi.org/10.47414/na.10.3.2022.270497 [In Ukrainian]

6. Pravdyva, L. A. (2022). Influence of crops mineral nutrition on the biometric indicators of grain sorghum formation. *Agrobiology*, *1*, 43–52. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-43-52 [In Ukrainian]

7. Titarenko, O. S., & Karpuk, L. M. (2022). Yield and energy efficiency of sorghum grain under different crop care measures. *Agrobiology*, *1*, 145–151. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-145-151 [In Ukrainian]

8. Ivanina, V., Ionitsoi-Dotsenko, Ye., Strilets, O., Orlov, S., Zinchenko, O., Hanzhenko, O., Khivrych, O., & Mazur, G. (2025). Effect of fertilisers on yield, water consumption and energy capacity of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Acta Agriculturae Slovenica*, *121*(1), 1–9. https://doi.org/10.14720/aas.2025. 121.1.18753

9. Hanzhenko, O. M., & Zlydennyi, I. I. (2025). Sowing qualities of sorghum seeds depending on treatment with biological preparations. *Bioenergy*, *1*, 11–14. https://doi.org/10.47414/be.2025.No1.pp11-14 [In Ukrainian]

10. Kavitha, B., Reddy, P. V. L., Kim, B., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K. H. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of Environmental Management*, *227*, 146–154. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.082

11. Panahi, H. K. S., Dehhaghi, M., Ok, Y. S., Nizami, A. S., Khoshnevisan, B., Mussatto, S. I., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Lam, S. S. (2020). A comprehensive review of engineered biochar: Production, characteristics, and environmental applications. *Journal of Cleaner Production*, *270*, Article 122462. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122462

12. Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., Shah, A., Poudel, A., Pun, A. B., Bhat, M. A., Mandal, D. L., Shah, S., Zhihao, D., Tan, Q., & Hu, C.-X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*, *84*(1), 19–37. https://doi.org/10.1007/s13199-021-00756-6

13. Smith, S. E., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, *62*, 227–250. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846

14. Auge, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, *11*(1), 3–42. https://doi.org/10.1007/s005720100097

15. Jones, D. L., Hodge, A., & Kuzyakov, Y. (2004). Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist*, *163*(3), 459–480. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01130.x

16. Smith, S. E., Jakobsen, I., Gronlund, M., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: Interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*, *156*(3), 1050–1057. https://doi.org/10.1104/pp.111.174581

17. Dymytrov, S. H., Sabluk, V. T., Tyshchenko, M. V., & Smirnykh, V. M. (2019). Mycorrhizal preparations and their symbiosis with soft winter wheat plants (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, *27*, 51–61. https://doi.org/10.47414/np.27.2019.211138 [In Ukrainian]

18. Khomenko, T., Datsko, A., & Kvasnitska, L. (2019). Influence of seed treatment with complex mycorrhizal product Mycofriend on soybean productivity in conditions of right-bank Forest-Steppe of Ukraine. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine*, *24*(38), 260–267. https://doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24(38)-27 [In Ukrainian]

19. Kulyk, I. O. (Ed.). (2020). *Catalog of varieties and hybrids of the SI Institute of Grain Crops of the NAAS of Ukraine*. SI IGC NAAS. [In Ukrainian]

20. Ermantraut, E. R., Prysiazhniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic research data in package Statistica 6.0*. PolihrafConsaltynh. [In Ukrainian]

Influence of seed treatment with biological preparations on the *Sorghum bicolor* productivity on low-fertility soils

O. M. Hanzhenko*, I. I. Zlydennyi

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

**Corresponding author: Oleksandr Hanzhenko, ganzhenko74@gmail.com*

Citation: Hanzhenko, O. M., & Zlydennyi, I. I. (2025). Influence of seed treatment with biological preparations on the *Sorghum bicolor* productivity on low-fertility soils. *Bioenergy*, *2*, 15–24. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.p15-24

Aim. To establish the patterns of *Sorghum bicolor* productivity formation under combined seed treatment with different rates of biological preparations cultivated on low-fertility soils in the zone of unstable moisture of the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine. **Methods**. Field experiments were conducted in 2023–2025 at the Yaltushkiv Experimental Breeding Station of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS (Vinnytsia region), using a two-factor design. Factor A: the mycorrhiza-forming preparation Mycofriend (0, 4, 8 g/kg), and factor B: the carbon-containing adsorbent BM-nanobiochar (0, 4, 8 g/kg). The early-maturing hybrid 'Svat' was used. Field germination, biometric parameters (tillering, plant height, stem diameter, and number of leaves), dry biomass yield, and seed yield were estimated. **Results.** Combined seed inoculation significantly stimulated the initial stages of organogenesis and subsequent yield formation. Field germination increased from 74.9% in the control to 82.7% with the combined application of both preparations at 4 g/kg (+7.8% compared with the control; $LSD_{0.05}$ = 3.6%). Enhanced growth processes were manifested in increased tillering (+36.3%), plant height (+41.0%), and stem diameter (+43.9%) compared with the control. The highest dry biomass yield (8.16 t/ha) was obtained with the combination of preparations (4 g/kg), exceeding the control (6.27 t/ha; $LSD_{0.05}$ = 1.06 t/ha) by 30.1%. Increasing the rates to 8 g/kg did not provide additional gains, indicating a dose-dependent effect with a pronounced biological optimum. A similar trend was observed for seed productivity: the maximum yield of 7.41 t/ha exceeded the control (6.23 t/ha) by 18.9% ($LSD_{0.05}$ = 0.73 t/ha). In dry biomass yield formation, the dominant factor was BM-nanobiochar (57.9%), while the contribution of Mycofriend was 31.8%. Variation in seed productivity depended most on annual weather conditions (35.2%) and BM-nanobiochar application (32.2%), highlighting the adaptive role of seed treatment under different hydrothermal regimes. **Conclusions.** An optimum application rate for combined seed treatment of sorghum (4 g/kg of each preparation) ensures statistically confirmed increases in morphostructural parameters and yield in low-fertility grey forest soils. The results demonstrate the feasibility of including the studied biological preparations in adaptive technologies for cultivating sorghum under conditions of climatic variability.

Keywords: plant height; stem diameter; tillering; nanobiochar; mycorrhiza-forming preparation; field germination; seed yield; dry biomass yield.

ORCID

Олександр Ганженко / Oleksandr Hanzhenko https://orcid.org/0000-0002-8118-1645
Ілля Злиденний / Illia Zlydennyi https://orcid.org/0009-0004-2787-2287

2025 ● № 2 ● С. 25–36
https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp25-36

Оригінальні дослідження

УДК 662.631:620.952

Ріст енергетичних плантацій верби прутоподібної за висотою залежно від агротехніки вирощування і погодних умов протягом третього трирічного циклу вирощування

Л. Г. Зелінська, **Я. Д. Фучило***

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

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

Цитування: Зелінська Л. Г., Фучило Я. Д. Ріст енергетичних плантацій верби прутоподібної за висотою залежно від агротехніки вирощування і погодних умов протягом третього трирічного циклу вирощування. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 25–36. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.p25-36

Мета. Установити особливості росту енергетичної верби в умовах Правобережного Лісостепу протягом третього трирічного циклу вегетації залежно від генотипу, норм азотного живлення, густоти та схем садіння живців, а також гідротермічних умов вегетаційного періоду. **Методи.** Дослідження проводили у 2021–2023 рр. на дослідному полі ІБКіЦБ НААН (Київська обл.). Об'єктом вивчення були сорти верби 'Tora' та 'Тернопільська'. Схема створення дослідних енергетичних плантацій – дворядними кулісами з відстанню між рядами 0,75 м, а між кулісами – 1,50 м та 2,50 м. Густота садіння рослин: 12, 15 та 18 тис. шт./га. Аміачна селітра вносилася одноразово перед початком третього циклу в нормі 35 і 70 кг/га д. р. азоту; контроль – без внесення добрив. **Результати.** Рослини сорту 'Tora' у переважній більшості варіантів досліду відзначались дещо більшими показниками висоти, порівняно із 'Тернопільська'. Максимальна їх середня висота після третього року вирощування (4,7 ± 0,24 м) зафіксована за схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м у варіанті з густотою 12 тис. шт./га та внесенням 70 кг/га д. р. азоту. За схеми 0,75 × 1,50 × 0,75 м вона теж була найбільшою за максимальної норми добрив та за найменшої початкової густоти і становила 4,5 ± 0,26 м. Середня висота плантацій сорту 'Тернопільська' після третього року найбільші показники (4,1 ± 0,17 і 4,3 ± 0,12 м) мала за аналогічних умов, що вказує на доцільність створювати в регіоні досліджень енергетичні плантації верби прутовидної з початковою густотою рослин 12 тис./га і проводити їх підживлення перед початком кожного трирічного циклу азотними добривами в нормі 70 кг д. р. на 1 га. Аналіз величин річних приростів плантацій обох досліджуваних сортів за висотою показав, що у всіх варіантах досліду максимальні показники приростів припадали на 2021 рік – перший рік третього циклу вирощування плантацій. Їх частка становила від 43,2 до 64,5% від загальної висоти трирічних рослин, тоді як у наступні два роки прирости становили лише від 9,1 до 37,8%. Причина цього – достатнє зволоження ґрунту у 2021 році (ГТК = 1,16), тоді як 2022 і 2023 роки були слабкопосушливі (ГТК – 0,96 і 0,88 відповідно), що негативно позначилось на річних приростах досліджуваних сортів у ці роки. Це вказує на важливе значення зволоження ґрунту для забезпечення успішного росту енергетичних плантацій верби, що необхідно враховувати при їх вирощуванні. **Висновки.** Протягом третього трирічного циклу вирощування енергетичних плантацій верби на вилугуваному чорноземі Правобережного Лісостепу на їх висоту і річний приріст за висотою визначальний вплив мають погодні умови вегетації, а також застосовані агротехнічні заходи, зокрема – сортові особливості, внесення азотних добрив і початкова густота насаджень. Вплив схеми садіння на показники росту протягом третього циклу вирощування достовірно не проявлявся.

Ключові слова: біоенергетика; енергетична плантація верби; сорт; біомаса; технології вирощування; норми внесення добрив; погодні умови вегетаційного періоду.

Одержано 15.09.2025 ● **Погоджено** 24.11.2025 ● **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

Вступ

У сучасних умовах надшвидкого розвитку суспільства питання енергетичних ресурсів гостро постає не лише перед економікою України, а й у світовому масштабі. Основні проблеми використання традиційних викопних джерел енергії пов'язані з їх обмеженістю та непоновністю. Науковці застерігають, що запаси таких ресурсів є кінцевими, і за відсутності своєчасних рішень уже впродовж наступних пів століття людство може опинитися в умовах глобальної енергетичної кризи [1]. Ще однією серйозною проблемою є глобальні кліматичні зміни. Антропогенний вплив на довкілля, зокрема спалювання викопного палива, спричиняє деградацію екосистем, погіршення стану ґрунтів і водних ресурсів. Під час використання природного газу, нафти та кам'яного вугілля в атмосферу надходять значні обсяги парникових газів, насамперед діоксиду вуглецю, що посилює парниковий ефект і призводить до підвищення температури навколишнього середовища [2].

Для України зазначена проблематика додатково ускладнюється наслідками військових дій, зокрема руйнуванням енергетичної інфраструктури та залежністю держави від імпортних енергоносіїв. Це зумовлює необхідність активного розвитку власних поновних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів є біоенергетика, зокрема вирощування фітомаси біоенергетичних рослин. Для умов України найбільш перспективними культурами є верби, міскантус і тополі. За генетичним різноманіттям особливий інтерес становить рід *Salix* L. – верба. У біоенергетичній сфері переважно використовують вербу прутоподібну (*S. viminalis* L.) та її похідні, які характеризуються високим потенціалом продуктивності, здатністю до багаторазового відростання після зрізування, швидкими темпами росту та широкою адаптивністю до різних ґрунтово-кліматичних умов. Вагомою конкурентною перевагою верби як біоенергетичної культури є можливість її вирощування на малопродуктивних і деградованих землях, непридатних для вирощування сільськогосподарських культур [3, 4].

Окрім енергетичного використання біомаси, верба виконує низку важливих екологічних функцій, зокрема поліпшує структуру ґрунту, сприяє зменшенню викидів парникових газів, стабілізує водний режим і забезпечує фіторемедіацію забруднених територій. Це особливо актуально в умовах зростання рівня забруднення довкілля важкими металами та іншими токсичними речовинами внаслідок військових дій. Вирощування енергетичної верби також має суттєве соціально-економічне значення, сприяє розвитку сільських територіальних громад, створенню нових робочих місць і підвищенню енергетичної автономії регіонів [5, 6].

У зв'язку з цим дослідження агробіологічних особливостей вирощування енергетичної верби є науково та практично обґрунтованим напрямом і відповідає актуальним тенденціям сталого розвитку та стратегічним потребам України у сфері відновлюваних джерел енергії [7].

Енергетична верба характеризується високою теплотворною здатністю та відносно низьким вмістом шкідливих речовин, що утворюються під час згоряння, при цьому викиди діоксиду вуглецю компенсуються в процесі росту рослин. Теплота згоряння 1 г сухої речовини становить 17,16–18,42 кДж [8]. Середня врожайність за трирічний цикл вирощування сягає 40–50 т/га сухої речовини залежно від погодних умов, сорту верби та технології вирощування. Така кількість біомаси є еквівалентною 14 т кам'яного вугілля, 10 т природного газу (14 тис. м^3) або 38 т торфу за вологості 40% [8–10]. Після зрізування пагони верби здатні до повторного відростання, а експлуатація плантацій із мінімальними затратами на догляд можлива впродовж 25–30 років [10].

Оскільки плантації енергетичної верби зазвичай закладають на землях, непридатних для вирощування сільськогосподарських культур, для забезпечення високої продуктивності виникає потреба у своєчасному та раціональному внесенні добрив відповідно до агротехнічних вимог. Збалансоване удобрення є одним із ключових чинників підвищення врожайності верби. Особливе значення мають азотні добрива, які активізують фотосинтетичну діяльність рослин і процеси наростання пагонів.

Актуальність цієї тематики підтверджується результатами досліджень вітчизняних і зарубіжних науковців, присвячених вивченню впливу добрив на ріст і розвиток енергетичної верби. Лис Н. М. та Ткачук Н. Л. [11], досліджуючи плантації верби на дерново-опідзолених середньосуглинкових ґрунтах, установили, що в перші роки вирощування інтенсивність росту істотно залежить від площі живлення та внесення мінеральних добрив. За умов удобрення споcтерігалося підвищення врожайності на 6,5–12,3%. За результатами досліджень І. В. Гнап та В. М. Сінченка [12] з'ясовано, що промислове вирощування енергетичної верби потребує обов'язкового застосування мінеральних добрив. Для забезпечення росту рослин до 2 м у перший рік вміст азоту в орному шарі ґрунту має становити не менше ніж 100–150 мг/кг за Корнфілдом. Дослідження, проведені на плантаціях Правобережного Лісостепу на вилугуваних чорноземах, засвідчили ефективність застосування аміачної селітри в нормі 200 кг/га [13].

Вагомий внесок у вивчення впливу азотних добрив на ріст і продуктивність енергетичних плантацій верби зробили зарубіжні науковці. Особливу цінність мають результати, що підтверджують здатність азоту посилювати процеси фіторемедіації завдяки стимулюванню росту рослин і поглинанню ними важких металів [14]. Це має важливе значення для України та світу загалом, оскільки такі підходи не лише розширюють можливості фіторемедіації, а й дають змогу суттєво прискорити ці процеси. Дослідження, проведені у Данії та Швеції, підтверджують чіткий позитивний вплив удобрення на врожайність сухої біомаси верби [10, 15].

Мета дослідження – установити особливості росту енергетичних плантацій верби Правобережного Лісостепу впродовж третього трирічного циклу вирощування залежно від сортових особливостей, внесення азотних добрив, густоти садіння та погодних умов.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження проводили на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (с. Ксаверівка Друга, Київська обл.), яке розташоване в зоні нестійкого зволоження центральної частини Правобережного Лісостепу України. Дослідження виконували протягом третьої трирічної ротації у 2021–2023 рр.

У досліді було використано два сорти енергетичної верби – 'Tora' та 'Тернопільська'. 'Tora' (*S. schwerinii* × *S. viminalis*) – високопродуктивний гібрид шведської селекції, стійкий до несприятливих умов вирощування та ураження шкідниками, характеризується гнучкими й міцними пагонами та використовується для біоенергетичних потреб з 1996 року [16]. 'Тернопільська' – сорт верби прутоподібної української селекції, створений у 2003 році, який широко застосовується як біоенергетична культура [9].

Досліджувану енергетичну плантацію було закладено навесні 2015 року із застосуванням двох схем садіння: 0,75 × 1,50 × 0,75 м та 0,75 × 2,50 × 0,75 м, а також трьох варіантів густоти стояння рослин – 12, 15 і 18 тис. шт./га. Площа дослідної ділянки становила 100 м^2, облікової – 50 м^2, повторюваність досліду – триразова.

Підживлення азотними добривами (аміачна селітра, 34,5% д. р. азоту) здійснювали у березні 2021 року перед початком вегетації із загортанням добрив у ґрунт за допомогою культиватора Oleo-Mac MH198RKS. У досліді передбачали такі норми внесення добрив:

1. без внесення добрив (контроль);
2. N_{35} – 100 кг/га аміачної селітри;
3. N_{70} – 200 кг/га аміачної селітри.

Ґрунт дослідної ділянки – малогумусний середньосуглинковий грубопилуватий чорнозем з умістом гумусу 3,05% та реакцією ґрунтового розчину pH 6,5.

Період досліджень характеризувався підвищеним температурним режимом порівняно із середніми багаторічними показниками. Середня багаторічна температура повітря для регіону становить 7,5 °C, тоді як у роки досліджень її значення були вищими: у 2021 році – 8,7 °C, у 2022-му – 10,4 °C, у 2023-му – 10,2 °C. Найспекотнішим виявився 2022 рік, у якому зафіксовано найвищу середньомісячну температуру повітря в серпні – 24,5 °C (рис. 1). Крім того, у 2022 році спостерігалися найвищі показники середньомісячної температури повітря у квітні (9,4 °C) та червні (21,4 °C).

2021 рік за температурним режимом був найближчим до середніх багаторічних значень: у квітні – травні температура повітря була навіть нижчою за норму, проте впродовж літніх місяців істотно її перевищувала, а в липні досягла максимального серед усіх років досліджень значення – 23,0 °C.

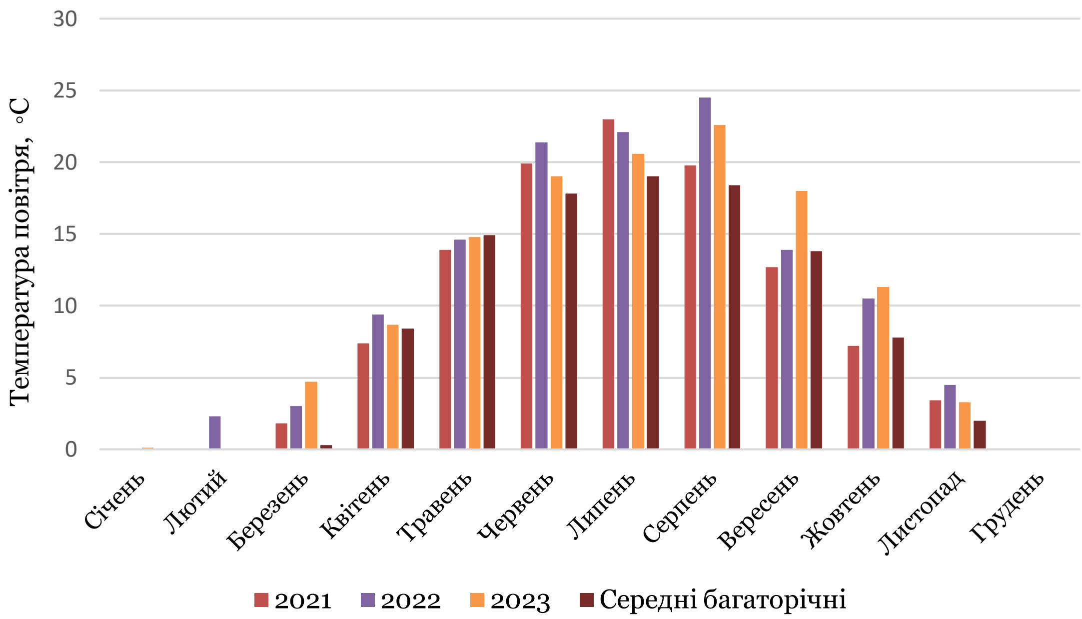


Рис. 1. Середньомісячна температура повітря впродовж років досліджень

Упродовж 2021 року зафіксовано найбільшу кількість атмосферних опадів – 543,8 мм, що дещо перевищувало середні багаторічні показники для регіону досліджень (526 мм). У наступні два роки кількість опадів була меншою за середні багаторічні значення і становила відповідно 471,2 мм у 2022 році та 488,8 мм у 2023-му (рис. 2).

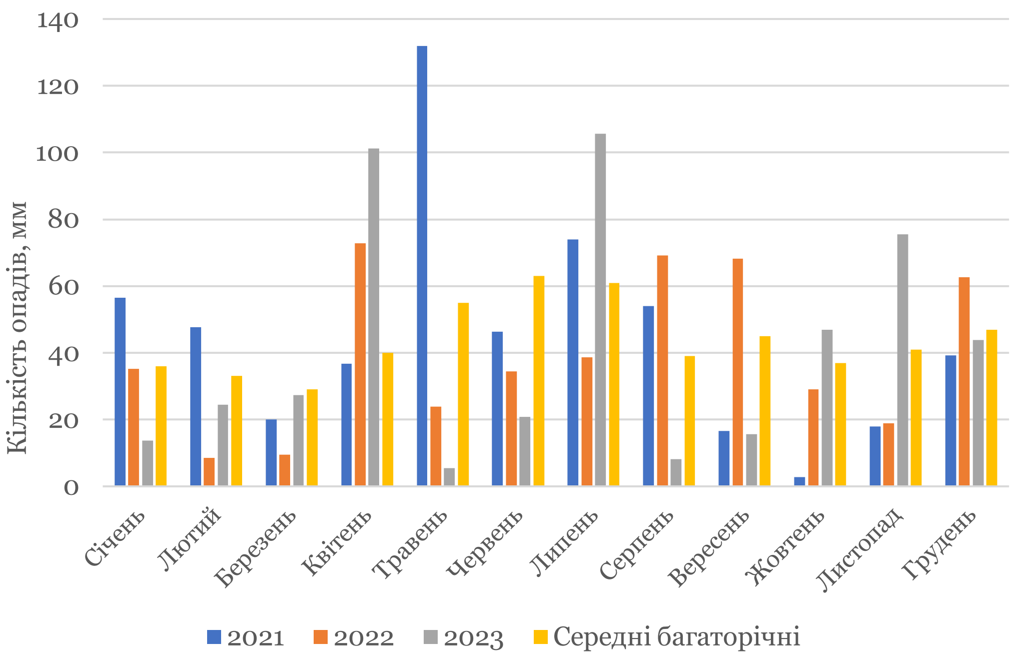


Рис. 2. Середньомісячна кількість опадів упродовж років дослідження

Найбільшу місячну кількість атмосферних опадів за період досліджень зафіксовано у травні 2021 року – 132 мм. Також істотне перевищення середньомісячної норми опадів спостерігалося у травні та липні 2023 року – 101,3 і 105,6 мм відповідно. Значна кількість опадів упродовж вегетаційного періоду 2021 року позитивно вплинула на умови росту рослин верби, що підтверджується показниками гідротермічного коефіцієнта зволоження (ГТК).

Гідротермічний коефіцієнт визначали як відношення кількості опадів за період із середньодобовою температурою повітря понад +10 °C до суми активних температур за той самий період, зменшене вдесятеро [17]. Оцінювання погодних умов за значеннями ГТК (табл. 1) засвідчило, що у 2021 році впродовж вегетаційного періоду формувалися умови достатнього зволоження, оскільки значення коефіцієнта становило 1,16.

Таблиця 1. Гідротермічний коефіцієнт упродовж років дослідження

Рік	Місяці							За вегетацію
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
2021	1,67	3,17	0,77	1,07	0,91	0,45	0,14	1,16
2022	2,59	0,55	0,54	0,59	0,94	1,63	0,92	0,96
2023	3,87	0,11	0,37	1,72	0,12	0,30	1,39	0,88
Сер. багаторічне	1,59	1,23	1,18	1,07	0,71	1,09	1,58	1,13

В інші роки досліджень погодні умови впродовж вегетаційного періоду характеризувалися як слабкопосушливі: у 2022 році значення гідротермічного коефіцієнта становило 0,96, а у 2023-му – 0,88.

У 2021 році квітень, травень і липень формувалися в умовах достатнього зволоження, тоді як червень і серпень характеризувалися як слабкопосушливі, а вересень і жовтень – як сильно посушливі. У 2022 році травень, червень і липень були сильно посушливими, серпень – слабкопосушливим, тоді як у вересні й жовтні відзначалися умови достатнього зволоження. У 2023 році перша половина вегетаційного періоду (квітень – липень) характеризувалася підвищеним зволоженням (ГТК = 1,49), тоді як друга половина (серпень – жовтень) була середньосухою (ГТК = 0,60).

Отже, у роки проведення досліджень погодні умови відзначалися нерівномірним розподілом атмосферних опадів упродовж вегетаційного періоду та підвищеним температурним режимом, що перевищував середні багаторічні показники.

На дослідних енергетичних плантаціях верби збирання врожаю біомаси, сформованої протягом другого трирічного циклу вирощування, проводили навесні 2021 року до початку вегетації. Після цього в міжряддя вносили аміачну селітру відповідно до схеми, наведеної вище. До та після внесення добрив здійснювали культивацію міжрядь. На початку літа проводили хімічний захист від бур'янів із застосуванням препаратів на основі діючих речовин пропізохлору (360 г/л) і тербутилазину (190 г/л), а також виконували два додаткові механічні обробітки ґрунту з метою контролювання забур'яненості.

Під час досліджень застосовували традиційні емпіричні методи [5]. Вимірювання висоти пагонів здійснювали мірною рейкою з точністю до 1 см. Статистичну обробку отриманих експериментальних даних проводили з використанням програмного пакета Statistica 6.0.

Результати дослідження

Установлено, що на інтенсивність росту рослин досліджуваних сортів верби за висотою істотно впливали як внесення азотних добрив, так і густота садіння (рис. 3–6).

Найінтенсивніший ріст рослин на всіх варіантах досліду спостерігався протягом першого року вегетації. Рослини сорту 'Tora' характеризувалися вищими показниками висоти порівняно із сортом 'Тернопільська'. Водночас виявлено тенденцію до збільшення висоти рослин за зменшення густоти стояння плантацій і підвищення норми внесення азотних добрив.

За схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м найбільшу висоту однорічних пагонів сорту 'Tora' (2,8 м) зафіксовано у варіанті з густотою 12 тис. шт./га та внесенням максимальної норми добрив (N_{70}), тоді як у варіанті без внесення добрив середня висота становила 1,8 м (рис. 3). У наступні роки досліджень зазначена закономірність зберігалася, і після третього року вирощування максимальну висоту рослин (4,5 ± 0,26 м) також відмічено у варіанті з густотою 12 тис. шт./га та внесенням N_{70}.

За використання схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м середня висота рослин сорту 'Tora' суттєво не відрізнялася від показників, отриманих за схеми 0,75 × 1,50 × 0,75 м. Аналогічно, найвищі рослини сформувалися у варіанті з густотою садіння 12 тис. шт./га та внесенням максимальної дози азоту, де середня висота становила 4,7 ± 0,24 м (рис. 4).

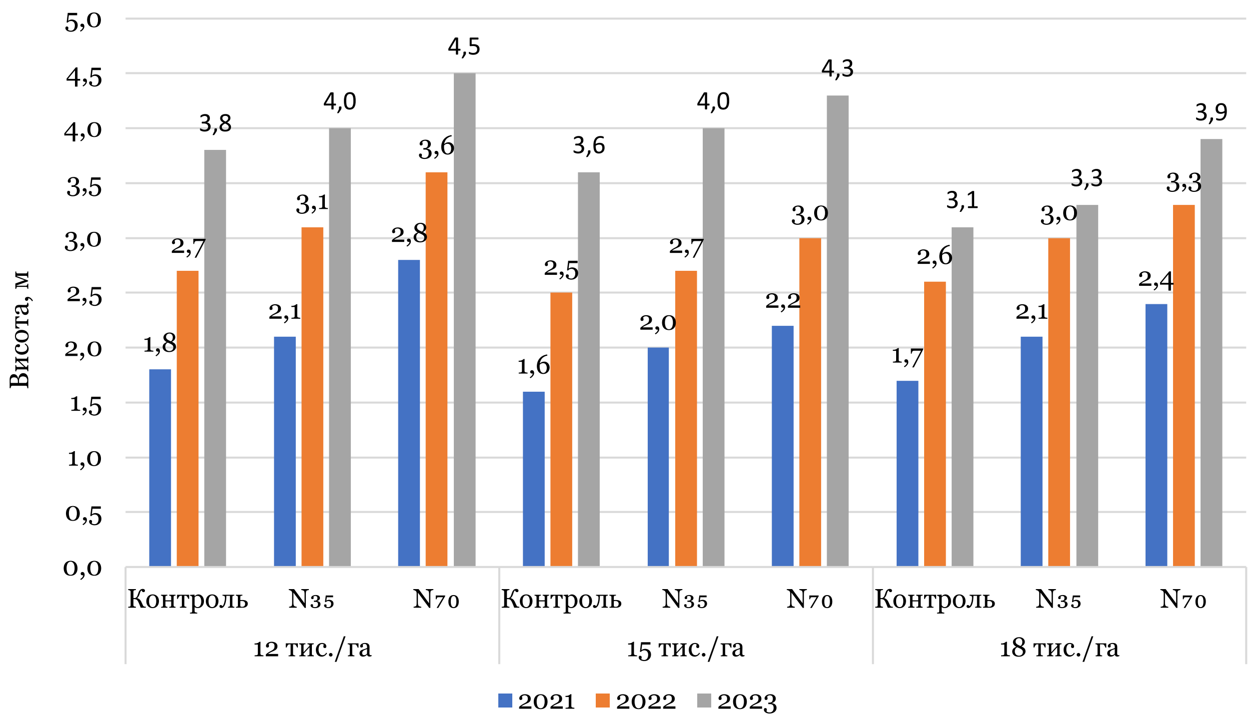


Рис. 3. Ріст енергетичних плантацій сорту 'Tora' за висотою протягом третього трирічного циклу вирощування за схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти і внесення азотних добрив

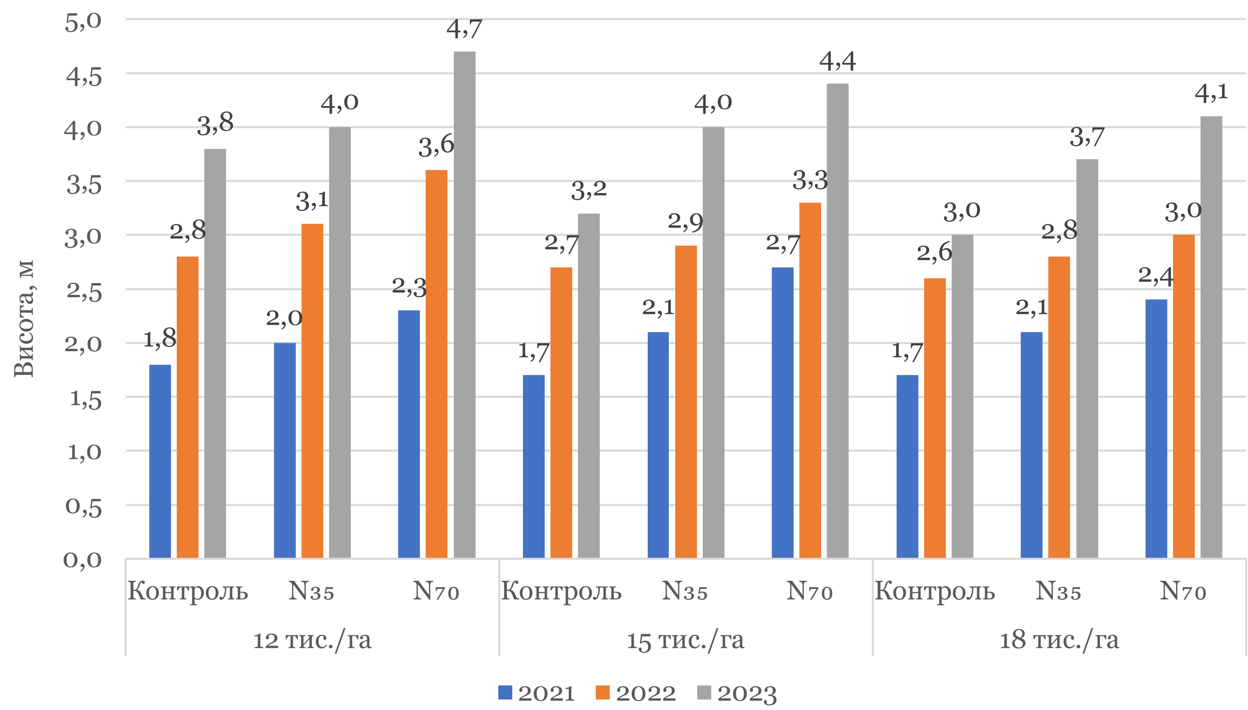


Рис. 4. Ріст енергетичних плантацій сорту 'Tora' за висотою протягом третього трирічного циклу вирощування за схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти і внесення азотних добрив

Як уже зазначалося, сорт 'Тернопільська' характеризувався дещо нижчими показниками середньої висоти рослин порівняно із 'Tora'. Водночас для нього спостерігалися аналогічні залежності між темпами росту, нормами внесення азотних добрив та густотою насаджень культури (рис. 5, 6).

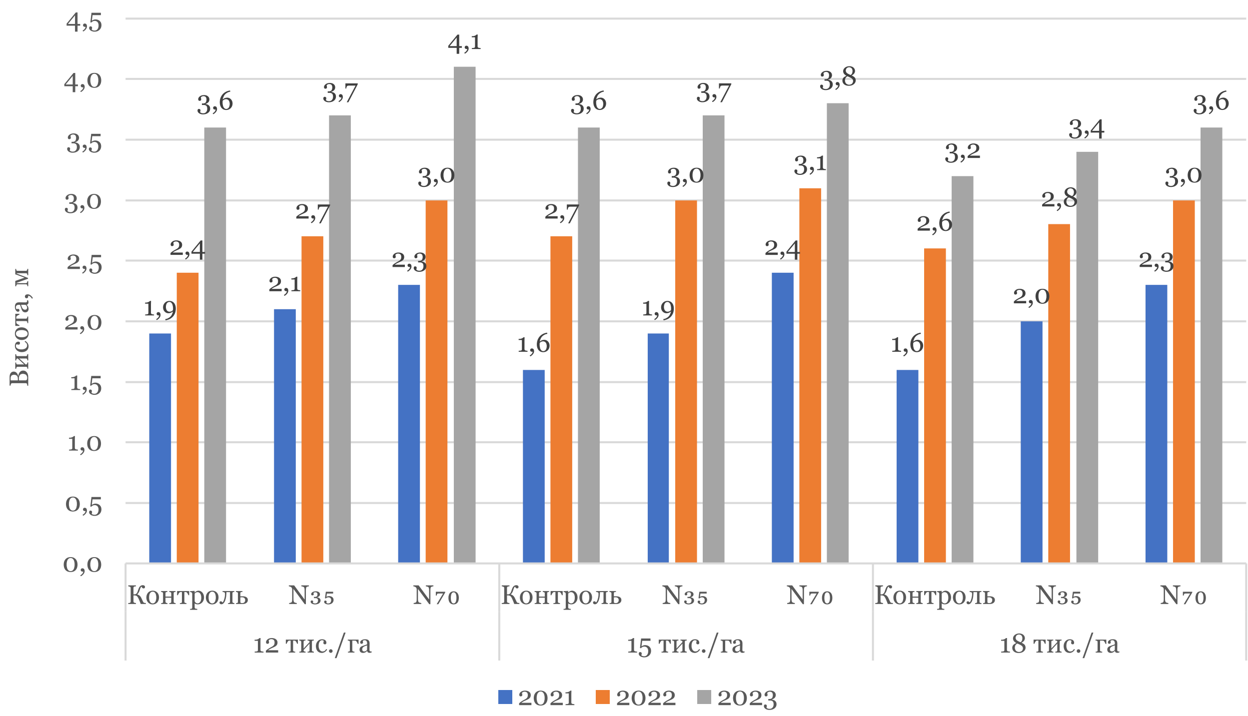


Рис. 5. Ріст енергетичних плантацій сорту ‘Тернопільська’ за висотою протягом третього трирічного циклу вирощування за схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти і внесення азотних добрив

Найбільшу середню висоту за схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м після третього року вирощування також демонстрував варіант із внесенням N_{70} та густотою 12 тис. шт./га – 4,1 ± 0,17 м (рис. 5). За схеми 0,75 × 2,50 × 0,75 м у тому ж варіанті середня висота рослин сорту ‘Тернопільська’ становила 4,3 ± 0,12 м (рис. 6).

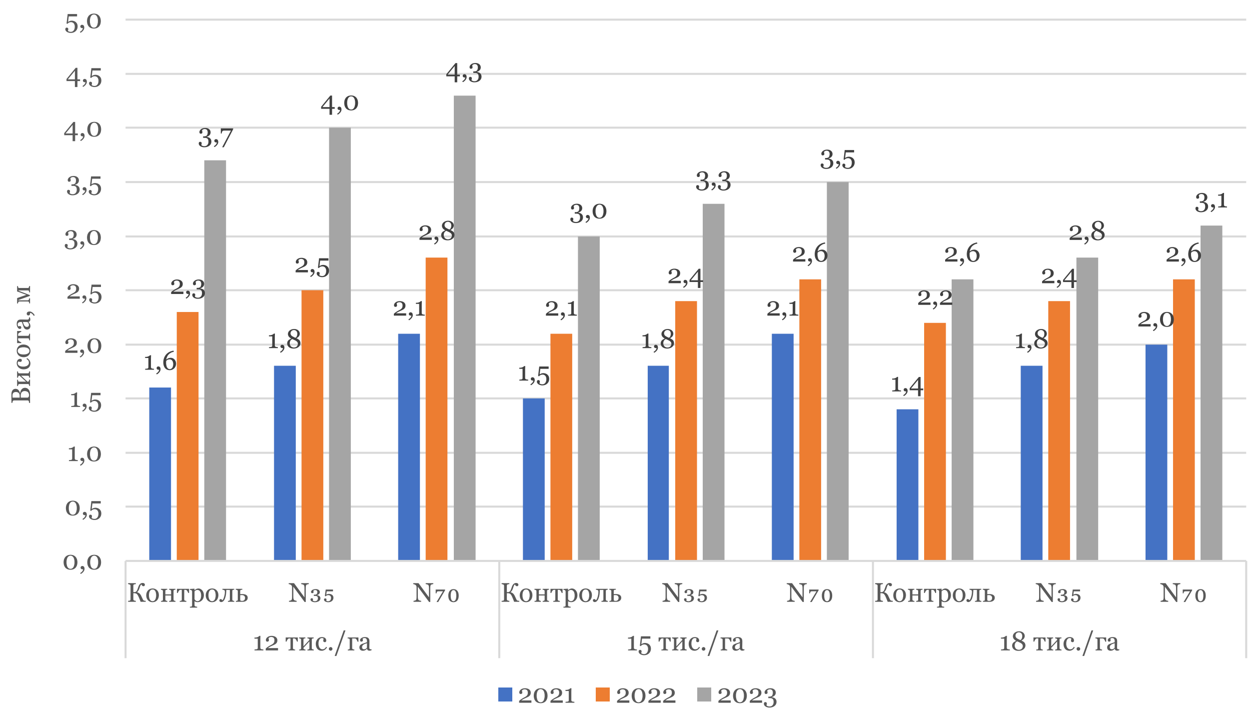


Рис. 6. Ріст енергетичних плантацій сорту ‘Тернопільська’ за висотою протягом третього трирічного циклу вирощування за схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти і внесення азотних добрив

Отже, проведені дослідження засвідчили, що внесення азотних добрив та оптимальна густота садіння суттєво сприяють підвищенню висоти рослин досліджуваних сортів верби прутоподібної.

Окрім внесення добрив та густоти садіння, на інтенсивність росту плантацій значний вплив мають погодні умови вегетаційного періоду, що безпосередньо відображається у величинах річних приростів рослин досліджуваних сортів (рис. 7–10).

Як видно з наведених даних, приріст за висотою протягом першого року третього трирічного циклу у обох сортів верби прутоподібної та за всіх варіантів агротехнічних заходів значно перевищував прирости наступних двох років. Це, ймовірно, зумовлено найбільш сприятливими погодними умовами для інтенсивного росту сільськогосподарських і енергетичних культур у вегетаційний період 2021 року (табл. 1), коли показник гідротермічного коефіцієнта становив 1,16, що відповідає умовам достатнього зволоження. У наступні два роки досліджень погодні умови характеризувалися як слабкопосушливі, що негативно вплинуло на річні прирости досліджуваних сортів.

Зокрема, згідно з даними рисунка 7, річний приріст у 2021 році рослин сорту 'Tora' за схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м на контрольних варіантах становив у перший рік 160–180 см (44,4–54,8%), у другий рік – 90 см (23,7–29,0%), а в третій рік – 50–110 см (16,2–30,6%).

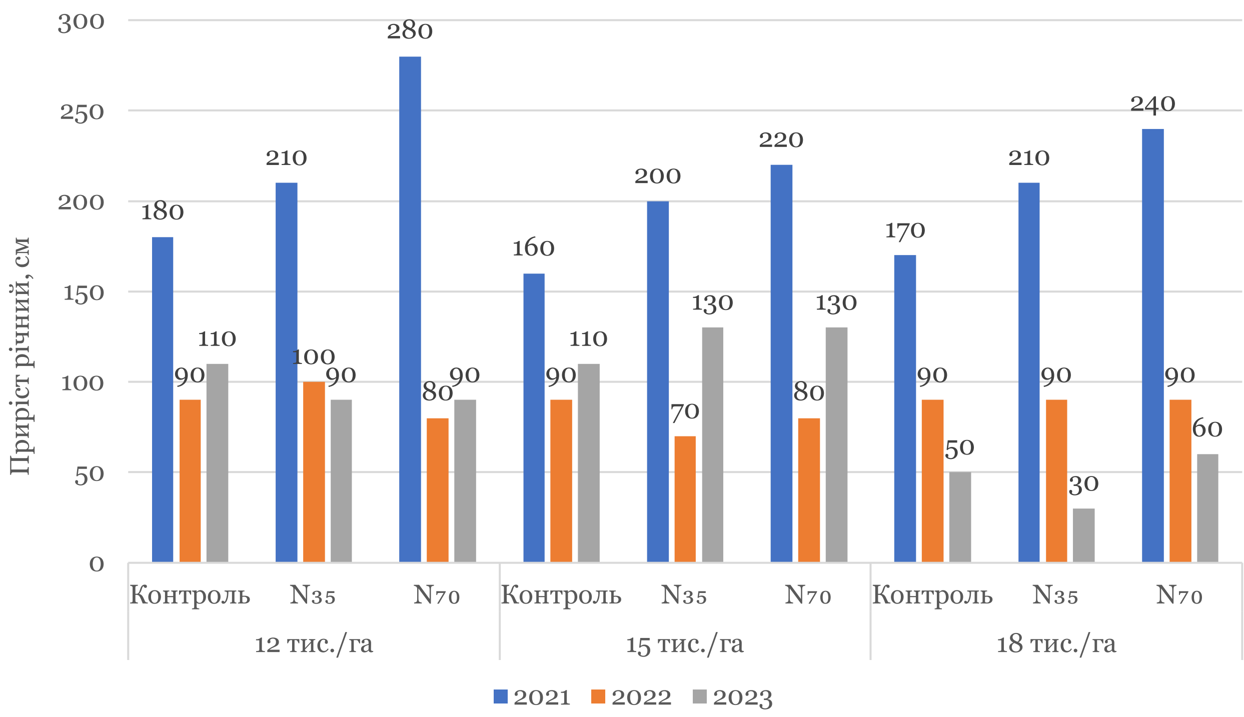


Рис. 7. Річний приріст рослин сорту 'Tora' за висотою за схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти, внесення азотних добрив та погодних умов періоду вегетації

Внесення азотних добрив справило суттєвий позитивний вплив на річний приріст у перший рік. За норми 35 кг/га д. р. азоту приріст першого року становив 200–210 см (50,0–63,6%), а за максимальної норми добрив (N_{70}) – 220–280 см (51,2–62,2%).

У наступні два роки річні прирости були значно меншими порівняно з першим роком (30–130 см), при цьому практично не спостерігалося впливу внесення добрив та густоти насаджень на ріст рослин. Крім менш сприятливих погодних умов, це можна частково пояснити відсутністю внесення добрив у ці роки. Водночас, як показують дані контрольних варіантів, де добрива не вносилися взагалі, визначальним фактором росту рослин верби залишаються умови зволоження.

За використання схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м для сорту 'Tora' спостерігалася аналогічна тенденція (рис. 8).

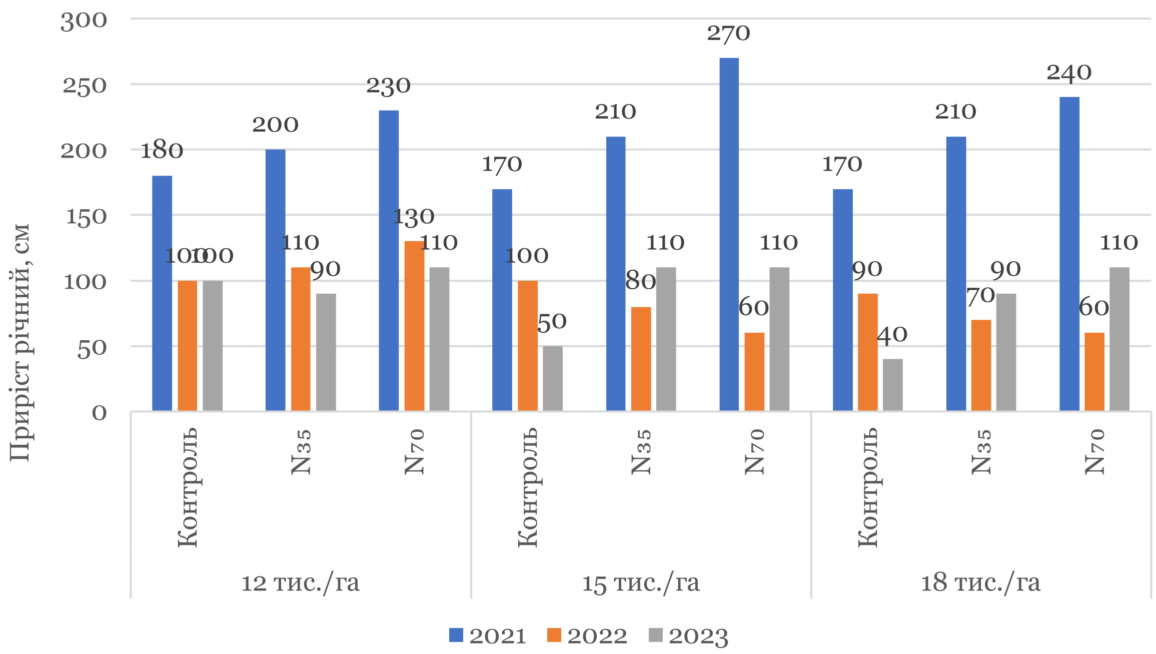


Рис. 8. Річний приріст рослин сорту 'Tora' за висотою за схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти, внесення азотних добрив та погодних умов періоду вегетації

Річний приріст на контрольних варіантах у перший рік становив 170–180 см (47,4–56,7%), у другий рік – 60–130 см (26,3–31,3%), а в третій – 40–110 см (13,3–26,3%). Внесення азотних добрив у перший рік сприяло значному підвищенню річного приросту: за норми 35 кг/га д. р. азоту приріст становив 200–210 см (50,0–56,8%), а за 70 кг/га – 230–270 см (48,9–61,4%). У 2022–2023 роках прирости за висотою були значно меншими (40–130 см), при цьому помітної залежності ростових характеристик від впливу агротехнічних заходів та погодних умов не спостерігалося.

Отже, за досліджуваний період річний приріст насаджень сорту 'Tora' становив у перший рік 44,4–62,2%, у другий – 13,6–31,3%, а у третій – 9,1–30,6%.

Річний приріст висоти плантацій сорту 'Тернопільська' в цілому був дещо меншим порівняно з сортом 'Tora', проте співвідношення між приростами та агротехнічними й природними чинниками залишалося подібним. Зокрема, за використання схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м річний приріст у перший рік на всіх варіантах досліду був значно вищим, ніж у наступні роки (рис. 9).

На контрольних ділянках річний приріст сорту 'Тернопільська' у перший рік становив 160–190 см (44,4–52,8%), із максимальними показниками за найменшої густоти садіння. На варіантах із внесенням 35 кг/га д. р. азоту приріст становив 190–210 см (51,4–58,8%), а за внесення 70 кг/га д. р. азоту – 230–240 см (56,1–63,9%), що свідчить про високу ефективність удобрення плантацій досліджуваних сортів на вилугуваних чорноземах у нормі 70 кг/га д. р. азоту.

Протягом наступних двох років, коли азотні добрива не вносилися, а погодні умови були посушливими, річні прирости насаджень сорту 'Тернопільська', як і сорту 'Tora', були значно нижчими – 50–110 см (16,7–33,3%). При цьому також не спостерігалася залежність між показниками річного приросту та застосованими агротехнічними заходами.

За схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м прирости першого року були дещо меншими, ніж у варіанті з відстанню між рядками 1,50 м (рис. 10). Зокрема, на контрольних ділянках приріст становив 140–160 см (43,2–53,8%), за внесення 35 кг/га д. р. азоту – 180 см (45,0–64,3%), незалежно від початкової густоти плантацій, а за максимального удобрення (N_{70}) – 200–210 см (48,8–64,5%).

У другий та третій роки річний приріст висоти насаджень сорту 'Тернопільська' коливався від 40 до 150 см (14,3–37,8%). При цьому практично не спостерігалося залежності величини приросту від внесення добрив, тоді як прослідковувалася обернена залежність річного приросту від початкової густоти плантацій.

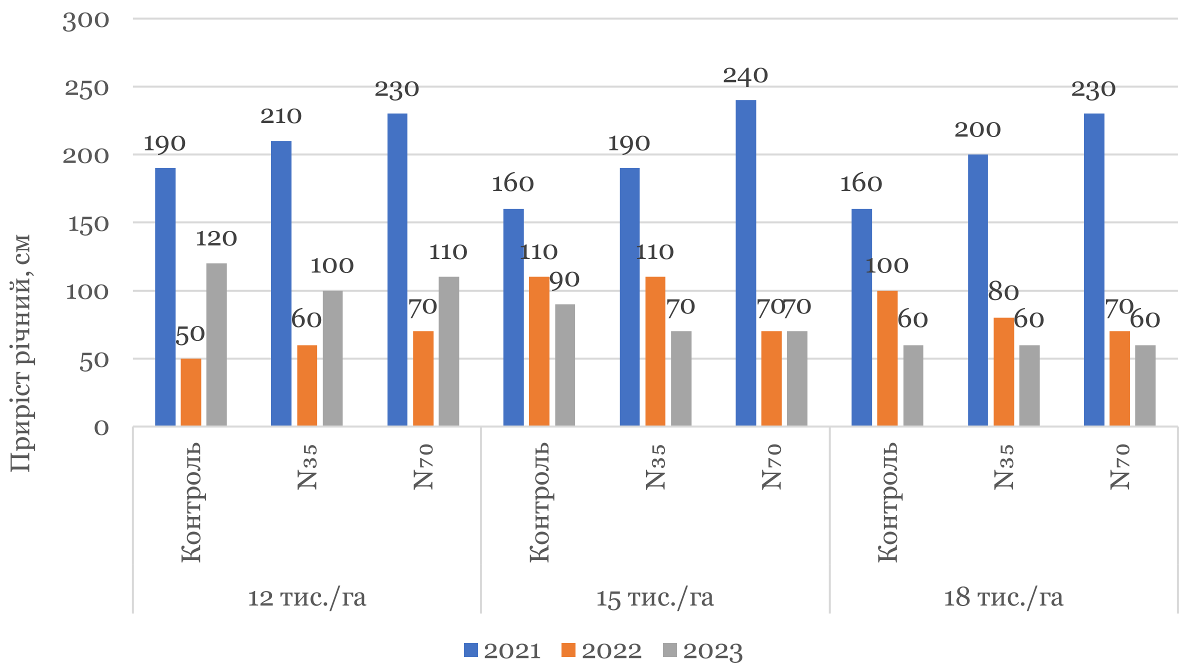


Рис. 9. Річний приріст рослин сорту 'Тернопільська' за висотою за схеми садіння 0,75 × 1,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти, внесення азотних добрив та погодних умов періоду вегетації

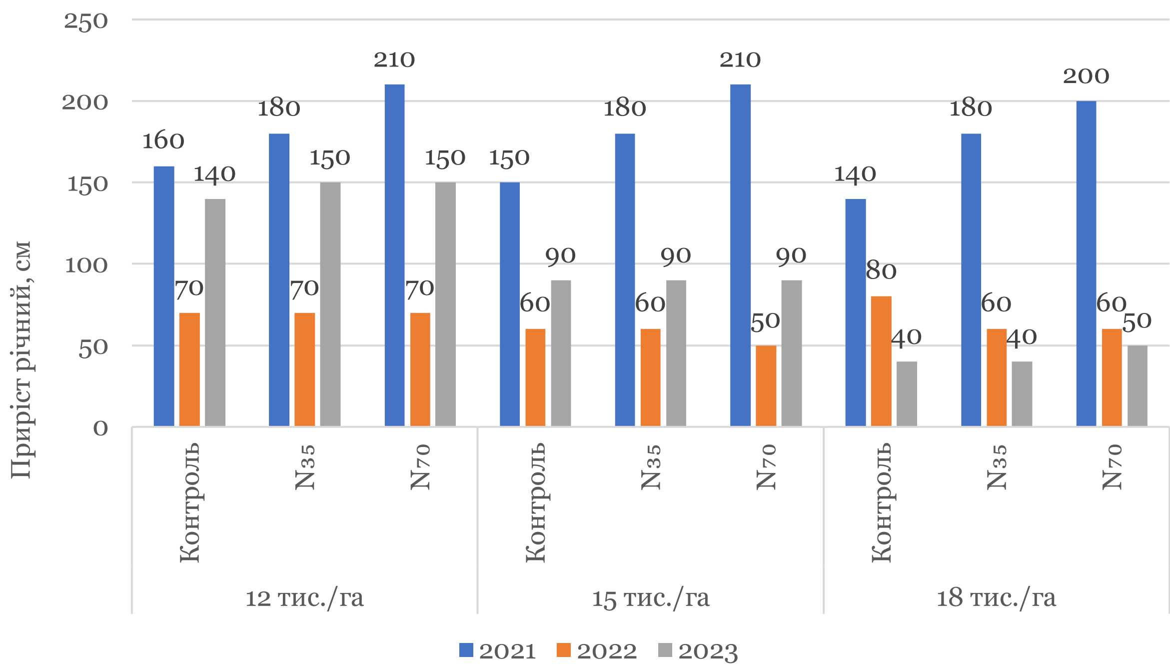


Рис. 10. Річний приріст рослин сорту 'Тернопільська' за висотою за схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м залежно від початкової густоти, внесення азотних добрив та погодних умов періоду вегетації

Висновки

Протягом третього трирічного циклу вирощування енергетичних плантацій верби на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу на висоту рослин та річний приріст за висотою визначальний вплив мають погодні умови вегетаційного періоду, а також застосовані агротехнічні заходи, зокрема сортові особливості, внесення азотних добрив і початкова густота насаджень. Вплив схеми садіння на показники росту протягом третього циклу достовірно не проявлявся.

Рослини сорту ‘Tora’ у більшості варіантів досліду відзначалися дещо більшими показниками висоти порівняно з ‘Тернопільська’. Найбільша середня висота рослин ‘Tora’ після третього року вирощування була за схеми садіння 0,75 × 2,50 × 0,75 м у варіанті з густотою 12 тис. шт./га та внесенням 70 кг/га д. р. азоту і становила 4,7 ± 0,24 м. За схеми 0,75 × 1,50 × 0,75 м максимальна висота також спостерігалася за максимальної норми добрив та найменшої початкової густоти – 4,5 ± 0,26 м. Середня висота плантацій сорту ‘Тернопільська’ після третього року за аналогічних умов становила 4,1 ± 0,17 м і 4,3 ± 0,12 м, що підтверджує доцільність створення в регіоні досліджень енергетичних плантацій верби прутоподібної початковою густотою 12 тис./га та проведення підживлення перед початком кожного трирічного циклу азотними добривами в нормі 70 кг д. р. на 1 га.

Аналіз величин річних приростів плантацій обох сортів показав, що максимальні прирости припадали на 2021 рік – перший рік третього циклу. Їх частка становила від 43,2 до 64,5% від загальної висоти трирічних рослин, тоді як у наступні два роки прирости були значно нижчими – від 9,1 до 37,8%. Основною причиною цього було достатнє зволоження ґрунту у 2021 році (ГТК = 1,16), тоді як 2022 та 2023 роки характеризувалися слабкою посушливістю (ГТК 0,96 і 0,88 відповідно), що негативно вплинуло на річні прирости.

Отже, результати досліджень підкреслюють важливе значення зволоження ґрунту для забезпечення успішного росту енергетичних плантацій верби, що необхідно враховувати за їх вирощування.

Список використаних джерел

1. Ediger, V. Ş. (2025). Leaving no one behind: just energy transition of fossil fuel-producing countries. *Frontiers in Political Science*, *7*, Article 1536594. https://doi.org/10.3389/fpos.2025.1536594

2. Hefner, M., Marland, G., & Oda, T. (2024). The changing mix of fossil fuels used and the related evolution of CO_2 emissions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *29*(6), Article 52. https://doi.org/10.1007/s11027-024-10149-x

3. Humentyk, M. Ya. (Ed.). (2024). *Technology of growing bioenergy crops*. Komprynt. [In Ukrainian]

4. Fuchylo, Ya. D., Zelinskyi, B. V., Ivaniuk, I. D., & Zelinska, L. H. (2023). *Growing energy plantations of willow on marginal lands of Kyiv Polissia*. NOVOgrad. [In Ukrainian]

5. Sinchenko, V. M. (Ed.). (2018). *Methodology for the study of energy willow and poplar plantations*. Komprynt. [In Ukrainian]

6. Zelinska, L. H. (2025). Post-war land restoration through the creation of bioenergy crop plantations. In *Forestry education and science: Status, problems and development prospects: Collection of scientific papers of the VII International Scientific and Practical Internet Conference* (pp. 332–335). MANS. [In Ukrainian]

7. Law of Ukraine No. 555-15. *On Alternative Energy Sources*. (2003). Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, (24), 155. (Amended by Law No. 4213-IX, January 14, 2025). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text

8. Fuchylo, Ya. D., & Sbytna, M. V. (2009). *Willows of Ukraine: biology, ecology, use*. Lohos. [In Ukrainian]

9. Zelinska, L. G., & Fuchylo, Ya. D. (2025). Productivity of some varieties of basket willow during the third three-year growing cycle. *Plant Varieties Studying and Protection*, *21*(3), 145–153. https://doi.org/10.21498/2518-1017.21.3.2025.339317 [In Ukrainian]

10. Nordborg, M., Berndes, G., Dimitriou, I., Henriksson, A., Mola-Yudego, B., & Rosenqvist, H. (2018). Energy analysis of willow production for bioenergy in Sweden. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *93*, 473–482. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.045

11. Lys, N. M., Fuchylo, Y. D., Tkachuk, N. L., & Ivaniuk, R. S. (2021). Influence of plant density and application of mineral fertilizers on the growth and productivity of energy willow plantations in Carpathian region. *Bioenergy*, *2*, 19–21. https://doi.org/10.47414/be.2.2018.229250 [In Ukrainian]

12. Sinchenko, V. M., & Hnap, I. V. (2021). Influence of basic nutrients on the productivity of energy willow. *Bioenergy*, *1*, 9–12. https://doi.org/10.47414/be.1.2018.229193 [In Ukrainian]

13. Fuchylo, Ya. D., Sinchenko, V. M., Vokalchuk, B. M., & Ivaniuk, I. D. (2022). *Productivity of energy plantations of willow barbed wire during the second three-year growing cycle*. NOVOgrad. [In Ukrainian]

14. Wang, Q., Niu, X., Huang, S., Di, D., Su, B., Yuan, Y., Wu, Y., & Huang, D. (2025). Nitrogen fertilizer improves *Salix matsudana* growth and soil qualities. *Frontiers in Microbiology*, *16*, Article 1631852. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1631852

15. Larsen, S. U., Jørgensen, U., Kjeldsen, J. B., & Lærke, P. E. (2016). Effect of fertilisation on biomass yield, ash and element uptake in SRC willow. *Biomass and Bioenergy*, *86*, 120–128. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.014

16. *Checklist for cultivars of Salix L. (willow)*. https://salix.psla.uconn.edu/wp-content/uploads/sites/3416/2021/11/CHECKLIST-for-CULTIVARS-of-Salix-L.-willow.pdf
17. SuperAgronom. (n.d.). *Hydrothermal coefficient of moisture*. https://superagronom.com/slovnik-agronoma/gidrotermichniy-koeficiyen-t-zvolozhennya-id20236

Height of energy willow (*Salix viminalis*) plantations in 3-year coppice as affected by cultivation practices and weather conditions during the third three year growing cycle

L. H. Zelinska, Ya. D. Fuchylo*

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine
**Corresponding author: Yaroslav Fuchylo, fuchylo_yar@ukr.net*

Citation: Zelinska, L. H., & Fuchylo, Ya. D. (2025). Height of energy willow (*Salix viminalis*) plantations in 3-year coppice as affected by cultivation practices and weather conditions during the third three-year growing cycle. *Bioenergy*, *2*, 25–36. https://doi.org/10.47414/be.2025. No2.pp25-36

Aim. To determine the growth characteristics of energy willow in 3-year coppice in the Right-Bank Forest Steppe depending on genotype, nitrogen fertilisation rates, plant density and planting design, as well as hydrothermal conditions of the growing season. **Methods.** The study was conducted in 2021–2023 at the experimental field of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of NAAS (Kyiv region). The objects of study were willow cultivars 'Tora' and 'Ternopilska'. The experimental plantations were established in double-row strips with row spacing of 0.75 m, and spacing between the strips of 1.50 m and 2.50 m. Planting density was 12, 15 and 18 thousand plants/ha. Ammonium nitrate was applied once before the start of the third cycle at rates of 35 and 70 kg/ha of active nitrogen; control plots received no fertiliser. **Results.** Plants of the cultivar 'Tora' in most experimental treatments showed slightly higher height values compared to 'Ternopilska'. The maximum average height after the third year of cultivation (4.7 ± 0.24 m) was recorded under the planting scheme 0.75 × 2.50 × 0.75 m with a density of 12 thousand plants/ha and application of 70 kg/ha nitrogen. Under the scheme 0.75 × 1.50 × 0.75 m, the maximum height was also achieved with the highest fertiliser rate and lowest initial density, reaching 4.5 ± 0.26 m. The average height of 'Ternopilska' plantations after the third year was greatest (4.1 ± 0.17 and 4.3 ± 0.12 m) under similar conditions, indicating the advisability of establishing energy willow plantations in the study region with an initial density of 12 thousand plants/ha and applying nitrogen fertiliser at 70 kg/ha before each 3-year cycle. Analysis of annual height increments of both cultivars showed that in all experimental treatments, the maximum increments occurred in 2021 – the first year of the third cycle. Their share accounted for 43.2–64.5% of the total height of three-year plants, whereas in the following two years increments were only 9.1–37.8%. The reason was sufficient soil moisture in 2021 (HTC = 1.16), while 2022 and 2023 were slightly dry (HTC = 0.96 and 0.88 respectively), which negatively affected annual increments. This highlights the crucial importance of soil moisture for successful growth of energy willow plantations, which must be considered in cultivation. **Conclusions.** During the third 3-year cycle of energy willow cultivation on leached chernozem of the Right-Bank Forest Steppe, plant height and annual height increment are determined by weather conditions of the growing season and applied agronomic measures, particularly cultivar characteristics, nitrogen fertilisation, and initial planting density. The effect of planting design on growth indicators during the third cycle was not statistically significant.

Keywords: bioenergy; energy willow plantation; cultivar; biomass; cultivation technologies; fertiliser application rates; weather conditions of the growing season.

ORCID

Людмила Зелінська / Liudmyla Zelinska	https://orcid.org/0009-0000-1800-5262
Ярослав Фучило / Yaroslav Fuchylo	https://orcid.org/0000-0002-2669-5176

2025 ● № 2 ● С. 37–44
https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp37-44

Оригінальні дослідження

УДК 631.895:633.282:620.952

Вплив позакореневого підживлення на енергетичний потенціал міскантусу гігантського

В. М. Квак*, В. І. Кравчук, О. М. Ганженко, Г. С. Гончарук, О. М. Атаманюк

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

**Автор для листування: Володимир Квак, kvak-vm@ukr.net*

Цитування: Квак В. М., Кравчук В. І., Ганженко О. М., Гончарук Г. С., Атаманюк О. М. Вплив позакореневого підживлення на енергетичний потенціал міскантусу гігантського. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 37–44. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp37-44

Мета. Оцінити вплив норм і строків позакореневого внесення комплексного мікродобрива Актив-Харвест Макро на врожайність, якісний склад та енергетичний потенціал біомаси міскантусу гігантського в умовах нестійкого зволоження Лісостепу України. **Методи.** Дослідження проводили у 2021–2024 рр. на Ялтушківській ДСС ІБКіЦБ НААН на сірому лісовому легкосуглинковому ґрунті. Схема досліду – двофакторна: фактор А – норма препарату (0, 2, 4 л/га), фактор В – фаза внесення (ВВСН 20, 29). Визначали врожайність сирої і сухої біомаси, уміст сухої речовини, золи, целюлози, геміцелюлози та лігніну, теплотворну здатність і енергетичний потенціал. **Результати.** Установлено достовірне зростання врожайності сухої біомаси за застосування препарату. Максимальний середній показник – 28,2 т/га – отримано за норми 4 л/га у фазі ВВСН 29, що на 66,9% перевищувало контроль (16,9 т/га). Урожай сирої маси зростав до 40,1 т/га проти 23,9 т/га у контролі. Норма внесення зумовлювала 44% загальної варіації врожайності, погодні умови року – 21%, фаза обробки – 15%. Під впливом мікродобрива підвищувався вміст целюлози (до 42,3%) і геміцелюлози (до 30,5%), зменшувалася частка лігніну (до 23,6%) і золи (до 3,6%). Теплотворна здатність зростала з 15,4 до 16,8 МДж/кг, а енергетичний потенціал – з 368,6 до 673,5 ГДж/га (+81,9%). **Висновки.** Позакореневе підживлення міскантусу гігантського мікродобривом Актив-Харвест Макро є ефективним елементом технології вирощування культури. Оптимальним є внесення 4 л/га у фазі ВВСН 29, що забезпечує максимальну реалізацію продуктивного й енергетичного потенціалу насаджень та покращує структурно-хімічні показники біомаси.

Ключові слова: міскантус гігантський; позакореневе підживлення; мікродобриво; Актив-Харвест Макро; урожайність біомаси; структурний склад біомаси; целюлоза; лігнін; теплотворна здатність; енергетичний потенціал; біоенергетичні культури; Лісостеп України.

Вступ

В умовах загострення глобальних екологічних проблем і зростання потреби у поновних джерелах енергії пошук альтернативних енергетичних ресурсів є одним із пріоритетних напрямів сучасних наукових досліджень. Скорочення запасів викопного палива, підвищення рівня викидів парникових газів та необхідність зміцнення енергетичної безпеки зумовлюють активний розвиток біоенергетики, зокрема використання рослинної біомаси як джерела енергії [1, 2]. Серед різних видів біомаси особливу увагу привертають багаторічні злакові культури, зокрема міскантус гігантський (*Miscanthus* × *giganteus* J.M.Greef & Deuter ex Hodkinson &

Одержано 15.07.2025 ● **Погоджено** 22.09.2025 ● **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

Renvoize), який характеризується високою продуктивністю, стійкістю до абіотичних чинників і відносно невисокими вимогами до агротехнічного забезпечення [3–5].

Актуальність дослідження енергетичного потенціалу багаторічних злакових культур зумовлена їхніми біологічними та господарсько-цінними властивостями, що визначають перспективність використання в біоенергетиці. На відміну від однорічних культур, багаторічні злаки здатні тривалий час використовувати одну й ту саму ділянку без щорічного перезалуження, що сприяє зниженню виробничих витрат і мінімізації антропогенного навантаження на ґрунт [6]. Крім того, високий уміст целюлози та лігніну в їхній біомасі зумовлює ефективність перероблення на тверде біопаливо та целюлозовмісні продукти [7, 8].

Позакореневе підживлення як агротехнічний захід широко досліджується в аспекті підвищення продуктивності сільськогосподарських культур. За результатами досліджень на інших енергетичних культурах, зокрема кукурудзі та цукровій тростині, установлено, що застосування позакореневих підживлень сприяє зростанню вмісту цукрів та інших енергетично цінних компонентів у біомасі [9]. Це свідчить про можливість подібного ефекту й у міскантусу гігантського. Крім того, експериментальні дані [10] підтверджують, що комбіноване внесення мікроелементів (цинк, мідь, бор) позакореневим способом підвищує фотосинтетичну активність рослин, що безпосередньо впливає на формування їхнього енергетичного потенціалу.

Водночас, попри наявність позитивних результатів щодо інших культур, дослідження впливу саме позакореневого підживлення на міскантус гігантський залишаються обмеженими. Переважна більшість наукових праць присвячена кореневому удобренню та його впливу на врожайність [2, 11]. Отже, необхідні подальші дослідження, спрямовані на обґрунтування оптимальних стратегій позакореневого підживлення з метою максимізації енергетичного потенціалу міскантусу гігантського.

Оцінювання енергетичного потенціалу рослинної біомаси є ключовим етапом визначення її придатності для використання у біоенергетиці. У наукових дослідженнях цей підхід охоплює аналіз хімічного складу біомаси, визначення теплотворної здатності та розроблення технологій перероблення на різні види біопалива [12, 13]. Одним із базових показників є нижча теплота згоряння, що залежить від вмісту целюлози, геміцелюлози та лігніну [14, 15]. Зокрема встановлено, що високий уміст лігніну в біомасі міскантусу підвищує його ефективність як сировини для виробництва твердого біопалива [16].

Важливим чинником формування енергетичного потенціалу є також хімічний склад біомаси. Зокрема, у дослідженнях інших багаторічних злаків виявлено високий уміст структурних вуглеводів, що зумовлює їх придатність до переробки на біоетанол [6]. Крім того, продуктивність і якість біомаси значною мірою залежать від умов вирощування. Показано, що багаторічні трав'янисті культури можуть забезпечувати стабільне виробництво біопалива навіть за умов низького ресурсного забезпечення [17, 18].

Мета дослідження – оцінити вплив норм і строків позакореневого внесення комплексного мікродобрива Актив-Харвест Макро на врожайність, якісний склад та енергетичний потенціал біомаси міскантусу гігантського в умовах нестійкого зволоження Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Експериментальні дослідження проводили у 2021–2024 рр. на полі № 3 селекційної сівозміни Ялтушківської дослідно-селекційної станції (ЯДСС) Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН.

Дослідна ділянка розташована в зоні нестійкого зволоження Лісостепу України, у південно-західній частині Вінницької області (Жмеринський р-н). Клімат території – помірно теплий і достатньо вологий. Середньорічна температура повітря становить близько +8,7 °С. Середня річна кількість опадів – близько 550 мм, з яких за вегетаційний період випадає 280–360 мм.

Ґрунт дослідної ділянки – сірий лісовий легкосуглинковий. Агрохімічні показники орного шару (0–30 см): уміст гумусу (за Тюріним) – 1,86%; лужногідролізованого азоту (за Корнфільдом) – 63,0 мг/кг; рухомого фосфору і калію (за Чириковим) – відповідно 109 та 119 мг/кг ґрунту; pH (сольове) – 5,3; гідролітична кислотність (за Каппеном) – 2,9 мг-екв/100 г ґрунту; сума увібраних основ – 22,4 мг-екв/100 г ґрунту; ступінь насичення основами – 80–83%.

Погодні умови у 2021–2024 рр. характеризувалися підвищеним температурним фоном і варіюванням кількості опадів упродовж вегетаційних періодів.

Температурний режим: у 2021 р. найбільші позитивні відхилення від середньобагаторічних показників зафіксовано у червні (+3,2 °C) та липні (+4,1 °C); у 2022-му – у червні (+3,0 °C) і серпні (+2,5 °C), при цьому рік був найпосушливішим за період досліджень; у 2023-му значні перевищення температури спостерігали у серпні (+4,4 °C), вересні (+4,3 °C) та жовтні (+2,7 °C); у 2024 р. найвищі позитивні аномалії відзначено у квітні (+3,9 °C) та липні (+4,6 °C).

За кількістю опадів 2021 р. характеризувався показником 291,2 мм, що на 108,8 мм менше кліматичної норми; у 2022-му випало 232 мм (дефіцит 168 мм), що було максимальним недобором вологи за весь період досліджень; у 2023 р. зафіксовано 326,5 мм опадів (на 73,5 мм менше норми); у 2024 р. умови були близькими до оптимальних – 393,4 мм, що лише на 6,6 мм менше середньобагаторічного показника.

Таким чином, у всі роки досліджень спостерігали підвищений температурний фон. Найбільший дефіцит вологи відзначено у 2022 р., що могло негативно вплинути на формування врожаю біомаси. Порівняно сприятливими для росту та накопичення біомаси міскантусу були 2023 та 2024 рр., що зумовлено поєднанням високих температур і відносно достатнього вологозабезпечення.

Схему двофакторного досліду наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Схема досліду

Варіант	Фактор А – норма внесення препарату Актив-Харвест-Макро	Фактор В – фаза розвитку рослин
1	Контроль – без внесення препарату	
2	2 л/га	BBCH 20
3		BBCH 29
4	4 л/га	BBCH 20
5		BBCH 29

Примітка. BBCH 20 – фаза кущіння, BBCH 29 – вихід у трубку.

Дослід було закладено на плантації міскантусу гігантського ‘Осінній зорецвіт’ 2016 року садіння. Площа облікової ділянки становила 12,5 м^2, повторність досліду – триразова.

Для позакореневого підживлення застосовували комплексне добриво Актив-Харвест Макро, яке містить макро- та мікроелементи у доступній для рослин формі, а також біологічно активні речовини. Препарат призначений для позакореневого підживлення сільськогосподарських культур. Склад (діючі речовини), %: N – 5; P_2O_5 – 15; K_2O – 15; Mg – 0,375; SO_3 – 0,45; B – 0,093; Fe – 0,15; Mn – 0,135; Cu – 0,06; Zn – 0,11; Mo – 0,0015; Ni – 0,002. Норма внесення – 0,5–4,0 л/га. Виробник – компанія «Імперія Агро» (Україна) [19].

Зразки біомаси відбирали на експериментальних ділянках після завершення вегетації. У межах кожної облікової ділянки, в рядку на відстані не менше 3 м від краю, послідовно (без пропусків) відбирали не менше ніж 10 рослин. Відібрані рослини зрізали, визначали їх загальну масу та розраховували врожайність біомаси (т/га).

Уміст сухої речовини в листково-стебловій біомасі визначали термогравіметричним методом [20]. Уміст сирої золи встановлювали методом сухого озолення за доступу повітря. Уміст лігніну визначали за методом Класона, а вміст целюлози та геміцелюлози – методом кислотного гідролізу [21].

Теплотворну здатність біомаси визначали розрахунковим методом на основі її хімічного складу [15] за формулою:

$$E_B = E_O (1 - W / 100),$$

де E_B – вища питома теплотворна здатність біомаси, МДж/кг; W – вологість біомаси, %; E_O – питома теплотворна здатність абсолютно сухої біомаси, МДж/кг.

Питома теплотворна здатність абсолютно сухої біомаси (E_O) залежить від її хімічного складу і визначається за формулою:

$$E_O = 0{,}01(q_c e_c + q_h e_h + q_l e_l)$$

де E_o – питома теплотворна здатність абсолютно сухої біомаси, МДж/кг; q_c, q_h, q_l – частка відповідно целюлози; геміцелюлози та лігніну в структурі біомаси, %; e_c, e_h, e_l – питома теплотворна здатність відповідно целюлози; геміцелюлози та лігніну, МДж/кг. e_c = 17,4 МДж/кг; e_h = 13,9 МДж/кг, e_l = 26,9 МДж/кг [22].

Після підстановки відповідних значень формула набуває вигляду:

$$E_o = 0{,}01(17{,}4q_c + 13{,}9q_h + 26{,}9q_l)$$

Енергетичний потенціал визначали на основі показників теплотворної здатності та врожайності біомаси за формулою:

$$E = Y \times E_B,$$

де E – енергетичний потенціал, ГДж/га; Y – урожайність, т/га; E_B – теплотворна здатність, ГДж/т [23].

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали методом дисперсійного аналізу (ANOVA). Розрахунки виконували на персональному комп'ютері з використанням прикладних програм Microsoft Excel та Statistica 6.0 [24].

Результати дослідження

Результати експерименту (табл. 2) за період 2021–2024 рр. свідчать, що застосування мікродобрива Актив-Харвест Макро позитивно впливало на продуктивність міскантусу гігантського, забезпечуючи достовірне підвищення врожайності порівняно з контролем (без обробки). Середні показники врожайності сухої біомаси демонстрували чітку позитивну залежність від норми внесення препарату та фази обробки.

Таблиця 2. Урожайність сухої біомаси міскантусу гігантського залежно від варіанту підживлення, т/га

Норма препарату	Фаза розвитку рослин	2021	2022	2023	2024	Середнє
Контроль		16,1	15,7	16,9	19,0	16,9
2 л/га	ВВСН 20	19,6	19,0	20,5	22,5	20,4
	ВВСН 29	25,6	24,5	26,0	28,0	26,0
4 л/га	ВВСН 20	20,2	19,3	21,2	23,6	21,1
	ВВСН 29	26,9	26,5	28,1	31,3	28,2
$НІР_{0,05}$		3,3	3,2	3,4	3,3	2,16

Максимальна середня врожайність сухої біомаси, 28,2 т/га, спостерігалася за внесення Актив-Харвест Макро у нормі 4 л/га у фазі ВВСН 29, що на 66,9% перевищувало показник контролю – 16,9 т/га. Варіант із внесенням 2 л/га у тій же фазі також продемонстрував високі результати – 26,0 т/га. Застосування препарату у фазі ВВСН 29 забезпечувало найкращу реакцію рослин на мікродобриво, що зумовлено інтенсивним ростом і розвитком вегетативної маси в цей період.

Аналіз погодних умов за роками показав, що формування врожаю міскантусу гігантського значною мірою залежало від метеорологічних чинників. Зокрема, у 2022 році зафіксовано найнижчі показники врожайності в усіх варіантах досліду, що зумовлено дефіцитом опадів (232 мм за вегетаційний період). Натомість у 2024 році, за оптимальних гідротермічних умов (393,4 мм опадів), урожайність досягала максимальних значень.

У всі роки досліджень найвищу врожайність забезпечувало внесення мікродобрива Актив-Харвест Макро у нормі 4 л/га у фазі ВВСН 29. Зокрема, у 2021 році врожайність становила 26,9 т/га (+10,8 т/га до контролю), у 2022-му – 26,5 т/га (+10,8 т/га), у 2023-му – 28,1 т/га (+11,2 т/га), у 2024 році – 31,3 т/га (+12,3 т/га).

За результатами дисперсійного аналізу (рисунок) встановлено, що визначальним чинником підвищення продуктивності міскантусу гігантського була норма внесення препарату, частка якої становила 44% загальної варіації. Це свідчить про високу ефективність застосування мікродобрива Актив-Харвест-Макро в різних нормах і фазах розвитку культури.

Фактор «Роки» зумовлював 21% варіації, що підтверджує істотний вплив погодних умов, зокрема режиму зволоження та температурного фону, на формування врожаю. Фаза внесення добрива пояснювала 15% дисперсії, що вказує на важливість вибору оптимального фенологічного етапу для проведення позакореневого підживлення.

Суттєве значення мала також взаємодія факторів, сумарна частка – 17%. Зокрема:

Норма витрати препарату × фаза розвитку рослин (8%). Ця взаємодія свідчить, що ефективність однієї й тієї ж норми препарату залежить від фенологічної фази її застосування. Зокрема, норма 4 л/га у фазі BBCH 29 забезпечила максимальну врожайність (до 31,3 т/га), тоді як внесення цієї ж норми у фазі BBCH 20 мало нижчий ефект (до 23,6 т/га). Отже, оптимальне поєднання норми та строку внесення дає змогу максимально реалізувати продуктивний потенціал культури.

Рік × норма витрати препарату (4%). Ефективність однакових норм мікродобрива варіювала залежно від погодних умов року. У 2022 році за дефіциту вологи (232 мм опадів за вегетацію) ефект вищої норми був менш вираженим, тоді як у 2024 році (393,4 мм опадів) вони обидві забезпечували істотне зростання врожайності. Це обґрунтовує доцільність адаптації агротехнічних заходів до конкретних кліматичних умов.

Рік × фаза розвитку рослин (4%). Оптимальний строк обробки також залежав від погодного фону року. Зокрема, у 2023 році за відносно рівномірного розподілу опадів і підвищених температур ефективнішою була обробка у фазі BBCH 29, тоді як у посушливому 2022-му кращий результат забезпечувало більш раннє внесення (BBCH 20).

Трикомпонентна взаємодія *рік × норма витрати препарату × фаза розвитку рослин* мала найменшу частку впливу (1%), однак підтверджує, що максимальна ефективність агрозаходів формується під одночасним впливом усіх трьох чинників. Це підкреслює необхідність диференційованого підходу до технології вирощування міскантусу гігантського з урахуванням умов конкретного сезону.

Інші фактори (3%) включали змінні, не враховані в моделі (щільність стояння рослин, мікрорельєф, механічний склад ґрунту тощо). Їхній вплив був незначним, що свідчить про достатній рівень контрольованості умов проведення досліду та коректність експериментального планування.

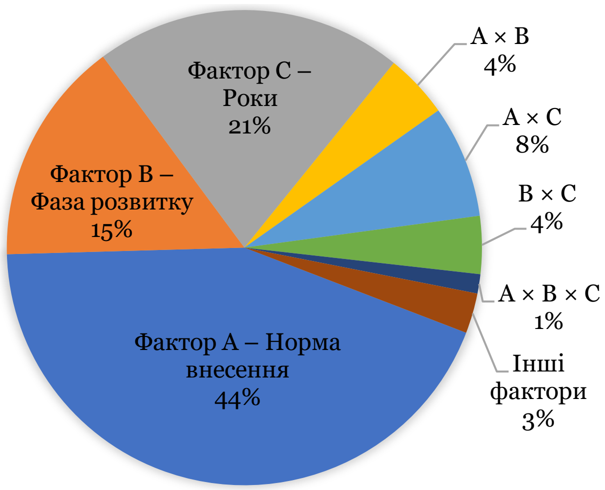


Рис. Частка впливу досліджуваних факторів на врожайність міскантусу гігантського

Дослідження засвідчили, що застосування мікродобрива Актив-Харвест Макро суттєво впливає на продуктивність міскантусу гігантського, зумовлюючи зміни як кількісних, так і якісних показників біомаси.

Урожайність сирої маси (табл. 3) істотно зростала за умов позакореневого підживлення. У контрольному варіанті вона становила 23,9 т/га, тоді як за внесення 2 л/га у фазі BBCH 29 підвищувалася до 36,9 т/га. Найвищий показник зафіксовано в разі застосування 4 л/га у фазі BBCH 29 – 40,1 т/га, що на 67,6% перевищувало контроль.

Уміст сухої речовини залишався відносно стабільним у межах 70,1–70,9% незалежно від варіанта обробки, що свідчить про збереження основних фізіолого-біохімічних характеристик рослин за дії мікродобрива.

Суттєві зміни відзначено і в структурному складі біомаси. Уміст целюлози зростав із 39,2% у контролі до 42,3% у варіанті зі внесенням 4 л/га у фазі ВВСН 29, що є позитивним чинником для подальшого біоенергетичного використання сировини. Водночас уміст лігніну зменшувався з 28,3% (контроль) до 23,6%, що сприяє покращенню паливних властивостей завдяки зниженню частки важкорозкладних компонентів. Уміст геміцелюлози підвищувався до 30,5%, що свідчить про зростання частки легкодоступних полісахаридів у структурі клітинної стінки.

Таблиця 3. Продуктивність міскантусу гігантського залежно від варіантів позакореневого підживлення (середнє за 2021–2024 рр.)

Показники	Контроль	Норми внесення препарату			
		2 л/га		4 л/га	
		ВВСН 20	ВВСН 29	ВВСН 20	ВВСН 29
Урожай сирої маси, т/га	23,9	29,1	36,9	29,9	40,1
Уміст сухої речовини на час збирання, %	70,9	70,1	70,4	70,5	70,4
Структурний склад, %:					
целюлоза	39,2	40,5	41,8	41,1	42,3
лігнін	28,3	26,4	24,4	25,6	23,6
геміцелюлоза	28,4	29,2	30	29,6	30,5
зола	4,1	3,9	3,8	3,7	3,6
Теплотворна здатність, МДж/кг	15,4	16,0	16,5	16,3	16,8
Енергетичний потенціал, ГДж/га	368,6	465,2	609,1	485,9	673,5

Уміст золи в біомасі зменшувався зі збільшенням норми препарату – від 4,1% у контролі до 3,6% у варіанті із внесенням 4 л/га у фазі ВВСН 29. Це є важливою характеристикою паливної якості, оскільки нижчий уміст золи зменшує утворення відкладень і засмічення обладнання під час спалювання.

Відзначено також зростання теплотворної здатності біомаси – з 15,4 МДж/кг у контрольному варіанті до 16,8 МДж/кг за максимальної норми внесення. Унаслідок цього енергетичний потенціал посівів міскантусу підвищився з 368,6 ГДж/га (контроль) до 673,5 ГДж/га, що на 81,9% перевищує контрольний показник.

Таким чином, отримані результати свідчать про високу ефективність застосування мікродобрива Актив-Харвест Макро в технології вирощування міскантусу гігантського як щодо нарощування врожаю біомаси, так і з позицій покращення її енергетичних і якісних показників.

Висновки

Найвищу середню врожайність сухої біомаси – 28,2 т/га – отримано за застосування препарату в нормі 4 л/га у фазі ВВСН 29, що на 66,9% перевищувало показник контрольного варіанта (16,9 т/га).

Під впливом мікродобрива покращувався і якісний склад біомаси: уміст целюлози зростав з 39,2 до 42,3%, геміцелюлози – з 28,4 до 30,5%, зольність знижувалася з 4,1 до 3,6%, а теплотворна здатність підвищувалася з 15,4 до 16,8 МДж/кг.

Енергетичний потенціал біомаси у найефективнішому варіанті досягав 673,5 ГДж/га, що на 81,9% більше порівняно з контролем (368,6 ГДж/га), що підтверджує доцільність застосування препарату для підвищення енерговіддачі насаджень.

Водночас залишаються актуальними питання оптимізації технологій перероблляння біомаси, оцінювання впливу кліматичних змін на продуктивність культури та розроблення уніфікованих підходів до визначення енергетичного потенціалу. Подальші дослідження мають бути спрямовані на комплексне вирішення зазначених проблем.

Список використаних джерел

1. Lewandowski, I., Scurlock, J. M. O., Lindvall, E., & Christou, M. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*, *25*(4), 335–361. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8

2. Heaton, E. A., Dohleman, F. G., & Long, S. P. (2008). Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*, *14*(9), 2000–2014. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008. 01662.x

3. Clifton-Brown, J. C., & Lewandowski, I. (2002). Screening *Miscanthus* genotypes in field trials to optimise biomass yield and quality in Southern Germany. *European Journal of Agronomy*, *16*(2), 97–110. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00120-4

4. Sanderson, M. A., Adler, P. R., Boateng, A. A., Casler, M. D., & Sarath, G. (2006). Switchgrass as a biofuels feedstock in the USA. *Canadian Journal of Plant Science*, *86*(5), 1315–1325. https://doi.org/10.4141/P06-136

5. Kravchuk, V. I., Kvak, V. M., Tsvihun, H. V., Ivaniuta, M. V., Kononiuk, N. O., Atamaniuk, O. M., & Humeniuk, Yu. O. (2022). Problems of production of Miscanthus Giganteus planting material. *Bioenergy*, *1–2*, 35–42. https://doi.org/10.47414/be.1-2.2022.271353 [In Ukrainian]

6. McLaughlin, S. B., & Adams Kszos, L. (2005). Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy*, *28*(6), 515–535. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.05.006

7. Somerville, C., Youngs, H., Taylor, C., Davis, S. C., & Long, S. P. (2010). Feedstocks for lignocellulosic biofuels. *Science*, *329*(5993), 790–792. https://doi.org/10.1126/science.1189268

8. Roik, M. V., & Kravchuk, V. I. (2023). *Miscanthus giganteus*: horizons of innovative research and implementation. *Bioenergy*, *1–2*, 4–6. https://doi.org/10.47414/be.1-2.2023.290613 [In Ukrainian]

9. Marschner, H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9

10. Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, *302*(1–2), 1–17. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3

11. Lewandowski, I., & Schmidt, U. (2006). Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *112*(4), 335–346. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.003

12. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

13. Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, *31*(2), 171–192. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002

14. Heletukha, H. H., Zhelezna, T. A., Zhovmir, M. M., Matvieiev, Yu. B., & Drozdova, O. I. (2010). Assessment of the energy potential of biomass in Ukraine. Part 1. Agricultural residues and woody biomass]. *Industrial Heat Engineering*, *32*(6), 58–65. [in Ukrainian]

15. Kvak, V. M., Hanzhenko, O. M., Kravchuk, V. I., Humentyk, M. Ia., Fuchylo, Ya. D., Khivrych, O. B., Pravdyva, L. A., Boiko, I. I., Honcharuk, H. S., Atamaniuk, O. M., Kononiuk, N. O., Suslyk, L. O., & Kubriak, R. V. (2024). *Methodical recommendations for determining the calorific value of plant biomass depending on its chemical composition*. Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. [In Ukrainian]

16. Brosse, N., Dufour, A., Meng, X., Sun, Q., & Ragauskas, A. (2012). *Miscanthus*: A fast-growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *6*(5), 580–598. https://doi.org/10.1002/bbb.1353

17. Clifton-Brown, J. C., Chiang, Y. C., & Hodkinson, T. R. (2008). Miscanthus: Genetic resources and breeding potential to enhance bioenergy production. In W. Vermerris (Ed.), *Genetic improvement of bioenergy crops* (pp. 295–308). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-70805-8_10

18. Tilman, D., Hill, J., & Lehman, C. (2006). Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, *314*(5805), 1598–1600. https://doi.org/10.1126/science.1133306

19. Imperiia Ahro. (n.d.). *Active-Harvest micronutrients*. https://semena-online.com.ua/aktiv-harvest-mikro-mikrodobrivo-imperiya-agro [In Ukrainian]

20. Hrytsaienko, Z. M., Hrytsaienko, A. O., & Karpenko, V. P. (2003). *Methods of biological and agrochemical research of plants and soils* (Z. M. Hrytsaienko, Ed.). Nichlava. [In Ukrainian]

21. Kovalchuk, V. P., Vasyliev, V., Boiko, L. V., & Zosymov, V. D. (2010). *Collection of methods for studying nutrients in soil and plants*. Trud-HryPol-XXI vik. [In Ukrainian]

22. Mykhailyk, V. A., Korinchevska, T. V., Korinchuk, D. M., & Dakhnenko, V. L. (2019). Thermal analysis of granular biofuel torified in the atmosphere of its own gaseous environment. *Thermophysics and Heat Power Engineering*, *41*(4), 70–77. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.10 [In Ukrainian]

23. Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, *54*(1–3), 17–46. https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3

24. Ermantraut, E. R., Prysiazhniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic experimental data in Statistica-6 package*. PolihrafKonsaltynh. [In Ukrainian]

Impact of foliar application of fertilisers on the energy potential of *Miscanthus* × *giganteus*

V. M. Kvak*, V. I. Kravchuk, O. M. Hanzhenko, H. S. Honcharuk, O. M. Atamaniuk

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

**Corresponding author: Volodymyr Kvak, kvak-vm@ukr.net*

Citation: Kvak, V. M.*, Kravchuk, V. I., Hanzhenko, O. M., Honcharuk, H. S., & Atamaniuk, O. M. (2025). Impact of foliar application of fertilisers on the energy potential of *Miscanthus × giganteus*. *Bioenergy*, *2*, 37–44. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp37-44

Aim. To evaluate the effect of rates and timing of foliar application of the complex micronutrient fertiliser Active-Harvest Macro on yield, quality composition and energy potential of *M.* × *giganteus* biomass under unstable moisture conditions of the Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** The study was carried out in 2021–2024 at the Yaltushkiv Experimental Breeding Station of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS, on grey forest light loam soil. The experimental design was two-factor: factor A – fertiliser rate (0, 2, 4 l/ha), factor B – application stage (BBCH 20, 29). Yield of fresh and dry biomass, dry matter content, ash, cellulose, hemicellulose and lignin content, calorific value and energy potential were evaluated. **Results.** A significant increase in dry biomass yield was achieved with fertiliser application. The maximum average yield of 28.2 t/ha was obtained at an application rate of 4 l/ha at the stage BBCH 29, exceeding the control (16.9 t/ha) by 66.9%. Fresh biomass yield increased to 40.1 t/ha compared with 23.9 t/ha in the control. Fertiliser rate accounted for 44% of total yield variation, weather conditions of the year – 21%, and application phase – 15%. Under the influence of the micronutrient fertiliser, cellulose content increased to 42.3% and hemicellulose to 30.5%, while lignin content decreased to 23.6% and ash content decreased to 3.6%. Calorific value rose from 15.4 to 16.8 MJ/kg, and energy potential rose from 368.6 to 673.5 GJ/ha (+81.9%). **Conclusions.** Foliar application of micronutrient fertiliser Active-Harvest Macro in *M.* × *giganteus* is an effective element of the crop cultivation technology. The optimal application rate is 4 l/ha at stage BBCH 29, which ensures maximum realisation of the productive and energy potential of plantations and improves the structural-chemical parameters of biomass.

Keywords: *Miscanthus* × *giganteus*; foliar application of fertilisers; micronutrient fertiliser; Active-Harvest Macro; biomass yield; biomass composition; cellulose; lignin; calorific value; energy potential; bioenergy crops; Forest Steppe of Ukraine.

ORCID

Володимир Квак / Volodymyr Kvak	https://orcid.org/0000-0001-8996-0101
Володимир Кравчук / Volodymyr Kravchuk	https://orcid.org/0000-0002-7991-0351
Олександр Ганженко / Oleksandr Hanzhenko	https://orcid.org/0000-0002-8118-1645
Григорій Гончарук / Hryhorii Honcharuk	https://orcid.org/0009-0004-5240-854X
Олег Атаманюк / Oleh Atamaniuk	https://orcid.org/0000-0001-8327-3298

2025 • № 2 • С. 45–56
https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp45-56

Оригінальні дослідження

УДК 633.15:631.53.027

Структура моно- та бінарних посівів кукурудзи і сої

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. Структура моно- та бінарних посівів кукурудзи і сої. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 45–56. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp45-56

Мета. Установити закономірності формування густоти стояння, виживаності рослин і просторової структури кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах залежно від рівня мінерального живлення в умовах Лісостепу України. **Методи.** Дослідження проводили у 2021–2025 рр. у стаціонарному польовому досліді кафедри рослинництва ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (Київська обл.). Порівнювали монокультурні та бінарні посіви кукурудзи (‘РЖТ Занетіккс’) і сої (‘Сірелія’, ‘РЖТ Сакуза’) за трьох систем удобрення: без добрив, $N_{60}P_{45}K_{45}$ та $N_{90}P_{60}K_{60}$. Аналізували лабораторну та польову схожість, фактичну густоту на час повних сходів і збирання, коефіцієнти виживаності, варіабельність розміщення рослин і кореляційні зв’язки з продуктивністю рослин. **Результати.** Польова схожість кукурудзи становила 91,1–91,4%, сої – 87,8–88,2%, що свідчило про сприятливі умови для формування бінарних посівів. У бінарних агроценозах оптимальна густота стояння кукурудзи на час збирання зберігалася в межах 63,4–64,0 тис. рослин/га за виживаності 94,3–95,1%, тоді як густота сої становила 194,3–196,9 тис. рослин/га за виживаності 91,3–92,1%. Незначний вплив удобрення на густоту (0,8–1,3%) свідчить про достатню забезпеченість ґрунту елементами живлення на початкових етапах росту. Застосування $N_{90}P_{60}K_{60}$ підвищувало висоту рослин у монокультурі (кукурудзи на 9,1–15,5%, сої на 4,2–5,3%), тоді як у бінарних посівах висота кукурудзи (241,0–265,0 см) не зменшувалася, що вказує на відсутність негативної міжвидової конкуренції. Висота сої в бінарних посівах зростала на 6,7–23,3% як адаптація до часткового затінення. Розраховано, що співвідношення висот кукурудза : соя як 3,1–3,4 : 1 забезпечує мінімальне перекриття листкових поверхонь та ефективне використання світла (коефіцієнт 0,82–0,85). Критичний період формування архітектури агроценозу припадав на 40–60-ту добу вегетації, коли темпи росту кукурудзи (3,5–4,0 см/добу) істотно перевищували показники сої (1,2–1,5 см/добу). Встановлено помірний позитивний зв’язок між висотою рослин і продуктивністю (r = 0,58–0,63 у кукурудзи та r = 0,51–0,56 у сої). Бінарні посіви знижували забур’яненість до 4,5–7,2 шт./м² проти 12,2–35,6 шт./м² у монокультурах (у 2,7–4,9 раза) та суху масу бур’янів на 57,9–64,0%. За інтенсивного удобрення в монокультурах забур’яненість різко зростала (на 46,7–180,3%), тоді як у бінарних посівах приріст був помірним (33,3–60,0%). **Висновки.** Отримані результати свідчать, що бінарні посіви забезпечують стабільне формування оптимальної густоти компонентів і створюють просторову структуру агроценозу, яка підвищує адаптивність та продуктивну стійкість системи.

Ключові слова: кукурудза; соя; бінарні посіви; густота стояння; польова схожість; виживаність рослин; просторовий розподіл; продуктивність.

Вступ

Густота стояння рослин є одним із базових елементів технології вирощування польових культур, що визначає інтенсивність внутрішньо- та міжвидової конкуренції, архітектоніку агроценозів і ефективність використання світлових, водних та поживних ресурсів. За літературними даними, відхилення фактичної густоти від оптимальної на ± 10% може призводити

Одержано 17.11.2025 • **Погоджено** 15.12.2025 • **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

до зниження врожайності кукурудзи на 6–12%, а сої – на 10–25% залежно від погодних умов та особливостей сортів [1, 2].

Для кукурудзи оптимальна густота стояння в умовах Лісостепу України становить 60–70 тис. рослин/га. Саме в цьому діапазоні формується максимальний листковий індекс (4,0–4,5), забезпечується поглинання 90–95% фотосинтетично активної радіації та досягається найвищий коефіцієнт конверсії фотосинтетичної енергії. Підвищення густоти понад 75–80 тис. рослин/га, за даними [3, 4], супроводжується зростанням конкуренції між рослинами та зниженням їх індивідуальної продуктивності на 8–15%.

Соя, на відміну від кукурудзи, характеризується значно вищою пластичністю щодо густоти стояння. Оптимальний інтервал густоти для більшості сортів у монокультурі становить 350–450 тис. рослин/га, при цьому зниження густоти на 30–40% може компенсуватися підвищенням індивідуальної продуктивності рослин завдяки інтенсивнішому гілкуванню. Водночас у змішаних агроценозах густота сої, зазвичай, зменшується до 200–250 тис. рослин/га без істотного зниження рівня врожайності [5].

У бінарних посівах зернових і зернобобових культур густота компонентів виконує не лише продуктивну, а й структуроутворювальну функцію. Літературні дані свідчать, що оптимальне співвідношення густоти кукурудзи та сої коливається в межах 1:2,5–3,5, забезпечуючи формування ярусної просторової структури з мінімальним перекриттям листкових поверхонь. За таких умов сумарний коефіцієнт використання світлової енергії може зростати з 0,72–0,75 у монокультурах до 0,82–0,85 у бінарних посівах [6].

Формування фактичної густоти стояння значною мірою залежить від лабораторної та польової схожості насіння, а також збереженості рослин упродовж вегетації. Для кукурудзи різниця між лабораторною та польовою схожістю зазвичай становить 3–5%, тоді як для сої – 5–8%, що зумовлено її підвищеною чутливістю до температурного та водного режимів ґрунту. Подальші втрати рослин упродовж вегетації можуть сягати 4–7% для кукурудзи та 6–10% для сої [7].

Мінеральне живлення, за даними [8], має обмежений вплив на формування густоти стояння на ранніх етапах органогенезу, проте істотно впливає на виживаність рослин. Підвищення рівня удобрення здатне збільшувати збереженість кукурудзи на 1–2%, тоді як для сої застосування високих доз азоту в деяких випадках призводить до зниження виживаності рослин унаслідок порушення процесів симбіотичної азотфіксації.

Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, кількісна оцінка формування густоти стояння та її варіабельності (CV) у бінарних посівах у багаторічному аспекті залишається недостатньо систематизованою. Особливо актуальним є аналіз взаємозв'язку густоти компонентів із продуктивністю та стабільністю агроценозів за мінливих погодних умов [9, 10].

Мета дослідження – установити закономірності формування густоти стояння кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах, кількісно оцінити вплив систем удобрення на польову схожість і виживаність рослин, а також встановити роль просторової структури посівів у забезпеченні стабільної продуктивності агроценозів Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводили 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 дослідного поля – чорнозем типовий малогумусний, середньосуглинковий за механічним складом, сформований на лесових відкладеннях. Уміст гумусу в орному шарі становив 3,5% (за Тюріним), забезпеченість елементами мінерального живлення – середня. Потужність гумусового горизонту – 25–30 см.

Схема сівби та норми висіву насіння культур відповідали проєкту досліду (табл. 1). У одновидових посівах норма висіву культиварів сої та кукурудзи відповідала зональним рекомендаціям оригінатора. У сумісних посівах норма висіву насіння сої була зменшена на 50%. Глибина загортання насіння кукурудзи становила 4–5 см, сої – 2–3 см.

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. $N_{90}P_{60}K_{60}$			

Попередником у досліді була пшениця озима. Система обробітку ґрунту передбачала лущення 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, вносили комплексне мінеральне добриво FERTIS NPK (10-20-20+S+ME), а під час передпосівної культивації – решту азотних добрив у формі аміачної селітри (34,4%).

Дослідження проводили відповідно до загальноприйнятих методик [11, 12].

Результати дослідження

Лабораторна схожість насіння характеризувалася високою стабільністю незалежно від системи вирощування та рівня мінерального удобрення. Для гібрида кукурудзи ‘РЖТ Занетіккс’ цей показник становив 95,3% у всіх варіантах досліду, що свідчить про високу якість насіннєвого матеріалу та його відповідність вимогам ДСТУ 2240-93. Стабільність лабораторної схожості впродовж п’яти років досліджень підтверджує ефективність системи насінництва та дотримання технологічних вимог післязбиральної доробки насіння виробником сертифікованого насіннєвого матеріалу (табл. 2).

Сорти сої характеризувалися дещо нижчим, проте також стабільним рівнем лабораторної схожості, який становив 93,0% для обох культиварів у всіх варіантах досліду. Різниця у 2,3% між показниками кукурудзи та сої зумовлена біологічними особливостями культур і вищою чутливістю насіння сої до умов зберігання.

Польова схожість характеризувалася вищою варіабельністю порівняно з лабораторною, що відображає вплив ґрунтово-кліматичних умов на процес проростання насіння. У монокультурі кукурудзи польова схожість становила 91,2–91,3%, що було лише на 4,0–4,1% нижче лабораторної. Це свідчить про сприятливі умови сівби та високу адаптивність гібрида до агроекологічних умов регіону.

У бінарних посівах польова схожість кукурудзи залишалася на рівні монокультури і становила 91,1–91,4%, що вказує на відсутність негативного впливу сумісної сівби на початкові етапи онтогенезу. Незначні коливання показника в межах 0,3% між варіантами удобрення підтверджують, що мінеральне живлення не є лімітуючим фактором на етапі проростання насіння.

Соя характеризувалася нижчою польовою схожістю: 87,8–88,2% у монокультурі та 87,9–88,1% у бінарних посівах. Зменшення польової схожості відносно лабораторної становило 4,8–5,2%, що в 1,3 раза перевищувало відповідний показник у кукурудзи. Це зумовлено вищими вимогами сої до температурного режиму та вологості ґрунту в період проростання, а також її чутливістю до утворення ґрунтової кірки.

Фактична густота рослин на час повних сходів формувалася відповідно до норм висіву та показників польової схожості. У монокультурі кукурудзи вона становила 67,2–67,4 тис./га, що відповідало 96,0–96,3% розрахункової густоти. Низький коефіцієнт варіації (CV = 0,15%) свідчить про високу точність сівби та рівномірність розміщення рослин за використання сучасних ґрунтообробних агрегатів і сівалок.

У бінарних посівах густота кукурудзи на час сходів залишалася на рівні монокультури (67,2–67,4 тис./га), що підтверджує ефективність технології сумісної сівби. Водночас густота рослин сої в бінарних посівах становила 212,6–213,8 тис./га за норми висіву 225 тис. насінин/га, що відпідало 94,5–95,0% від заданої густоти. Це на 6,4–7,1% перевищувало показники польової схожості, що пояснюється покращеними мікрокліматичними умовами у змішаних агроценозах.

Таблиця 2. Схожість та густота кукурудзи і сої в моно- та бінарних посівах (середнє за 2021–2025 рр.)

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	Схожість, %		Густота на час ..., тис. шт./га	
		лабор-на	польова	повних сходів	збирання
‘РЖТ Занетіккс’	Контроль без добрив	95,3	91,2	67,4	63,5
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	95,3	91,3	67,2	63,8
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	95,3	91,2	67,2	64,0
‘Сірелія’	Контроль без добрив	93,0	88,2	431,6	412,1
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	93,0	87,8	426,2	408,6
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	93,0	88,1	427,5	410,4
‘РЖТ Сакуза’	Контроль без добрив	93,0	87,9	426,6	408,0
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	93,0	88,2	427,5	409,9
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	93,0	88,1	427,1	410,0
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘Сірелія’ (лише кукурудза)	Контроль без добрив	95,3	91,4	67,2	63,4
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	95,3	91,1	67,4	64,0
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	95,3	91,3	67,3	64,0
‘РЖТ ‘Занетіккс’ + ‘Сірелія’ (лише соя)	Контроль без добрив	93,0	88,1	213,1	194,5
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	93,0	87,9	212,6	195,2
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	93,0	87,9	213,8	196,9
‘РЖТ Занетіккс’ + Сірелія’ (сумарно)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘РЖТ Сакуза’ (лише кукурудза)	Контроль без добрив	95,3	91,4	67,3	63,4
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	95,3	91,4	67,3	63,8
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	95,3	91,2	67,2	63,8
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘РЖТ Сакуза’ (лише соя)	Контроль без добрив	93,0	87,9	213,3	194,3
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	93,0	88,0	213,1	195,2
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	93,0	88,1	213,5	196,4
‘РЖТ Занетіккс’ + ‘РЖТ Сакуза’ (сумарно)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
$HIP_{0,05}$		1,0	0,8	1,6/5,2	1,0/4,7

У монокультурі сої густота рослин на час повних сходів становила 426,2–431,6 тис./га, або 94,7–95,9% від норми висіву. Незначний вплив удобрення на густоту сходів, коливання якої не перевищували 5,4 тис. шт./га, свідчить про другорядну роль мінерального живлення на початкових етапах розвитку культури.

Збереженість рослин від сходів до збирання є важливим інтегральним показником стійкості агроценозів до біо- та абіотичних чинників. У монокультурі кукурудзи виживаність становила 94,2–95,2%, що забезпечувало формування густоти перед збиранням на рівні 63,5–64,0 тис./га. Втрати 3,7–3,9 тис./га (5,5–5,8%) зумовлені внутрішньовидовою конкуренцією, пошкодженням шкідниками та механічними ушкодженнями під час догляду за посівами.

Застосування добрив незначно підвищувало виживаність кукурудзи з 94,2% на контролі до 95,2% за внесення $N_{90}P_{60}K_{60}$. Це пов’язано з кращим розвитком кореневої системи та підвищенням стійкості рослин до стресових факторів за оптимального мінерального живлення.

У бінарних посівах виживаність кукурудзи становила 94,3–95,1% і практично не відрізнялася від монокультури, що спростовує припущення про негативний вплив міжвидової конкуренції з боку сої та підтверджує комплементарність культур у використанні ресурсів.

Соя мала нижчу виживаність порівняно з кукурудзою. У монокультурі збереженість рослин становила 95,4–96,0%, що призводило до зменшення густоти з 426,2–431,6 тис./га на час сходів до 408,0–412,1 тис./га перед збиранням. Абсолютні втрати 17,1–19,5 тис./га були в 4,9–5,3 раза вищими, ніж у кукурудзи, водночас відносні втрати на рівні 4,0–4,6% залишалися порівнянними.

У бінарних посівах виживаність сої знижувалася до 91,3–92,1%, що зумовлювало густоту 194,3–196,9 тис./га перед збиранням. Підвищені втрати 8,6–9,1% пов'язані з частковим затіненням рослин сої високорослою кукурудзою в критичні фази розвитку. Водночас абсолютна кількість збережених рослин забезпечувала формування повноцінного врожаю.

Системи удобрення мали мінімальний вплив на показники схожості та густоти кукурудзи. Різниця в польовій схожості між контролем і максимальним рівнем удобрення не перевищувала 0,1%, а густота рослин перед збиранням коливалася в межах 63,5–64,0 тис./га з тенденцією до незначного зростання (на 0,5 тис. /га) за інтенсифікації удобрення.

Відсутність істотного впливу добрив на густоту кукурудзи свідчить про достатній рівень забезпеченості ґрунту елементами живлення в умовах проведення досліджень. Основний ефект удобрення проявлявся на пізніших етапах онтогенезу через стимуляцію ростових процесів і формування продуктивності.

Аналогічно, соя виявляла слабку реакцію на удобрення щодо формування густоти посівів. У монокультурі коливання густоти перед збиранням не перевищували 4,3 тис./га (1,0%), тоді як у бінарних посівах варіабельність була ще меншою і становила 2,4–2,6 тис./га (1,2–1,3%).

Стабільність густоти сої за різних рівнів мінерального живлення пояснюється біологічними особливостями культури, зокрема здатністю до симбіотичної азотфіксації, яка частково компенсує дефіцит азоту на ранніх етапах розвитку. Високі дози мінеральних добрив можуть пригнічувати формування бульбочок, що нівелює позитивний ефект удобрення.

Розрахунок індексу регулярності розміщення рослин за Морісітой показав, що в монокультурі кукурудзи він становив 0,92–0,94, наближаючись до випадкового розподілу (1,0). У бінарних посівах індекс знижувався до 0,87–0,89, що свідчить про тенденцію до агрегованого розміщення рослин, зумовлену неоднорідністю міжвидових конкурентних взаємодій.

Коефіцієнт варіації густоти по площі поля становив 8,2–9,1% у монокультурі кукурудзи та 11,3–12,7% у бінарних посівах. Підвищена просторова гетерогенність змішаних агроценозів компенсувалася ефективнішим використанням екологічних ніш і зростанням загальної продуктивності.

Кореляційний аналіз виявив помірний позитивний зв'язок між густотою стояння та врожайністю кукурудзи (r = 0,52–0,58) у діапазоні 60–70 тис./га. Для сої зв'язок був слабшим (r = 0,31–0,37) унаслідок високої пластичності культури та здатності компенсувати знижену густоту завдяки посиленому гілкуванню.

У бінарних посівах взаємозв'язок густоти з продуктивністю мав складніший характер через міжвидову взаємодію. Множинний регресійний аналіз показав, що оптимальне співвідношення густоти кукурудзи до сої становило 1:3,0–3,1, тоді як фактичне співвідношення 1:3,05–3,08 було близьким до оптимального.

Поєднання фенологічної стабільності кукурудзи та морфологічної пластичності сої забезпечує підвищену стійкість бінарних агроценозів до мінливості погодних умов і високу ймовірність формування стабільних урожаїв.

У фазі п'ятого листка висота рослин кукурудзи в монокультурі становила 19,8 см на контролі, що відповідає нормальному рівню розвитку для гібриду середньостиглої групи. Внесення добрив стимулювало початковий ріст: приріст висоти становив 0,9 см (4,5%) за $N_{60}P_{45}K_{45}$ та 1,7 см (8,6%) за $N_{90}P_{60}K_{60}$, що зумовлено активізацією меристематичної діяльності під впливом азоту і фосфору (табл. 3).

У бінарних посівах висота кукурудзи на цьому етапі практично не відрізнялася від монокультури і становила 19,7–19,9 см на контролі та 20,7–21,7 см за удобрення. Відсутність конкурентного впливу сої пояснюється її незначною висотою (6,3–7,9 см) і слабким розвитком кореневої системи на початкових етапах росту.

Середньодобовий приріст висоти в період від сходів до фази п'ятого листка становив 0,74–0,81 см/добу, що свідчить про оптимальні умови росту. Коефіцієнт варіації висоти між окремими рослинами не перевищував 8,2%, що вказує на вирівняність посівів.

Період від п'ятого листка до появи волоті характеризувався максимальними темпами росту. У монокультурі на контролі висота кукурудзи досягала 187,2 см, що в 9,5 раза перевищувало показники попередньої фази. Середньодобовий приріст становив 3,2 см/добу і відповідав фазі інтенсивного лінійного росту.

Застосування добрив суттєво стимулювало ростові процеси: висота рослин збільшувалася до 195,6 см за $N_{60}P_{45}K_{45}$ (на 4,5%) і до 204,3 см за $N_{90}P_{60}K_{60}$ (на 9,1%). Це зумовлено подовженням міжвузлів під впливом азоту та покращенням водного статусу рослин.

У бінарних посівах висота кукурудзи в цю фазу була незначно меншою на контролі (186,8–187,6 см) і практично відповідала монокультурі за умов удобрення. Виявлена тенденція може бути пов'язана з початком міжвидової конкуренції за поживні речовини з боку сої, яка в цей період переходить до інтенсивного росту.

Таблиця 3. Висота рослин кукурудзи та сої в моно- та бінарних посівах (середнє за 2021–2025 рр.)

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	5-й листок (три справж. листка в сої)	Поява волоті (бутонізація сої)	Цвітіння волоті (цвітіння сої)	Повна стиглість зерна
'РЖТ Занетіккс'	Контроль без добрив	19,8	187,2	200,9	241,5
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	20,7	195,6	210,0	252,3
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	21,5	204,3	219,2	263,5
'Сірелія'	Контроль без добрив	6,0	55,8	59,9	72,0
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	6,1	57,6	61,8	74,3
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	6,1	58,1	62,4	75,0
'РЖТ Сакуза'	Контроль без добрив	7,5	70,6	75,8	91,1
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	7,7	72,5	77,8	93,5
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	7,9	74,3	79,8	95,9
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	19,7	186,8	200,6	241,0
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	20,9	196,0	210,6	253,1
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	21,7	205,0	220,0	264,5
'РЖТ 'Занетіккс' + 'Сірелія' (лише соя)	Контроль без добрив	6,3	59,5	63,9	76,8
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	6,8	64,5	69,2	83,2
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	7,3	69,0	74,1	89,0
'РЖТ Занетіккс' + Сірелія' (сумарно)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	19,9	187,6	201,3	242,0
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	20,7	196,2	210,5	253,1
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	21,6	205,3	220,4	265,0
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише соя)	Контроль без добрив	7,9	75,1	80,6	96,9
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	8,2	77,9	83,6	100,5
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	9,2	87,1	93,5	112,3
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (сумарно)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
$НІР_{0,05}$		2,3/0,4	11,0/2,5	12,2/3,0	13,6/2,9

У фазі цвітіння волоті висота кукурудзи досягала 200,9 см на контролі в монокультурі, що лише на 7,3% більше попередньої фази. Це свідчить про завершення основного росту та перехід до репродуктивного розвитку. За удобрення висота зростала до 210,0–219,2 см, причому ефект був пропорційний нормам добрив. До фази повної стиглості висота рослин продовжувала незначно збільшуватися за рахунок подовження верхніх міжвузлів і волоті, досягаючи 241,5 см у контролі та 263,5 см за внесення $N_{90}P_{60}K_{60}$. Загальний приріст порівняно з контролем становив 9,1% за помірного та 15,5% – за інтенсивного удобрення.

У бінарних посівах фінальна висота кукурудзи (241,0–242,0 см у контролі, 264,5–265,0 см за внесення $N_{90}P_{60}K_{60}$) практично не відрізнялася від монокультури або навіть незначно її перевищувала. Це, на перший погляд, парадоксальне явище може пояснюватися стимулювальним впливом кореневих виділень сої, а також поліпшенням азотного живлення кукурудзи завдяки біологічній фіксації азоту бобовою культурою.

Сорт ‘Сірелія’ характеризувався компактним габітусом: висота рослин становила 6,0 см у фазу трьох листків, 55,8 см – у фазі бутонізації, 59,9 см – під час цвітіння та 72,0 см – у фазі повної стиглості на контролі. Застосування мінеральних добрив не мало незначного впливу на показник висоти: приріст за максимального рівня удобрення не перевищував 3,2–4,2%.

Сорт ‘РЖТ Сакуза’ формував вищі рослини порівняно із ‘Сірелія’: 7,5 см у початкові фази росту та 91,1 см у фазі повної стиглості в контролі. Це на 26,5% перевищувало відповідні показники ‘Сірелія’, що узгоджується з його сортовими особливостями. Реакція на мінеральне удобрення була дещо істотнішою: за внесення $N_{90}P_{60}K_{60}$ приріст висоти становив 5,3%.

Динаміка росту рослин сої характеризувалася наявністю двох виражених піків. Перший пік припадав на період від фази трьох листків до бутонізації, коли приріст висоти становив 49,8–63,1 см. Другий пік спостерігався у проміжку від цвітіння до повної стиглості з приростом 12,1–16,1 см. У період між бутонізацією та цвітінням інтенсивність росту істотно знижувалася, а приріст не перевищував 4,1–5,5 см.

У змішаних посівах простежувалася тенденція до збільшення висоти рослин сої. Зокрема, ‘Сірелія’ досягав 76,8 см на контролі, що на 6,7% більше порівняно з монокультурою, та 89,0 см за внесення $N_{90}P_{60}K_{60}$ (+18,7%). Сорт ‘РЖТ Сакуза’ формував відповідно 96,9 см на контролі (+6,4%) та 112,3 см за інтенсивного удобрення (+17,1%).

Стимуляція росту сої в бінарних посівах зумовлена явищем етіоляції – подовженням стебел у відповідь на часткове затінення рослинами кукурудзи. Така реакція має адаптивний характер і спрямована на оптимізацію світлового живлення в умовах міжвидової конкуренції. Подовження міжвузлів на 15–20% супроводжується зменшенням їх діаметра та механічної міцності.

Найвиразніший ефект спостерігався за поєднання бінарних посівів з інтенсивним удобренням: висота рослин ‘РЖТ Сакуза’ досягала 112,3 см, що на 23,3% перевищувало показник у монокультурі. Водночас надмірне витягування стебел може негативно впливати на стійкість рослин до вилягання, особливо за умов підвищеної вологості.

Аналіз співвідношення висот компонентів агроценозу засвідчив формування чітко вираженої ярусної структури. У фазі цвітіння кукурудза перевищувала сою за висотою в 3,14–3,35 раза на контролі та у 2,36–2,97 раза за умов удобрення. Зменшення цього співвідношення за інтенсифікації живлення пояснюється сильнішою ростовою реакцією сої на добрива в умовах затінення. Оптимальна ярусність формувалася за висоти кукурудзи 200–210 см та сої 60–70 см, що забезпечувало мінімальне перекриття листкових поверхонь. За такої просторової структури коефіцієнт використання світла досягав 0,82–0,85, тоді як у монокультурах він становив лише 0,71–0,74.

Вертикальний розподіл листкової маси показав, що 65–70% листя кукурудзи розміщувалося вище 120 см, тоді як 80–85% листя сої концентрувалося нижче 80 см. Зона перекриття ярусів (80–120 см) містила лише 15–20% загальної листкової поверхні, що суттєво знижувало рівень конкуренції за світло.

Формування ярусної диференціації розпочиналося з фази 5–7 листків кукурудзи, коли різниця у висоті компонентів агроценозу досягала 13–14 см. До фази викидання волоті цей розрив зростав до 111–118 см, а за повної стиглості – до 151–165 см. Критичний період формування ярусності припадав на 40–60-ту добу вегетації, коли темпи росту кукурудзи були максимальними (3,5–4,0 см/добу), а сої – помірними (1,2–1,5 см/добу). Саме в цей період закладалася архітектоніка агроценозу, що визначає його подальшу продуктивність.

Кореляційний аналіз виявив помірний позитивний зв'язок між висотою рослин кукурудзи та врожайністю (r = 0,58–0,63). Оптимальна висота для досягнення максимальної продуктивності становила 250–260 см. За перевищення цього рівня зростала ймовірність вилягання та знижувалася ефективність фотосинтезу нижніх листків.

Для сої кореляційний зв'язок між висотою рослин і врожайністю був слабшим (r = 0,42–0,47), що зумовлено дією компенсаторних механізмів: низькорослі рослини формували більшу кількість бічних гілок. У бінарних посівах сила цього зв'язку зростала (r = 0,51–0,56), оскільки висота рослин безпосередньо визначала доступ до світлових ресурсів.

Висота рослин тісно корелювала з накопиченням сухої речовини: r = 0,78–0,82 для кукурудзи та r = 0,71–0,75 для сої. Регресійний аналіз показав, що кожні 10 см приросту висоти кукурудзи забезпечували додаткове накопичення 0,35–0,42 т/га сухої маси, тоді як для сої – 0,18–0,22 т/га. У бінарних посівах ефективність конверсії приросту висоти в біомасу знижувалася на 12–15% унаслідок зміни алокації асимілятів, коли більша їх частка спрямовувалася на подовження стебел завдяки розвитку листкової поверхні.

У змішаних посівах у кукурудзи спостерігалися морфологічні адаптації: листки орієнтувалися під більшим кутом (75–80° проти 65–70° у монокультурі), що покращувало проникнення світла в нижні яруси. Висота прикріплення качана зростала на 5–8 см, імовірно, як адаптивна реакція на міжвидову конкуренцію. Діаметр стебла в нижній частині зменшувався на 3–5%, однак це компенсувалося кращим розвитком опорних коренів. Механічна стійкість рослин залишалася достатньою: рівень вилягання не перевищував 2–3% навіть за максимальної висоти.

Соя в бінарних посівах проявляла виражену фототропну реакцію: стебла відхилялися від вертикалі на 10–15° у напрямку міжрядь кукурудзи. Кількість бічних гілок зменшувалася на 25–30%, проте їх довжина зростала на 15–20%. Площа листків збільшувалася на 12–18%, водночас вони ставали тоншими. Питома листкова поверхня зростала з 180–200 до 220–240 см^2/г, що є типовою адаптацією рослин до умов затінення. Подовження черешків на 20–25% забезпечувало ефективніше просторове розміщення листків.

Забур'яненість посівів є одним із ключових чинників, що лімітують продуктивність агроценозів, спричиняючи втрати врожаю від 15 до 70% залежно від видового складу та щільності бур'янової рослинності. В умовах екологізації землеробства особливої актуальності набувають біоценотичні методи контролю забур'яненості, серед яких важливе місце посідає оптимізація структури посівів. Бінарні агроценози, завдяки підвищеній конкурентній здатності культурних рослин та алелопатичним взаємодіям, здатні забезпечувати природну супресію бур'янів.

У фазі появи волоті кукурудзи на контролі без добрив щільність бур'янів становила 12,2 шт./м^2 за сухої маси 78,3 г/м^2, що відповідає середньому рівню забур'яненості для умов Лісостепу. Застосування міндобрив сприяло зростанню забур'яненості – до 15,6 шт./м^2 у разі $N_{60}P_{45}K_{45}$ (+27,9%) та до 17,9 шт./м^2 за $N_{90}P_{60}K_{60}$ (+46,7%). Це пояснюється стимуляцією проростання насіння бур'янів і поліпшенням умов їх росту. Суха маса бур'янової рослинності зростала відповідно до 89,5 та 95,1 г/м^2 (табл. 4).

До фази молочної стиглості забур'яненість на контролі залишалася відносно стабільною (12,7 шт./м^2), однак суха маса бур'янів збільшувалася до 136,5 г/м^2 (+74,3%) унаслідок подальшого накопичення біомаси. За умов удобрення спостерігалося суттєве зростання забур'яненості – до 28,9 шт./м^2 за $N_{60}P_{45}K_{45}$ та 35,6 шт./м^2 за $N_{90}P_{60}K_{60}$, що пов'язано з формуванням другої хвилі бур'янів.

Коефіцієнт домінування Сімпсона зростав з 0,42 на контролі до 0,56 при $N_{90}P_{60}K_{60}$, що свідчить про спрощення структури бур'янового угруповання та домінування кількох агресивних видів. Такі зміни ускладнюють контроль забур'яненості через формування висококонкурентних і потенційно резистентних популяцій.

Соя загалом проявляла вищу конкурентну здатність щодо бур'янів порівняно з кукурудзою. Зокрема, сорт 'Сірелія' на контролі у фазу бутонізації характеризувався забур'яненістю 10,3 шт./м^2 за сухої маси 56,2 г/м^2, що було відповідно на 15,6 та 28,2% менше, ніж у посівах кукурудзи. Це зумовлено швидким змиканням рядків сої та ефективним затіненням поверхні ґрунту.

Сорт 'РЖТ Сакуза' мав дещо вищу початкову забур'яненість (14,0 шт./м^2), проте меншу суху масу бур'янів (55,4 г/м^2), що свідчить про стримування їхнього росту на пізніших етапах розвитку агроценозу.

Таблиця 4. Забур'яненість посівів в моно- та бінарних посівах (середнє за 2021–2025 рр.)

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	Поява волоті		Молочна стиглість	
		кількість, шт./м²	суха маса, г/м²	кількість, шт./м²	суха маса, г/м²
'РЖТ Занетіккс'	Контроль без добрив	12,2	78,3	12,7	136,5
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	15,6	89,5	28,9	159,2
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	17,9	95,1	35,6	175,6
'Сірелія'	Контроль без добрив	10,3	56,2	11,5	85,5
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	14,0	60,1	14,0	110,0
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	23,0	72,2	16,6	123,4
'РЖТ Сакуза'	Контроль без добрив	14,0	55,4	12,0	92,0
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	17,0	63,3	15,2	110,5
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	20,0	68,7	17,8	128,0
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
'РЖТ 'Занетіккс' + 'Сірелія' (лише соя)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
'РЖТ Занетіккс' + Сірелія' (сумарно)	Контроль без добрив	4,5	33,0	1,8	44,9
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	5,6	37,9	2,0	55,0
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	6,0	42,3	2,2	63,2
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише соя)	Контроль без добрив	–	–	–	–
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	–	–	–	–
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	–	–	–	–
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖ Сакуза' (сумарно)	Контроль без добрив	5,0	30,0	2,0	41,2
	$N_{60}P_{45}K_{45}$	6,3	35,8	2,2	53,3
	$N_{90}P_{60}K_{60}$	7,2	40,0	2,5	55,6
	$НІР_{0,05}$	0,6	1,5	1,1	5,2

За умов удобрення забур'яненість посівів сої зростала менш інтенсивно, ніж у кукурудзи: до 14,0–17,0 шт./м² за $N_{60}P_{45}K_{45}$ та 16,6–20,0 шт./м² за $N_{90}P_{60}K_{60}$. Приріст сухої маси бур'янів був помірним і становив 7,0–17,3% за помірного та 28,4–44,3% за інтенсивного удобрення.

До фази достигання забур'яненість сої змінювалася незначно: приріст становив 11,7–18,6% за кількістю та 52,1–86,3% за масою. Це різко контрастує з кукурудзою, у посівах якої за удобрення приріст забур'яненості досягав 85,3–98,9% за кількістю. Відносна стабільність забур'яненості сої пояснюється підтриманням високого проєктивного покриття (85–90%) упродовж більшої частини вегетації.

Бінарні посіви характеризувалися вираженим супресивним ефектом щодо бур'янової рослинності. У комбінації 'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' забур'яненість становила лише 4,5 шт./м² на контролі, що у 2,7 раза менше порівняно з монокультурою кукурудзи та у 2,3 раза – з монокультурою сої. Суха маса бур'янів (33,0 г/м²) була нижчою відповідно на 57,9 і 41,3%.

У разі удобрення забур'яненість у бінарних посівах зростала незначно – до 5,6–6,0 шт./м² за $N_{60}P_{45}K_{45}$ та 6,0–7,2 шт./м² за $N_{90}P_{60}K_{60}$, що у 2,8–3,0 рази менше, ніж у монокультурі кукурудзи за аналогічного рівня мінерального живлення. Приріст сухої маси бур'янів становив лише 14,8–28,2% проти 14,3–21,5% у монокультурах.

Комбінація з 'РЖТ Сакуза' продемонструвала подібні результати: 5,0 шт./м² на контролі та 6,3–7,2 шт./м² за умов удобрення. Незначна різниця між бінарними комбінаціями (0,5–

1,2 шт./м²) свідчить про універсальність супресивного ефекту бінарних посівів незалежно від сортового складу сої.

Висока ефективність бінарних посівів у контролі забур'яненості забезпечується сукупністю взаємодоповнювальних механізмів. Підвищене проєктивне покриття фітоценозу (95–98% проти 75–80% у монокультурах) суттєво обмежує доступ світла до поверхні ґрунту, пригнічуючи проростання фотобластичного насіння бур'янів. Чітко виражена ярусність фітоценозу формує градієнт освітленості від 100% над рослинами до 3–5% на рівні ґрунту, що є критичним для більшості бур'янів (порогове значення – 10–15% ФАР). Додаткову роль відіграє алелопатична взаємодія: кореневі виділення сої містять фенольні сполуки та ізофлавоноїди, які інгібують проростання насіння і ріст проростків бур'янів на 25–40%. Важливим фактором є також конкуренція за ресурси: комплементарне використання елементів живлення та води культурами-компонентами обмежує ресурсну базу бур'янів.

Аналіз динаміки забур'яненості показав, що супресивний ефект бінарних посівів посилювався впродовж вегетації. У фазу молочної стиглості забур'яненість становила лише 1,8–2,5 шт./м², що у 2,5 раза менше порівняно з початковим рівнем. На відміну від цього, в монокультурах кількість бур'янів зростала або залишалася стабільною. Суха маса бур'янів наприкінці вегетації (41,2–63,2 г/м²) була у 3,0–3,3 раза нижчою, ніж у монокультурі кукурудзи (136,5–175,6 г/м²), що свідчить не лише про зменшення чисельності бур'янів, а й про пригнічення росту окремих рослин.

Розрахунок потенційних втрат урожайності показав, що в монокультурі кукурудзи кожні 10 г/м² сухої маси бур'янів знижують урожайність на 0,08–0,11 т/га. За забур'яненості 136,5–175,6 г/м² потенційні втрати врожаю становили 1,09–1,93 т/га, або 15,0–18,5%.

Для сої коефіцієнт шкодочинності був вищим – 0,12–0,15 т/га на кожні 10 г/м² сухої маси бур'янів. За забур'яненості 85,5–128,0 г/м² втрати врожаю досягали 1,03–1,92 т/га, або 45,6–68,6% потенційної продуктивності, що зумовлено повільнішим початковим ростом культури.

У бінарних посівах за рівня забур'яненості 41,2–63,2 г/м² втрати врожайності не перевищували 0,33–0,57 т/га, що відповідало 3,3–3,9% сумарного врожаю. Це нижче економічного порога шкодочинності (5%), що створює передумови для відмови від застосування хімічних гербіцидів. Зниження рівня забур'яненості в бінарних посівах дає змогу зекономити витрати, еквівалентні одній-двом гербіцидним обробкам. Екологічний ефект від зменшення пестицидного навантаження оцінюється щонайменше у 500–700 грн/га завдяки збереженню корисної ентомофауни та ґрунтової мікробіоти.

Найкритичнішим для формування забур'яненості був період 20–50 діб після сівби, коли культурні рослини ще не сформували зімкнутий покрив. У монокультурах у цей час з'являлося 75–80% загальної кількості бур'янів, тоді як у бінарних посівах критичний період скорочувався до 20–35 діб завдяки швидшому змиканню рядків. Це створює можливості для оптимізації строків і кратності захисних заходів за потреби додаткового контролю.

Оптимізація густоти стояння культур (65–70 тис. рослин/га кукурудзи + 200–225 тис. рослин/га сої) забезпечувала максимальний супресивний ефект. Відхилення від цих параметрів на ± 10% знижувало ефективність контролю забур'яненості на 15–20%. Висока рівномірність розміщення рослин (CV < 15%) є критично важливою для формування суцільного фітоценотичного покриву.

Система удобрення має бути збалансованою, оскільки надлишок азоту стимулює ріст бур'янів сильніше, ніж культурних рослин. Оптимальне співвідношення N : P : K = 1 : 0,75 : 0,75 мінімізує конкурентну перевагу бур'янової рослинності та сприяє стабільності агроценозу.

Висновки

Висока польова схожість насіння у всіх варіантах досліду (91,1–91,4% для кукурудзи та 87,8–88,2% для сої) свідчить про оптимальність застосованих агротехнічних заходів сівби та сприятливість ґрунтово-кліматичних умов регіону. Ефективність бінарних посівів підтверджується збереженням оптимальної густоти стояння обох компонентів (63,4–64,0 тис. рослин/га кукурудзи та 194,3–196,9 тис. рослин/га сої) за високої виживаності рослин (94,3–95,1 та 91,3–92,1% відповідно). Мінімальний вплив удобрення на формування густоти (коливання в межах 0,8–1,3%) указує на достатню забезпеченість ґрунту елементами живлення для початкового росту культур і другорядну роль мінерального живлення на етапі формування густоти стояння.

Застосування $N_{90}P_{60}K_{60}$ сприяло збільшенню висоти рослин у монокультурі: кукурудзи – на 9,1–15,5%, сої – на 4,2–5,3%, що пов'язано з активізацією меристематичної діяльності та подовженням міжвузлів. Водночас фінальна висота кукурудзи в бінарних посівах (241,0–265,0 см) не поступалася показникам монокультури або лише незначно їх перевищувала, що свідчить про відсутність негативного впливу міжвидової конкуренції.

Збільшення висоти рослин сої в бінарних посівах на 6,7–23,3% є адаптивною реакцією на часткове затінення та забезпечує ефективний доступ до світла в умовах сформованої ярусної структури агроценозу. Визначено, що співвідношення висот кукурудза : соя = 3,1–3,4 : 1 забезпечує мінімальне перекриття листкових поверхонь і високий коефіцієнт використання світла – 0,82–0,85.

Доведено, що критичний період формування архітектури агроценозу припадає на 40–60-ту добу вегетації, коли різниця темпів росту культур є максимальною (3,5–4,0 см/добу для кукурудзи проти 1,2–1,5 см/добу для сої). Виявлено помірний позитивний кореляційний зв'язок між висотою рослин і продуктивністю: r = 0,58–0,63 для кукурудзи та r = 0,51–0,56 для сої в бінарних посівах, що підтверджує визначальну роль висоти у формуванні врожайності.

Зниження забур'яненості в бінарних посівах до 4,5–7,2 шт./м² порівняно з 12,2–35,6 шт./м² у монокультурах (у 2,7–4,9 раза) забезпечується комплексом фітоценотичних механізмів. Одночасно спостерігалася суттєва супресія сухої маси бур'янів: 30,0–63,2 г/м² у бінарних посівах проти 78,3–175,6 г/м² у монокультурі кукурудзи, що відповідало зниженню на 57,9–64,0% і мінімізувало конкуренцію за ресурси.

Інтенсивне удобрення ($N_{90}P_{60}K_{60}$) у монокультурах спричиняло різке зростання забур'яненості – на 46,7–180,3%, тоді як у бінарних посівах приріст був помірним і становив 33,3–60,0%. Нижчі значення коефіцієнта варіації забур'яненості в бінарних посівах (18,5–22,3%) порівняно з монокультурами (32,4–38,6%) свідчать про стабільність і надійність природного фітоценотичного контролю бур'янової рослинності.

Список використаних джерел

1. Đalović, I., Šeremešić, S., Chen, Y., Miloševic, D., Biberdžić, M., & Crops, V. (2020). Yield and nutritional status of different maize genotypes in response to rates and splits of mineral fertilization. *International Journal of Agriculture and Biology*, *23*(6), 1141–1148. https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1396

2. Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1312*(1), 105–112. https://doi.org/10.1111/nyas.12396

3. Kolibabchuk, T. V., Kuzmenko, O. V., Zarva, O. I., & Liubych, V. V. (2022). Yield and grain quality of soft winter wheat depending on the sowing rate. *Agrobiology*, *1*, 168–178. https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-168-178 [In Ukrainian]

4. Xiao, G., Zhao, Z., Liang, L., Meng, F., Wu, W., & Guo, Y. (2019). Improving nitrogen and water use efficiency in a wheat–maize rotation system in the North China Plain using optimized farming practices. *Agricultural Water Management*, *212*, 172–180. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.011

5. Tremblay, N., Bouroubi, Y., Bélec, C., Mullen, R., Kitchen, N., & Thomason, W. (2012). Corn response to nitrogen is influenced by soil texture and weather. *Agronomy Journal*, *104*(6), 1658–1671. https://doi.org/10.2134/agronj2012.0184

6. Pasley, H. R., Cairns, J. E., Camberato, J. J., & Vyn, T. J. (2019). Nitrogen fertilizer rate increases plant uptake and soil availability of essential nutrients in continuous maize production in Kenya and Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *115*, 373–389. https://doi.org/10.1007/s10705-019-10016-1

7. Djalovic, I., Riaz, M., Akhtar, K., Bekavac, G., Paunovic, A., Pejanovic, V., Zaheer, S., & Prasad, P. V. V. (2022). Yield and grain quality of divergent maize cultivars under inorganic N fertilizer regimes and Zn application depend on climatic conditions in calcareous soil. *Agronomy*, *12*(11), Article 2705. https://doi.org/10.3390/agronomy12112705

8. Randall, G. W., Vetsch, J. A., & Huffman, J. R. (2003). Nitrate losses in subsurface drainage from a corn–soybean rotation as affected by time of nitrogen application and use of nitrapyrin. *Journal of Environmental Quality*, *32*, 1764–1772. https://doi.org/10.2134/jeq2003.1764

9. Barșon, G., Șopterean, L., Suciu, L. A., Crișan, I., & Duda, M. M. (2021). Evaluation of agronomic performance of maize (*Zea mays* L.) under a fertilization gradient in Transylvanian Plain. *Agriculture*, *11*(9), Article 896. https://doi.org/10.3390/agriculture11090896

10. Bertin, P., & Gallais, A. (2000). Physiological and genetic basis of nitrogen use efficiency in maize. I. Agrophysiological results. *Maydica*, *45*, 53–66.
11. 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]
12. Ermantraut, E. R., Prysiazhniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic research data in the Statistica 6.0 package: guidelines*. Polihraf Konsaltynh. [In Ukrainian]

Structure of monocrops and mixed crops of maize and soybean

V. A. Mokriienko

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

Corresponding author: Volodymyr Mokriienko, mokrienko@ukr.net

Citation: Mokriienko, V. A. (2025). Structure of monocrops and mixed crops of maize and soybean. *Bioenergy*, *2*, 45–56. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp45-56

Aim. To establish the patterns of plant density, survival, and spatial structure of maize and soybean in monocrops and mixed crops under different levels of mineral nutrition in the Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** The study was conducted in 2021–2025 in a stationary field experiment of the Department of Crop Production, Agronomic Research Station of NULES of Ukraine (Kyiv region). Monocrops and mixed sowings of maize ('RGT Zanetixx') and soybean ('Sirelia', 'RGT Sakuza') were compared under three fertilisation systems: without fertilisers, $N_{60}P_{45}K_{45}$, and $N_{90}P_{60}K_{60}$. Laboratory and field germination, plant density at full emergence and harvest, survival coefficients, variability of plant distribution, and correlations with plant productivity were analysed. **Results.** Field germination of maize was 91.1–91.4%, and soybean 87.8–88.2%, indicating favourable conditions for the formation of mixed crops. In binary agrocenoses, optimal maize density at harvest was maintained at 63.4–64.0 thousand plants/ha with survival of 94.3–95.1%, while soybean density was 194.3–196.9 thousand plants/ha with survival of 91.3–92.1%. The minor effect of fertilisation on density (0.8–1.3%) indicates sufficient soil nutrient supply at early growth stages. Application of $N_{90}P_{60}K_{60}$ increased plant height in monocrop (maize by 9.1–15.5%, soybean by 4.2–5.3%), whereas in mixed crops maize height (241.0–265.0 cm) did not decrease, indicating absence of negative interspecific competition. Soybean height in binary crops increased by 6.7–23.3% as an adaptation to partial shading. It was calculated that a maize-to-soybean height ratio of 3.1–3.4 to 1 ensures minimal overlap of leaf surfaces and efficient light use (coefficient 0.82–0.85). The critical period of agrocenosis architecture formation occurred on days 40–60 of vegetation, when maize growth rates (3.5–4.0 cm/day) significantly exceeded those of soybean (1.2–1.5 cm/day). A moderate positive correlation was established between plant height and productivity (r = 0.58–0.63 in maize and r = 0.51–0.56 in soybean). Mixed crops reduced weed infestation to 4.5–7.2 plants/m² compared with 12.2–35.6 plants/m² in mono crops (2.7–4.9 times) and weed dry mass by 57.9–64.0%. Under intensive fertilisation, weed infestation in mono crops increased significantly (by 46.7–180.3%), whereas in mixed crops the increase was moderate (33.3–60.0%). **Conclusions.** The results indicate that mixed crops ensure stable formation of optimal crop density and create a spatial structure of the agrocenosis that enhances adaptability and productive resilience of the system.

Keywords: maize; soybean; mixed crops; plant density; germination; plant survival; spatial distribution; productivity.

ORCID
Володимир Мокрієнко / Volodymyr Mokriienko https://orcid.org/0000-0002-5604-442X

2025 • № 2 • С. 57–66
https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp57-66

Оригінальні дослідження

УДК 633.9:631.54

Визначення меж агрономічної ефективності вирощування біоенергетичних культур в умовах Лісостепу України

О. І. Присяжнюк*, Н. О. Кононюк, О. А. Маляренко, М. О. Черняк, О. Ю. Половинчук, О. М. Гончарук, В. В. Мусіч, О. П. Шевченко

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

**Автор для листування: Олег Присяжнюк, ollpris@gmail.com*

Цитування: Присяжнюк О. І., Кононюк Н. О., Маляренко О. А., Черняк М. О., Половинчук О. Ю., Гончарук О. М., Мусіч В. В., Шевченко О. П. Визначення меж агрономічної ефективності вирощування біоенергетичних культур в умовах Лісостепу України. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 57–66. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp57-66

Мета. Установити межі агрономічної ефективності вирощування біоенергетичних культур (міскантусу гігантського та верби енергетичної) в умовах Лісостепу України з урахуванням ґрунтово-кліматичної диференціації, особливостей наявного землекористування та потенціалу маргінальних земель. **Методи.** Польові дослідження у Правобережному Лісостепу (дослідне поле ІБКіЦБ НААН, с. Ксаверівка Друга, 2020–2024 рр.); узагальнення підтверджених площ наявних плантацій у дев'яти областях Лісостепу; агрокліматичне зонування (Західний, Центральний та Східний Лісостеп); інвентаризація земель, що потребують консервації, і малопродуктивних ґрунтів; модель придатності (коефіцієнти залучення 10–20% для міскантусу та 5–15% для верби на відповідних категоріях земель); оцінювання виходу твердого біопалива та частки заміщення викопного палива до 2035 р. **Результати.** Підтверджено наявність 807 га плантацій у Лісостепу (≈ 38,4% від 2,1 тис. га по Україні). За біологічними вимогами й структурою земель прогнозні площі становлять: для міскантусу – 190–367 тис. га (у середньому 278,5 тис. га), для верби – 101–248 тис. га (у середньому 174,5 тис. га), разом 291–615 тис. га (≈ 2,6–5,5% орних земель; у середньому 4,0%). З цих площ очікуваний сумарний вихід твердого біопалива становить 6,89–14,18 млн т/рік, що еквівалентно 27,7–57,0% потреб заміни викопного палива у 2035 році. **Висновки.** Найпридатнішими для вирощування міскантусу є добре дреновані суглинки Центрального й Західного Лісостепу; для верби – заплавні та зволожені землі Київщини, Сумщини, Черкащини, Хмельниччини, Тернопільщини, Харківщини. Оптимальне залучення лише невеликої частки орних земель (≈ 4%) дає змогу замістити приблизно до половини потреб у твердому біопаливі у 2035 році без загрози продовольчій безпеки регіону.

Ключові слова: біоенергетичні культури; міскантус гігантський; верба енергетична; маргінальні землі; тверде біопаливо; агрокліматичне зонування.

Вступ

Сільськогосподарська біомаса відіграє провідну роль у забезпеченні харчових потреб, виробництві кормів, а також є цінною сировиною для низки продуктів глибокого перероблення [1]. Протягом останніх років набуло поширення переконання щодо доцільності вирощування біомаси для енергетичних цілей на маргінальних землях. Такий підхід розглядають як компромісне рішення, що дає змогу зберегти традиційне виробництво продуктів харчування на родючих сільськогосподарських угіддях і водночас сприяє переходу до сталого, низь-

Одержано 18.09.2025 • **Погоджено** 09.10.2025 • **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

ковуглецевого розвитку суспільства [2–9]. У цьому контексті реалізуються програми, спрямовані на сприяння й адаптацію спеціалізованих біоенергетичних культур через підвищення їхньої врожайності, якості та здатності пристосуватися до умов маргінальних земель [10–13].

Тим не менш, є значне занепокоєння щодо балансу між продовольчою безпекою, енергетикою та станом довкілля [14]. Перехід до виробництва біоенергії після відмови від викопного палива спричиняє глибокі зміни на глобальному рівні, зумовлені зростанням попиту та конкуренцією за земельні ресурси [15]. Крім того, вирощування біоенергетичних культур супроводжується низкою екологічних викликів, пов'язаних із прямими та непрямими змінами у землекористуванні, впливом на водні ресурси, біорізноманіття та збереження природних середовищ існування [16–18].

Отже, відкритим залишається питання щодо оптимального розподілу біоенергетичних культури у межах традиційних сільськогосподарських систем. Це потребує ухвалення рішень на рівні окремих полів, з урахуванням можливих сценаріїв землекористування [19], водночас забезпечуючи збереження та поліпшення екосистемних послуг у межах нових природоорієнтованих рішень [20]. Такий підхід має на меті перетворити екологічні, соціальні та економічні виклики на інноваційні можливості розвитку. Хоча ця проблема обговорюється на глобальному рівні, потреба у практичних і розумних рішеннях є особливо актуальною для фермерів, адже очікувані наслідки зміни клімату до 2050 року можуть спричинити істотне зниження чистих доходів сільськогосподарських виробників [6, 21].

Наразі більшість досліджень зосереджено переважно на економічному аналізі вирощування біоенергетичних культур і оцінюванні потенційного виробництва біомаси в умовах помірного клімату [5, 22–24]. Такі дослідження спрямовані на забезпечення зацікавлених сторін аналітичними інструментами, необхідними для ухвалення політичних рішень, розроблення стратегій управління та здійснення порівняльного аналізу альтернативних ланцюгів створення вартості. Найвідомішими орієнтирами в цій сфері є показники, запропоновані Глобальним партнерством з біоенергетики (GBEP) [2], Круглим столом зі сталого біоматеріалів [25], Радою зі сталого виробництва біомаси [26], Критеріями сталого розвитку для біоенергетики Міжнародної організації зі стандартизації [27] та Міжнародною сертифікацією сталого розвитку та вуглецю [28].

Проте зростаюча потреба в ефективному землекористуванні потребує визначення оптимального балансу між вирощуванням біоенергетичних культур на малопродуктивних землях, збереженням екосистемних послуг і мінімізацією впливу на довкілля [5, 17, 29]. Результати наявних досліджень переважно свідчать про позитивний ефект такого землекористування, однак у низці робіт відзначаються розбіжності або нейтральний вплив вирощування біоенергетичних культур на екологічні показники [30–33].

В умовах України та сусідніх європейських країн сформувалися традиційні системи землеробства, що переважно ґрунтуються на зернових сівозмінах [34]. Водночас численні наукові дослідження свідчать, що системи виробництва сировини другого покоління є найбільш перспективними для вирощування на менш сприятливих сільськогосподарських угіддях [35–37].

Отже, важливо оцінити фактичний стан поширення біоенергетичних культур у зоні Лісостепу України, а також визначити потенціал для подальшого розширення їхніх плантацій без негативного впливу на традиційну сільськогосподарську практику.

Мета дослідження – установити межі агрономічної ефективності вирощування біоенергетичних культур (міскантусу гігантського та верби енергетичної) в умовах Лісостепу України з урахуванням ґрунтово-кліматичної диференціації, особливостей наявного землекористування та потенціалу маргінальних земель.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження проводили в зоні нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (с. Ксаверівка Друга, Київська обл.) у 2020–2024 рр.

У роботі також використовували статистичну інформацію щодо площ вирощування біоенергетичних культур в основних регіонах Лісостепу України.

Ґрунт дослідного поля ІБКіЦБ – чорнозем глибокий середньосуглинковий на лесовидному суглинку: вміст гумусу – 2,58% (за Тюріним), лужногідролізованого азоту – 176 мг/кг (за Корнфільдом), рухомих сполук фосфору та калію – 160 і 95 мг/кг ґрунту (за Чириковим), $pH_{сольове}$ – 6,75, сума ввібраних основ – 305 мг-екв/кг, гідролітична кислотність – 9,1 мг-екв/кг ґрунту. Уміст гумусу та лужногідролізованого азоту оцінюється як середній, рухомого фосфору – високий, а калію – підвищений.

Погодні умови протягом років досліджень були різноманітними – від надмірного зволоження до посухи, що дало змогу ефективно оцінити потенціал продуктивності біомаси біоенергетичних культур.

За ґрунтовими умовами регіони дослідження типові для зони Лісостепу: приблизно 60% площ Вінницької та Хмельницької областей займають чорноземи опідзолені; у Київській, Сумській та Чернівецькій областях переважають сірі та темно-сірі лісові ґрунти; у Полтавській області близько 70% площ займають чорноземи типові, тоді як у Харківській та Черкаській областях домінують звичайні та опідзолені ґрунти. У Тернопільській області найпоширенішими є чорноземи опідзолені.

Експериментальні дослідження проводили відповідно до методик польового досліду та спеціальних методик [38, 39].

Результати дослідження

Насамперед варто визначити наявні площі біоенергетичних культур у ключових регіонах Лісостепу України (табл. 1).

Таблиця 1. Площі насаджень біоенергетичних культур у Лісостепу України станом на кінець 2024 року

Регіон	Міскантус гігантський		Верба енергетична	
	площа, га	користувач	площа, га	користувач
Вінницька	11	Органік-Д	5	ТОВ «Енергетична верба»
Київська	5 190	ІБКіЦБ НААН ТОВ «ЕнергоАграр»	64 6 2 5	ТОВ «УкрАгроЕнерго» ІБКіЦБ НААН Немішаївс. агротехн. коледж ТОВ «Енергетична верба»
Полтавська	1	Дослідні ділянки	120	ТОВ «Екосолум»
Сумська	100	–	45	ТОВ «Екосолум»
Тернопільська	37	Громади	17	Громади
Харківська	–	–	–	–
Хмельницька	190 3	ТОВ «ЕнергоАграр» Громади	5	Громади
Черкаська	1	Дослідні ділянки	–	–
Чернівецька	–	–	–	–
Разом	538	–	269	–

За підтвердженими даними, у зоні Лісостепу вирощується 807 га біоенергетичних культур, тоді як, за даними Держстату, загальна площа таких культур по Україні на кінець 2024 року становила 2,1 тис. га. Отже, частка Лісостепу становить 38,4%, що підтверджує пропорційність розташування плантацій біоенергетичних культур у країні.

Лісостеп України характеризується помірно континентальним кліматом з достатнім зволоженням на заході та нестійким – на сході. Попри певну строкатість погодних умов між областями, їх можна об'єднати за агрокліматичним районуванням на Західний (табл. 2), Центральний (табл. 3) та Східний Лісостеп (табл. 4).

Отже, Західний Лісостеп є найбільш забезпеченою вологою частиною регіону. Клімат тут м'який і достатньо вологий, зима малосніжна, нестійка та порівняно тепла. Тому в цих умовах доцільно вирощувати біоенергетичні культури, які потребують значної кількості вологи для росту й розвитку.

Таблиця 2. Показники елементів погоди Західного Лісостепу України (Тернопільська, Хмельницька області та частково Чернівецька область)

Показник	Значення
Середня річна температура	+7,4...+8,6 °C
Січень (температура)	−1,6...−3,8 °C
Липень (температура)	+18,5...+19,9 °C
Річна кількість опадів	600–694 мм
Вегетаційний період	200–212 діб
Зимовий період	75–100 діб
ГТК	~ 1,0–1,2
Коефіцієнт зволоження	2,0–2,8
Випаровуваність	~ 550 мм

До Центрального Лісостепу належать Вінницька, Київська, Черкаська та Полтавська області, які відрізняються проявом кліматичних умов (табл. 3).

Таблиця 3. Показники елементів погоди Центрального Лісостепу України [Вінницька, Київська (південна частина), Черкаська та Полтавська області]

Показник	Значення
Середня річна температура	+7,6...+9,3 °C
Січень (температура)	−4,0...−5,7 °C
Липень (температура)	+18,8...+20,5 °C
Річна кількість опадів	480–615 мм
Вегетаційний період	207–227 діб
Зимовий період	80–105 діб
ГТК	~ 1,0–1,1
Коефіцієнт зволоження	1,2–1,4
Випаровуваність	550–600 мм

Особливістю цього регіону є помірно континентальний клімат із порівняно м’якою, малосніжною зимою та теплим, помірно вологим літом.

Таблиця 4. Показники елементів погоди Східного Лісостепу України [Харківська, Сумська (південна частина) області]

Показник	Значення
Середня річна температура	+6,4...+8,2 °C
Січень (температура)	−5,0...−8,0 °C
Липень (температура)	+19,4...+21,5 °C
Річна кількість опадів	450–550 мм
Вегетаційний період	175–245 діб
Зимовий період	100–120 діб
ГТК	~ 0,9–1,0
Коефіцієнт зволоження	1,0–1,2
Випаровуваність	650–750 мм

Східний Лісостеп України є найбільш континентальним регіоном серед областей Лісостепу. Клімат тут помірно континентальний із нестійкою, помірно холодною зимою та помірно теплим, відносно вологим літом.

Підсумовуючи зональні кліматичні характеристики Лісостепу, Західна частина характеризується температурним режимом: січень −4...−5 °C, липень +18...+19 °C, тоді як східна частина – січень −7...−8 °C, липень +20...+22 °C. Континентальність клімату зростає із заходу на схід.

Спостерігається також загальна тенденція зменшення кількості опадів із заходу (600–700 мм) на схід (450–500 мм). При цьому 65–75% опадів випадає влітку, що створює сприятливі умови для росту й розвитку всіх культур.

Коефіцієнт зволоження, який визначає співвідношення річної кількості опадів і випаровуваності, для Західного Лісостеп становить 2,0–2,8; для Центрального – 1,2–1,4; для Східного – 1,0–1,2. Фактично південна межа Лісостепу збігається з ізолінією Кзв = 0,6.

За випаровуваністю вологи Західна частина Лісостепу має щорічні втрати на рівні 550 мм, Центральна – 550–600 мм, а Східна – 650–750 мм.

Співвідношення тепла та вологи в лісостеповій зоні є сприятливим для вирощування різноманітних сільськогосподарських культур, як-от озима пшениця, ярі зернові, цукрові буряки, соняшник, кукурудза, соя, а також біоенергетичні рослини. Сума активних температур у Західному Лісостепу становить ~ 2700 °C, у Центральному – 2990–3410 °C, а у Східному – 2775–3300 °C.

У регіоні трапляються несприятливі кліматичні явища, які зазвичай залежать від географічного розташування. Зокрема, посухи особливо часто спостерігаються в південній та східній частинах, тоді як суховії – у південно-східних районах.

Також, для оцінки потенційних можливостей вирощування біоенергетичних культур і визначення, які землі слід відводити для цих цілей у кожну регіоні, проаналізовано можливості земельного банку (табл. 5).

Оскільки в Україні не застосовується концепція визначення біофізичних параметрів ґрунтів відповідно до критеріїв маргінальності згідно з актом Європейського законодавства № 1305/2013, у процесі оцінювання враховували дві категорії земель. Категорія «землі, що потребують консервації» включає деградовані, еродовані, малопродуктивні та непридатні для інтенсивного сільськогосподарського використання ділянки (згідно з методикою Держгеокадастру та екологічних оцінок). Категорія «малопродуктивні / низької якості» здебільшого охоплює ґрунти 7–8 класів бонітету, піщані, змиті, з низьким умістом гумусу.

Таблиця 5. Площі малопродуктивних та земель, що потребують консервації, та їхня частка від орних земель

Область	Площа земель, що потребують консервації, тис. га	Частка від орної площі, %	Площа малопродуктивних / низької якості земель, тис. га	Частка від орної площі, %
Вінницька	737,3	41,4	351,2	19,7
Київська	480*	44,0	220*	20,2
Полтавська	550*	33,7	260*	16,0
Сумська	520*	38,0	240*	17,5
Тернопільська	340*	42,0	180*	22,2
Харківська	600*	31,9	300*	16,0
Хмельницька	410*	39,0	190*	18,1
Черкаська	460*	38,3	210*	17,5
Чернівецька	180*	43,9	90*	22,0

* оцінки наведено орієнтовно на основі регіональних стратегічних екологічних оцінок, кадастрових оглядів та публікацій, оскільки офіційні дані за 2020–2024 рр. для більшості областей не оприлюднені. Для Вінницької області цифри підтверджені офіційними джерелами. Аналогічно, оцінки частки таких земель є орієнтовними і базуються на основі стратегічних екологічних оцінках, кадастрових оглядах та наукових публікаціях, оскільки точні офіційні дані для більшості регіонів після 2019 року відсутні.

Для більшості областей офіційна деталізація доступна лише в екологічних паспортах за 2016–2019 рр. та регіональних стратегіях; актуальні дані за 2020–2024 рр. публікуються нерегулярно.

Частка деградованих / малопродуктивних земель у багатьох регіонах становить 30–45% орних земель, що створює потенціал для їх консервації та екологічного відновлення або альтернативного використання, зокрема під енергетичні культури (міскантус, енергетична верба, тополя).

Вінницька, Тернопільська та Чернівецька області характеризуються найвищою часткою таких земель від загальної орної площі – понад 40 %. Харківська та Полтавська області мають значні абсолютні площі таких земель (понад 500–600 тис. га), проте відносна частка дещо менша через велику загальну площу орних земель.

Міскантус гігантський для ефективного росту й розвитку потребує щорічних опадів ≥ 500–600 мм та тривалий безморозний період. Найсприятливішими для його вирощування є добре дреновані суглинкові ґрунти, тоді як на перезволожених та надто важких чи надто легких ґрунтах урожайність значно знижується.

Енергетична верба оптимально росте на вологих, помірно кислих ґрунтах (pH ~ 5–7) за умов 550–1100 мм опадів на рік; вона віддає перевагу високому рівню зволоження та близькості до ґрунтових вод. Добре почувається в помірному кліматі України.

Для прогнозування потенційних площ вирощування біоенергетичних культур у регіонах застосовується така методика. Беруться землі, що виводяться з інтенсивного обробітку (деградовані, малопродуктивні, заплавні, важкі глини тощо), і застосовується коефіцієнт придатності: для міскантусу – лише 10–20% таких земель (через потребу в дренажі та прийнятній механічній структурі), для верби – 5–15% (точкові ділянки з достатньою вологістю, заплави або біля меліоративних систем). Після чого виключаються зони явних ризиків, як-от надмірне підтоплення, ерозія або території з природоохоронними режимами.

Для міскантусу мінімальний водний поріг 500–600 мм і чутливість до перезволоження і складних умов на початковому етапі росту обмежують частку придатних маргінальних площ. Натомість верба потрібує значної кількості вологи, тому її потенційні площі вирощування є просторово фрагментованими (наприклад, вологі заплави), що зумовлює застосування нижчого коефіцієнта.

Таблиця 6. Прогнозні площі вирощування міскантусу гігантського та верби енергетичної в регіонах Лісостепу України

Область	Міскантус гігантський		Верба енергетична	
	тис. га	розташування	тис. га	розташування
Вінницька	30–60	площі з доброю дренованістю	10–30	заплави Південного Бугу чи приток, меліоративні системи
Київська	20–40	придатні південні й центральні райони	20–50	заплавні чи зволожені землі, торфовища
Полтавська	35–70	–	10–25	локально по долинах і зволожених ґрунтах
Сумська	15–30	оптимально Південний Лісостеп та край Полісся	20–45	північні вологі райони, долини річок
Тернопільська	15–25	добре дреновані суглинки	5–15	заплавні зони Дністра й приток
Харківська	25–50	слід уникати легких пісків	10–20	долини Сіверського Дінця, зволожені пониження
Хмельницька	20–35	–	8–18	річища, перезволожені ділянки
Черкаська	25–45	–	15–35	басейн Дніпра, Тясмину, Вільшанки
Чернівецька	5–12	дреновані ділянки, уникати надмірного зволоження та крутих схилів	3–10	заплави Прута / Сірету, локальні зволожені землі

Загалом, міскантус гігантський доцільно вирощувати в таких областях, як Вінницька, Полтавська, Черкаська, Хмельницька, Тернопільська та південна частина Київської області. Це класичний Лісостеп із достатньою кількістю опадів (зазвичай 550–650 мм), тривалішим вегетаційним періодом та значними площами добре дренованих суглинків.

Верба енергетична ліпше росте в умовах таких областей: Київська (Полісся й долини річок), Сумська (північ, долини), Черкаська (басейн Дніпра), Хмельницька (річища, заплави), Тернопільська (заплавні ділянки), Харківська (долини Сіверського Дінця й приток). Тут переважають вологі та перезволожені місця, трапляються торфово-болотні й заплавні ґрунти, що відповідають біологічним вимогам верби.

Чернівецький регіон придатний для вирощування обох культур «точково»: достатня кількість опадів забезпечує високі врожаї, проте мозаїка рельєфу й земельного фонду обмежує можливості формування великих масивів.

Загальні площі, пропоновані під вирощування біоенергетичних культур в умовах Лісостепу, наведено в таблиці 7.

Таблиця 7. Сумарні прогнозні площі вирощування міскантусу гігантського та верби енергетичної в Лісостепу України

Культура	Мінімум, тис. га	Максимум, тис. га	Орієнтовні середні площі, тис. га
Міскантус гігантський	190,0 (1,7%)	367,0 (3,3%)	278,5 (2,5%)
Верба енергетична	101,0 (0,9%)	248,0 (2,2%)	174,5 (1,6%)
Разом (обидві культури)	291,0 (2,6%)	615,0 (5,5%)	453,0 (4,0%)

Примітка. У дужках – частка від орних земель.

Сумарні площі в оптимальному варіанті розміщення культур становлять лише 4,0% від загальної площі орних земель.

Також доцільно розрахувати вихід твердого біопалива та відсоток заміщення викопного палива згідно зі стратегією на 2035 рік з урахуванням площ біоенергетичних культур, які можна закласти на малопродуктивних ґрунтах Лісостепу України (табл. 8). Адже пріоритетом є саме ефективне розміщення культур і відсутність конкуренції з продовольчими рослинами.

Таблиця 8. Вихід твердого біопалива з площ біоенергетичних культур, наведених у таблиці 7, та частка покриття необхідного палива станом на 2035 рік

Сценарій	Міскантус гігантський, млн т	Верба енергетична, млн т	Разом, млн т
Мінімум	5,23 (21,0%)	1,67 (6,7%)	6,89 (27,7%)
Середній	7,66 (30,8%)	2,88 (11,6%)	10,54 (42,3%)
Максимум	10,09 (40,5%)	4,09 (16,4%)	14,18 (57,0%)

У разі реалізації максимального сценарію формування площ біоенергетичних культур Лісостеп України здатний забезпечити понад 50% потреби у заміщенні викопного палива. При цьому для вирощування використовується лише 5,5% орних земель, що не становить загрози для продовольчої безпеки країни.

Висновки

У Лісостепу України вже закладено 807 га біоенергетичних культур (≈ 38,4% від 2,1 тис. га по країні), що підтверджує концентрацію галузі саме у цій природно-кліматичній зоні.

Агрокліматичні відмітності між Західним, Центральним і Східним Лісостепом (опади, гідротермічний коефіцієнт, випаровуваність, тривалість вегетації) зумовлюють диференційовану спеціалізацію культур: міскантус – на добре дренованих суглинках регіонів із 500–650 мм опадів, верба – на заплавах і зволожених пониженнях із близьким заляганням ґрунтових вод.

Потенційні площі залучення (за консервативною моделлю придатності земель) становлять: міскантус – 190–367 тис. га, верба – 101–248 тис. га; разом 291–615 тис. га, що відповідає 2,6–5,5% орних земель Лісостепу (середній сценарій – ≈ 4,0%).

За наведених площ очікуваний річний вихід твердого біопалива становить 6,89–14,18 млн т, що забезпечує 27,7–57,0% від орієнтиру заміщення викопного палива у 2035 році; середній сценарій – приблизно 42,3%.

Список використаних джерел

1. Espinoza Pérez, A. T., Camargo, M., Narváez Rincón, P. C., & Alfaro Marchant, M. (2017). Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*, 350–359. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.084

2. The Global Bioenergy Partnership (GBEP). 2018. http://www.globalbioenergy.org

3. Lewandowski, I. (2015). Securing a sustainable biomass supply in a growing bioeconomy. *Global Food Security*, *6*, 34–42. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.10.001

4. Dale, V. H., Kline, K. L., Buford, M. A., Volk, T. A., Tattersall Smith, C., & Stupak, I. (2016). Incorporating bioenergy into sustainable landscape designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 1158–1171. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.038

5. Blanco-Canqui, H. (2016). Growing Dedicated Energy Crops on Marginal Lands and Ecosystem Services. *Soil Science Society of America Journal*, *80*(4), 845–858. https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0080

6. Gelfand, I., Sahajpal, R., Zhang, X., Izaurralde, R. C., Gross, K. L., & Robertson, G. P. (2013). Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*, *493*(7433), 514–517. https://doi.org/10.1038/nature11811

7. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., & von Stechow, C. (Eds.). (2011). *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge University Press.

8. European Commission. (2017). *Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)* [COM/2016/0767 final/2 – 2016/0382 (COD)].

9. JRC, EEA, CENER, & CIEMAT. (2006, February 9–10). *Sustainable bioenergy cropping systems for the Mediterranean: Proceedings of the Expert Consultation*. Madrid.

10. The White House. (2012). *National bioeconomy blueprint*. Washington, DC.

11. De Schutter, L., & Giljum, S. (2014). *A calculation of the EU bioenergy land footprint: Discussion paper on land use related to EU bioenergy targets for 2020 and an outlook for 2030*. Vienna.

12. Krautgartner, R., Audran, X., Rehder, L. E., Boshnakova, M., Dobrescu, M., & Rossetti, A. (2017). *EU-28 oilseeds market update* (GAIN Report No. AU1706). United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service.

13. Flach, B., Lieberz, S., & Rossetti, A. (2017). *EU-28 biofuels annual report* (GAIN Report No. NL7015). United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service.

14. Tilman, D., Socolow, R., Foley, J. A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., Pacala, S., Reilly, J., Searchinger, T., Somerville, C., & Williams, R. (2009). Beneficial Biofuels – The Food, Energy, and Environment Trilemma. *Science*, *325*(5938), 270–271. https://doi.org/10.1126/science.1177970

15. Bosch, R., van de Pol, M., & Philp, J. (2015). Policy: Define biomass sustainability. *Nature*, *523*(7562), 526–527. https://doi.org/10.1038/523526a

16. Pretty, J., Sutherland, W. J., Ashby, J., Auburn, J., Baulcombe, D., Bell, M., Bentley, J., Bickersteth, S., Brown, K., Burke, J., Campbell, H., Chen, K., Crowley, E., Crute, I., Dobbelaere, D., Edwards-Jones, G., Funes-Monzote, F., Godfray, H. C. J., Griffon, M., ... Pilgrim, S. (2010). The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, *8*(4), 219–236. https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0534

17. Holland, R. A., Eigenbrod, F., Muggeridge, A., Brown, G., Clarke, D., & Taylor, G. (2015). A synthesis of the ecosystem services impact of second generation bioenergy crop production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *46*, 30–40. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.003

18. Milner, S., Holland, R. A., Lovett, A., Sunnenberg, G., Hastings, A., Smith, P., Wang, S., & Taylor, G. (2015). Potential impacts on ecosystem services of land use transitions to second-generation bioenergy crops in GB. *GCB Bioenergy*, *8*(2), 317–333. https://doi.org/10.1111/gcbb.12263

19. Anderson-Teixeira, K. J., Duval, B. D., Long, S. P., & DeLucia, E. H. (2012). Biofuels on the landscape: Is "land sharing" preferable to "land sparing"? *Ecological Applications*, *22*(8), 2035–2048. https://doi.org/10.1890/12-0711.1

20. Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E., Krauze, K., Külvik, M., Rey, F., van Dijk, J., Vistad, O. I., Wilkinson, M. E., & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of The Total Environment*, *579*, 1215–1227. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106

21. Wolf, J., Kanellopoulos, A., Kros, J., Webber, H., Zhao, G., Britz, W., Reinds, G. J., Ewert, F., & de Vries, W. (2015). Combined analysis of climate, technological and price changes on future arable farming systems in Europe. *Agricultural Systems*, *140*, 56–73. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.08.010

22. Stoof, C. R., Richards, B. K., Woodbury, P. B., Fabio, E. S., Brumbach, A. R., Cherney, J., Das, S., Geohring, L., Hansen, J., Hornesky, J., Mayton, H., Mason, C., Ruestow, G., Smart, L. B., Volk, T. A., & Steenhuis, T. S. (2014). Untapped Potential: Opportunities and Challenges for Sustainable Bioenergy Production from Marginal Lands in the Northeast USA. *BioEnergy Research*, *8*(2), 482–501. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9515-8

23. Emery, I., Mueller, S., Qin, Z., & Dunn, J. B. (2016). Evaluating the Potential of Marginal Land for Cellulosic Feedstock Production and Carbon Sequestration in the United States. *Environmental Science & Technology*, *51*(1), 733–741. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04189

24. Smeets, E. M. W., Lewandowski, I. M., & Faaij, A. P. C. (2009). The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(6–7), 1230–1245. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.006

25. Roundtable on Sustainable Biofuels. (n.d.). http://rsb.org/

26. Council on Sustainable Biomass Production. (n.d.). http://www.merid.org/Content/Projects/Council_on_Sustainable_Biomass_Production.aspx

27. ISO sustainability criteria for bioenergy. (n.d.). https://www.iso.org/standard/52528.html

28. International sustainability and carbon certification. (n.d.). http://www.iscc-system.org/en/

29. Anuar, M. R., & Abdullah, A. Z. (2016). Challenges in biodiesel industry with regards to feedstock, environmental, social and sustainability issues: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *58*, 208–223. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.296

30. Immerzeel, D. J., Verweij, P. A., van der Hilst, F., & Faaij, A. P. C. (2013). Biodiversity impacts of bioenergy crop production: a state-of-the-art review. *GCB Bioenergy*, *6*(3), 183–209. https://doi.org/10.1111/gcbb.12067

31. Pedroli, B., Elbersen, B., Frederiksen, P., Grandin, U., Heikkilä, R., Krogh, P. H., Izakovičová, Z., Johansen, A., Meiresonne, L., & Spijker, J. (2013). Is energy cropping in Europe compatible with biodiversity? – Opportunities and threats to biodiversity from land-based production of biomass for bioenergy purposes. *Biomass and Bioenergy*, *55*, 73–86. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.054

32. Gasparatos, A., Doll, C. N. H., Esteban, M., Ahmed, A., & Olang, T. A. (2017). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, 161–184. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030

33. Werling, B. P., Dickson, T. L., Isaacs, R., Gaines, H., Gratton, C., Gross, K. L., Liere, H., Malmstrom, C. M., Meehan, T. D., Ruan, L., Robertson, B. A., Robertson, G. P., Schmidt, T. M., Schrotenboer, A. C., Teal, T. K., Wilson, J. K., & Landis, D. A. (2014). Perennial grasslands enhance biodiversity and multiple ecosystem services in bioenergy landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(4), 1652–1657. https://doi.org/10.1073/pnas.1309492111

34. Solinas, S., Fazio, S., Seddaiu, G., Roggero, P. P., Deligios, P. A., Doro, L., & Ledda, L. (2015). Environmental consequences of the conversion from traditional to energy cropping systems in a Mediterranean area. *European Journal of Agronomy*, *70*, 124–135. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.07.008

35. Cosentino, S. L., Scordia, D., Sanzone, E., Testa, G., & Copani, V. (2014). Response of giant reed (*Arundo donax* L.) to nitrogen fertilization and soil water availability in semi-arid Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, *60*, 22–32. https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.07.003

36. Fernando, A. L., Costa, J., Barbosa, B., Monti, A., & Rettenmaier, N. (2018). Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. *Biomass and Bioenergy*, *111*, 174–186. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.04.005

37. Pulighe, G., Bonati, G., Fabiani, S., Barsali, T., Lupia, F., Vanino, S., Nino, P., Arca, P., & Roggero, P. (2016). Assessment of the Agronomic Feasibility of Bioenergy Crop Cultivation on Marginal and Polluted Land: A GIS-Based Suitability Study from the Sulcis Area, Italy. *Energies*, *9*(11), Article 895. https://doi.org/10.3390/en9110895

38. Ermantraut, E. R., Prysiazhniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statistical analysis of agronomic experimental data using Statistica 6.0*. PolihrafKonsaltynh. [In Ukrainian]

39. Prysyazhniuk, O. I., Klymovych, N. M., Polunina, O. V., Yevchuk, Y. V., Tretyakova, S. O., Kononenko, L. M., Voitovska, V. I., & Mykhailovyn, Y. 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]

Determination of the limits of agronomic efficiency of the bioenergy crops cultivation in the Forest-Steppe of Ukraine

O. I. Prysiazhniuk*, N. O. Kononiuk, O. A. Maliarenko, M. O. Cherniak, O. Yu. Polovynchuk, O. M. Honcharuk, V. V. Musich, O. P. Shevchenko

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

**Corresponding author: Oleh Prysiazhniuk, ollpris@gmail.com*

Citation: Prysiazhniuk, O. I., Kononiuk, N. O., Maliarenko, O. A., Cherniak, M. O., Polovynchuk, O. Yu., Honcharuk, O. M., Musich, V. V., & Shevchenko, O. P. (2025). Determination of the limits of agronomic efficiency of the bioenergy crops cultivation in the Forest-Steppe of Ukraine. *Bioenergy*, *2*, 57–66. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp57-66

Aim. To determine the boundaries of agronomic efficiency for cultivating bioenergy crops (*Miscanthus giganteus* and energy willow) in the Forest Steppe zone of Ukraine, taking into account soil-climatic differentiation, existing land use, and the potential of marginal lands. **Methods.** Field trials were conducted in the Right-Bank Forest Steppe in the experimental field of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS (Ksaverivka Druha) in 2020–2024. The methods included generalisation of confirmed plantation areas across nine Forest Steppe regions, agro-climatic zoning (Western, Central, and Eastern Forest Steppe), inventory of lands requiring conservation and low-productivity soils, suitability modelling (engagement coefficients of 10–20% for miscanthus and 5–15% for willow across respective land categories); estimation of solid biofuel yield and fossil fuel substitution potential by 2035. **Results.** A total of 807 hectares of plantations were confirmed within the Forest Steppe zone (≈ 38.4% of 2,100 ha nationwide). Based on biological requirements and land structure, the area suitable for cultivation of miscanthus ranges between 190 and 367 thousand hectares and suitable for cultivation of willow between 101 and 248 thousand hectares. The area of combined cultivation of these crops ranges from 291 to 615 thousand hectares of arable land (4.0%). These areas are expected to yield 6.89–14.18 million tonnes of solid biofuel annually, which is equivalent to 27.7–57.0% of the fossil fuel substitution target for 2035. **Conclusions.** The most suitable soils for miscanthus cultivation are well-drained loamy soils in the Central and Western Forest Steppe, while and for willow cultivation the most suitable are floodplain and moist soils in Kyiv, Sumy, Cherkasy, Khmelnytskyi, Ternopil, and Kharkiv regions. Optimal engagement of only a small portion of arable land (≈ 4%) could enable substitution of up to half the region's solid biofuel demand by 2035 without compromising food security.

Keywords: energy crops; *Miscanthus giganteus*; energy willow; marginal lands; solid biofuel; agroclimatic zoning.

ORCID

Олег Присяжнюк / Oleh Prysiazhniuk	https://orcid.org/0000-0002-4639-424X
Надія Кононюк / Nadiia Kononiuk	https://orcid.org/0000-0002-5313-4999
Оксана Маляренко / Oksana Maliarenko	https://orcid.org/0000-0002-9309-4020
Микола Черняк / Mykola Cherniak	https://orcid.org/0009-0004-4718-5978
Олександр Половинчук / Oleksandr Polovynchuk	https://orcid.org/0000-0002-7830-7534
Олександр Гончарук / Oleksandr Honcharuk	https://orcid.org/0000-0002-7740-1334
Володимир Мусіч / Volodymyr Musich	https://orcid.org/0000-0001-5362-6750
Олена Шевченко / Olena Shevchenko	https://orcid.org/0000-0001-5980-7536

2025 ● № 2 ● С. 67–73
https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp67-73

Оригінальні дослідження

УДК 633.03:632.954:631.559

Вплив систем контролю бур'янів і захисту від низьких температур на ріст, перезимівлю та вуглецеве навантаження насаджень павловнії

С. О.Ременюк*, **Д. Я. Макух**

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

**Автор для листування: СвітланаРеменюк, svetlana19862010@ukr.net*

Цитування:Ременюк С. О., Макух Д. Я. Вплив систем контролю бур'янів і захисту від низьких температур на ріст, перезимівлю та вуглецеве навантаження насаджень павловнії. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 67–73. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp67-73

Мета. Установити вплив забур'яненості, а також систем хімічного та агротехнічного захисту на ріст і розвиток гібридів павловнії за вирощування в умовах Правобережного Лісостепу України. **Методи.** Дослідження проводили у 2023–2025 рр. у Київській області. Об'єктом дослідження були гібриди павловнії 'Clone in vitro 112', 'Pao Tong Z07' та 'Shan Tong'. Схема досліду передбачала вивчення трьох факторів: А – гібрид; В – система захисту від бур'янів [контроль; ручне прополювання; внесення гербіцидів Стомп 330, к. е. (5 л/га) та Стомп 330, к. е. (5 л/га) + Тарга Супер, к. е. (2,0 л/га)]; С – захист від 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 (6,5 л/га)]. Визначали сиру масу бур'янів, біометричні показники рослин (висота, діаметр стовбура, площа листків), відсоток перезимівлі та викиди CO_2eq. **Результати.** Павловнія на ранніх етапах розвитку є надзвичайно чутливою до конкуренції. За природного фону забур'яненості (3015–3980 г/м²) висота рослин не перевищувала 0,90 м. Застосування гербіцидних систем (Стомп 330; Стомп 330 + Тарга Супер) знизило масу бур'янів до 110–141 г/м², що дало змогу рослинам досягти висоти 3,02–3,18 м та сформувати площу листкової поверхні до 3,88 м². Фактор захисту від низьких температур (препарат Харвест) критично впливає на життєздатність насаджень: без обробок перезимівля становила лише 26–48%, тоді як за комплексного захисту вона зростала до 87–91%. Аналіз вуглецевого наван-таження показав, що інтенсифікація захисту призводить до зростання викидів CO_2eq до 53,7 кг/га, проте це компенсується стабільністю та високою якістю насаджень. **Висновки.** Ефективний контроль сегетальної рослинності є обов'язковою умовою реалізації ростового потенціалу павловнії. Найвищі показники продуктивності та життєздатності забезпечує комбінована система захисту (Стомп 330 + Тарга Супер) у поєднанні з осінньо-весняними антистресовими обробками та позакореневим підживленням. Гібриди продемонстрували подібну реакцію на технологічні заходи, при цьому вплив систем захисту суттєво переважав генотипові відмітності. Технології без захисту є неефективними через низьку виживаність рослин (менше 50%), попри нульове вуглецеве навантаження від пестицидів.

Ключові слова: павловнія; гібриди; контроль бур'янів; гербіциди; пендиметалін; хізалофоп-П-етил; біометричні показники; площа листкової поверхні; перезимівля; антистресовий захист; вуглецеве навантаження; CO_2eq.

Вступ

На початкових етапах вегетації молоді насадження павловнії швидко заселяються бур'янами, які формують інтенсивну конкуренцію за вологу, поживні речовини та світло, що пригнічує розвиток листкової поверхні й приріст пагонів. Дослідження, проведені в умовах Укра-

Одержано 24.11.2025 ● **Погоджено** 17.12.2025 ● **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

їни, підтверджують вирішальне значення контролю бур'янів у перший рік вирощування, оскільки павловнія є чутливою до затінення і погано реагує на конкуренцію із сегетальною рослинністю [1, 2].

У плантаційному вирощуванні павловнії на початкових етапах широко застосовують ґрунтові гербіциди для контролю першої хвилі бур'янів, при цьому особливу увагу приділяють селективності діючих речовин. Дослідження із застосуванням діючої речовини пендиметаліну на молодих деревних рослинах підтверджують необхідність чіткого дотримання норм і строків внесення для уникнення негативного впливу на ріст. У виробничих умовах гербіцидні обробки також використовують під час підготовки забур'янених ділянок для забезпечення успішного старту плантацій [3].

Літературні дані свідчать, що низькі температури, зокрема пошкодження нездерев'янілих пагонів у ранньозимовий період та весняні приморозки, є одним із головних обмежувальних чинників вирощування павловнії, оскільки зумовлюють підмерзання верхівок і зниження інтенсивності росту в наступному вегетаційному сезоні. Узагальнюючі огляди європейських досліджень відзначають значні міжклонові відмітності за ступенем морозостійкості та стабільності росту молодих рослин. На фізіолого-біохімічному рівні холодостійкість павловнії пов'язують із перебудовою метаболічних і транскриптомних реакцій за дії холодового стресу, що обґрунтовує доцільність застосування технологічних прийомів, спрямованих на підвищення перезимівлі та адаптації рослин до несприятливих температурних умов [4–6].

У сучасних дослідженнях дедалі ширше застосовують підходи аналізу життєвого циклу для кількісної оцінки впливу агротехнологій, зокрема систем контролю бур'янів, на формування викидів парникових газів. Установлено, що внесок заходів захисту рослин у загальне екологічне навантаження технологій може бути співставним із впливом мінеральних добрив та енерговитрат на виконання польових операцій. Для оцінювання цієї складової широко використовують методи перерахунку енергоємності виробництва пестицидів у CO_2-еквівалент із застосуванням уніфікованих коефіцієнтів, що дозволяє об'єктивно порівнювати вуглецевий слід різних систем захисту. Відтак у дослідженнях павловнії доцільно оцінювати технології комплексно – не лише за біологічною ефективністю, а й за балансом між продуктивністю та вуглецевим навантаженням [7–9].

Аналіз джерел дає змогу зробити висновок, що найбільш перспективними є інтегровані системи, де: контроль бур'янів забезпечується у критичний стартовий період (перші роки вегетації) із поєднанням екологічних / механічних прийомів та селективних гербіцидів за потреби; технологія включає елементи, спрямовані на підвищення перезимівлі молодих рослин; ефективність оцінюють комплексно – за ростом і життєздатністю насаджень, а також за показниками CO_2eq і загальною екологічною доцільністю.

Мета дослідження – установити вплив забур'яненості, а також систем хімічного та агротехнічного захисту на ріст і розвиток гібридів павловнії за вирощування в умовах Правобережного Лісостепу України.

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 на рівні 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 – pH 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.

Обліки видового складу бур'янів щорічно проводили в першій декаді червня – у період стабілізації фітоценозу, коли сходи як ранніх, так і пізніх ярих бур'янів уже сформовані. Для цього закладали облікові квадрати площею 0,25 $м^2$ у чотирьох точках кожного варіанта, визначаючи чисельність бур'янів за видами та їхню структурну частку в забур'яненості.

Сиру масу бур'янів визначали у другій декаді липня, у період максимального нагромадження їхньої біомаси. Скошені у межах квадрата 0,25 $м^2$ бур'яни зважували та перераховували в $г/м^2$.

Біометричні показники павловнії – висоту, діаметр стовбура та площу листкової поверхні – обліковували в кінці вересня (перед входом у стан спокою). Діаметр стовбура визначали штангенциркулем на висоті 10 см над поверхнею ґрунту, площу листкової поверхні – за формулою: $П = Д \times Ш \times К$, де П – площа листка, К – перевідний коефіцієнт (0,74), Д – довжина листка, Ш – ширина листка [10–13].

Результати дослідження

Павловнія належить до швидкорослих деревних культур з високим потенціалом утворення біомаси, проте на початкових етапах онтогенезу є надзвичайно чутливою до конкуренції з боку бур'янів. У перші два-три роки вегетації бур'яни формують інтенсивну конкуренцію за вологу, елементи живлення та світло, що негативно позначається на формуванні листкової поверхні, потовщенні стовбура та зимостійкості рослин. У зв'язку з цим актуальним є наукове обґрунтування ефективних систем контролю бур'янів у насадженнях павловнії, з урахуванням поєднання ґрунтових і післясходових гербіцидів, агротехнічних заходів та елементів антистресового захисту в осінньо-зимовий період.

У таблиці 1 наведено результати дослідження впливу систем захисту від бур'янів (фактор Б) у поєднанні із заходами захисту рослин від впливу низьких температур (фактор С) на ріст і розвиток гібридів павловнії 'Clone in vitro 112', 'Pao Tong Z07' і 'Shan Tong' за 2023–2025 рр.

За відсутності гербіцидного захисту сформувався високий рівень забур'яненості – 3015–3980 $г/м^2$, що істотно пригнічувало ріст павловнії: висота рослин не перевищувала 0,85–0,90 м, діаметр стовбура становив 1,48–1,55 см, а площа листкової поверхні – 0,32–0,35 $м^2$.

Повне усунення бур'янів забезпечувало різке покращення ростових показників незалежно від застосованих заходів захисту від низьких температур: висота рослин зростала до 2,80–3,00 м, діаметр стовбура – до 2,85–2,95 см, а площа листків однієї рослини перевищувала 3,65–3,75 $м^2$.

Застосування ґрунтового гербіциду Стомп 330 зумовлювало зниження сирої маси бур'янів до 130–141 $г/м^2$ і забезпечувало формування рослин заввишки 3,02–3,08 м із діаметром стовбура 3,15–3,20 см та площею листкової поверхні 3,75–3,80 $м^2$. Найвищі показники росту отримано за комбінованої системи захисту Стомп 330 + Тарга Супер, де маса бур'янів зменшувалася до 110–119 $г/м^2$, а висота рослин досягала 3,10–3,18 м, діаметр стовбура – 3,22–3,30 см, площа листків – 3,82–3,88 $м^2$; при цьому позитивний вплив осінніх антистресових заходів і позакореневого підживлення проявлявся виключно через посилення росту та розвитку павловнії. Усі гібриди характеризувалися подібною реакцією на умови досліду, а вплив системи контролю бур'янів був статистично значущим і істотно переважав генотипові відмінності.

Таблиця 1. Вплив забур'яненості та систем захисту на ріст і розвиток гібридів павловнії (середнє за 2023–2025 рр.)

Фактор Б – система захисту	Фактор С – захист від впливу низьких температур	Сира маса бур'янів, г/м²	Висота рослин, м	Діаметр стовбура, см	Площа листків однієї рослини павловнії, м²
	'Clone in vitro 112'				
1. Контроль (без гербіцидів)	1. Контроль (без обробки)	3980	0,85	1,48	0,32
2. Контроль 2 (насадження без бур'янів)	2. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га)	–	2,80	2,85	3,65
3. Стомп 330, к. е., 5 л/га	3. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га + після танення снігу, за температури +5 °С, 1 л/га)	130	3,02	3,15	3,75
4. Стомп 330, к. е., 5 л/га + Тарга Супер, к. е., 2,0 л/га	4. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га) + НОВОФЕРТ Ягода (по листку, за 5–6 діб до можливих заморозків, 10 г/рослину, або 6,5 л/га)	115	3,10	3,22	3,82
	'Pao Tong Z07'				
1. Контроль (без гербіцидів)	1. Контроль (без обробки)	3015	0,88	1,52	0,35
2. Контроль 2 (насадження без бур'янів)	2. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га)	–	2,90	2,90	3,72
3. Стомп 330, к. е., 5 л/га	3. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га + після танення снігу, за температури +5 °С, 1 л/га)	132	3,05	3,17	3,80
4. Стомп 330, к. е., 5 л/га + Тарга Супер, к. е., 2,0 л/га	4. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га) + НОВОФЕРТ Ягода (по листку, за 5–6 діб до можливих заморозків, 10 г/рослину, або 6,5 л/га)	119	3,15	3,25	3,85
	'Shan Tong'				
1. Контроль (без гербіцидів)	1. Контроль (без обробки)	3040	0,90	1,55	0,33
2. Контроль 2 (насадження без бур'янів)	2. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га)	–	3,00	2,95	3,75
3. Стомп 330, к. е., 5 л/га	3. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га + після танення снігу, за температури +5 °С, 1 л/га)	141	3,08	3,20	3,78
4. Стомп 330, к. е., 5 л/га + Тарга Супер, к. е., 2,0 л/га	4. ХАРВЕСТ (осіння обробка, коли з дерев опало понад 40% листя, 5 л/га) + НОВОФЕРТ Ягода (по листку, за 5–6 діб до можливих заморозків, 10 г/рослину, або 6,5 л/га)	110	3,18	3,30	3,88
	$НІР_{0,05}$	120	0,12	0,14	0,18

Осінні обробки та позакореневе підживлення сприяли кращому збереженню рослин у зимовий період, зменшенню пошкоджень стовбура і бруньок та забезпечували інтенсивніше відновлення росту навесні. Завдяки цьому у варіантах із застосуванням захисних заходів від низьких температур формувалися більш життєздатні рослини з кращими біометричними показниками за однакового рівня контролю бур'янів.

У всіх гібридів у варіанті без гербіцидного захисту та без обробок проти низьких температур відзначено найнижчий рівень перезимівлі – 48% у 'Clone in vitro 112' та лише 26–27% у 'Pao Tong Z07' і 'Shan Tong', що відповідало незадовільній оцінці стану рослин, попри мінімальні викиди CO_2eq. Застосування осінньої обробки препаратом ХАРВЕСТ за відсутності бур'янів істотно покращувало перезимівлю (61–69%) за незначного зростання викидів CO_2eq до 2,3 кг/га, що свідчить про високу екологічну доцільність цього варіанта. Поєднання ефективного контролю бур'янів з осінньо-весняним захистом від низьких температур забезпечувало подальше підвищення перезимівлі до 75–87% і формування рослин з хорошим станом, хоча супроводжувалося зростанням викидів CO_2eq до 48,9 кг/га. Максимальні показники перезимівлі (87–91%) та відмінний якісний стан рослин у всіх гібридів отримано за комбінованої системи Стомп + Тарга у поєднанні з осіннім ХАРВЕСТ і позакореневим підживленням НОВОФЕРТ Ягода, однак цей варіант характеризувався найвищими викидами CO_2eq (53,7 кг/га) (табл. 2).

Таблиця 2. Вплив систем захисту від бур'янів і низьких температур на перезимівлю павловнії та вуглецеве навантаження технології (середнє за 2023–2025 рр.)

Варіант досліду	Перезимівля, %	Якісна оцінка	CO_2eq, кг/га
'Clone in vitro 112'			
1) Без гербіцидів × без обробки	48	незадовільний	0,0
2) Без бур'янів × ХАРВЕСТ (осінь)	69	задовільний	2,3
3) Стомп × ХАРВЕСТ (осінь + весна)	87	добрий	48,9
4) Стомп + Тарга × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ	91	відмінний	53,7
'Pao Tong Z07'			
1) Без гербіцидів × без обробки	27	незадовільний	0,0
2) Без бур'янів × ХАРВЕСТ (осінь)	61	задовільний	2,3
3) Стомп × ХАРВЕСТ (осінь + весна)	75	добрий	48,9
4) Стомп + Тарга × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ	87	відмінний	53,7
'Shan Tong'			
1) Без гербіцидів × без обробки	26	незадовільний	0,0
2) Без бур'янів × ХАРВЕСТ (осінь)	64	задовільний	2,3
3) Стомп × ХАРВЕСТ (осінь + весна)	75	добрий	48,9
4) Стомп + Тарга × ХАРВЕСТ + НОВОФЕРТ	87	відмінний	53,7

Загалом результати свідчать, що фактор С відіграє ключову роль у забезпеченні перезимівлі павловнії, тоді як фактор В визначає рівень реалізації ростового потенціалу, а підвищення вуглецевого навантаження за інтенсивних систем захисту компенсується істотним зростанням життєздатності та стабільності насаджень.

Висновки

Павловнія на ранніх етапах онтогенезу є високочутливою до конкуренції з боку бур'янів, що підтверджується істотним пригніченням ростових процесів за відсутності гербіцидного захисту: за рівня забур'яненості 3015–3980 г/м² висота рослин знижувалася у 3–4 рази, діаметр стовбура – удвічі, а площа листкової поверхні – більш ніж у 10 разів порівняно з варіантами ефективного контролю бур'янів.

Система захисту від бур'янів є визначальним у формуванні ростового потенціалу павловнії. Повне усунення бур'янів або застосування ґрунтових і комбінованих гербіцидних систем (Стомп 330; Стомп 330 + Тарга Супер) забезпечувало істотне зниження сирої маси бур'янів до 110–141 г/м² та формування максимальної висоти рослин (3,02–3,18 м), діаметра стовбура (3,15–3,30 см) і площі листкової поверхні (3,75–3,88 м²).

Захист від впливу низьких температур не впливав на рівень забур'яненості, проте відігравав ключову роль у забезпеченні перезимівлі та життєздатності насаджень. Осінні обробки та позакореневе підживлення сприяли зменшенню пошкоджень рослин у зимовий період, кращому збереженню бруньок і стовбура та інтенсивнішому відновленню росту навесні.

Найнижчий рівень перезимівлі (26–48%) і незадовільний стан рослин зафіксовано у варіантах без гербіцидного захисту та без антистресових обробок, що робить такі системи технологічно й екологічно неефективними, незважаючи на мінімальні викиди CO_2eq.

Список використаних джерел

1. 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]

2. Nychkaliuk, H. (2023). Peculiarities of the weed infestation of young paulownia (*Paulownia tomentosa* L.) stands. *Quarantine and Plant Protection*, *4*, 38–41. https://doi.org/10.36495/2312-0614.2023.4.38-41 [In Ukrainian]

3. Kadlec, J., Novosadová, K., & Pokorný, R. (2020). 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

4. Jakubowski, M. (2022). Cultivation potential and uses of paulownia wood: A review. *Forests*, *13*(5), Article 668. https://doi.org/10.3390/f13050668

5. Magar, L. B., Khadka, S., Joshi, J. R. R., Pokharel, U., Rana, N., Thapa, P., Sharma, K. R. S. R., Khadka, U., Marasini, B. P., & Parajuli, N. (2018). Total biomass carbon sequestration ability under the changing climatic condition by *Paulownia tomentosa* Steud. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, *6*(3), 220–226. https://doi.org/10.3126/ijasbt.v6i3.20772

6. Liu, B., Su, J., Fu, C., Xian, K., He, J., & Huang, N. (2024). Comparative transcriptomic profiles of *Paulownia catalpifolia* under different degrees of chilling stress during the seedling stage. *BMC Genomics*, *25*(1), Article 716. https://doi.org/10.1186/s12864-024-10613-7

7. 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

8. Audsley, E., Stacey, K. F., Parsons, D. J., & Williams, A. G. (2009). *Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use*. Cranfield University. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5095.3122

9. Luca, R., Camen, D., Danci, M., & Petolescu, C. (2014). Research regarding the influence of culture conditions upon the main physiological indices at *Paulownia* Shan Tong. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, *18*(4), 74–77.

10. 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]

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

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

13. Hrytsaienko, Z. M., Hrytsaienko, A. O., & Karpenko, V. P. (2003). *Methods of biological and agrochemical studies of plants and soils*. Nichlava. [In Ukrainian]

Influence of weed control systems and protection against low temperatures on growth, overwintering, and carbon load of paulownia plantations

S. O. Remeniuk*, D. Ya. Makukh

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

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

Citation: 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

Aim. To establish the influence of weed infestation as well as chemical and agronomic protection systems on the growth and development of paulownia hybrids in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. **Methods.** The research was conducted in 2023–2025 in Kyiv region. The objects of study were paulownia hybrids ‘Clone in vitro 112’, ‘Pao Tong Z07’, and ‘Shan Tong’. The experimental design involved three factors: A – hybrid; B – weed control system: control; manual weeding; application of herbicide Stomp 330 EC (5 l/ha); Stomp 330 EC (5 l/ha) + Targa Super EC (2.0 l/ha); C – protection against low temperatures: no treatment;

autumn treatment with Harvest (5 l/ha); autumn + spring treatment with Harvest (5 + 1 l/ha); autumn treatment with Harvest (5 l/ha) + foliar fertilisation with Novofert Yahoda (6.5 l/ha). Fresh weed mass, plant biometric indicators (height, stem diameter, leaf area), overwintering percentage, and CO_2eq emissions were determined. **Results.** Paulownia at early developmental stages is extremely sensitive to competition. Under natural weed infestation (3015–3980 g/m²), plant height did not exceed 0.90 m. Application of herbicide systems (Stomp 330; Stomp 330 + Targa Super) reduced weed mass to 110–141 g/m², enabling plants to reach heights of 3.02–3.18 m and form leaf area up to 3.88 m². The factor of protection against low temperatures (Harvest) critically influenced plantation viability: without treatments, overwintering was only 26–48%, whereas under complex protection it increased to 87–91%. Analysis of carbon load showed that intensification of protection led to an increase in CO_2eq emissions to 53.7 kg/ha, but this was compensated by plantation stability and high quality. **Conclusions.** Effective control of segetal vegetation is a prerequisite for realising the growth potential of paulownia. The highest productivity and viability were ensured by the combined protection system (Stomp 330 + Targa Super) in combination with autumn–spring anti-stress treatments and foliar fertilisation. Hybrids demonstrated similar responses to technological measures, with the influence of protection systems significantly outweighing genotypic differences. Technologies without protection are ineffective due to low plant survival (less than 50%), despite zero carbon load from pesticides.

Keywords: paulownia; hybrids; weed control; herbicides; pendimethalin; quizalofop-P-ethyl; biometric indicators; leaf area; overwintering; anti-stress protection; carbon load; CO_2eq.

ORCID

Світлана Ременюк / Svitlana Remeniuk https://orcid.org/0000-0002-4407-4293

Денис Макух / Denys Makukh https://orcid.org/0000-0001-9085-4496

2025 ● № 2 ● С. 74–90
https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp74-90

Огляд літератури

УДК 632.651 : 633.282 : 632.3

Фітопаразитичні нематоди ризосфери міскантусу гігантського (*Miscanthus* × *giganteus*): фітосанітарні ризики та засади інтегрованого захисту насаджень від нематодозів

К. А. Калатур[1*], А. І. Медков[2], Л. А. Янсе[2,3]

[1] Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна
[2] Інститут агроекології і природокористування НААН, вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна
[3] Національна академія аграрних наук України, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 9, м. Київ, 01010, Україна
**Автор для листування: Катерина Калатур, kkalatur@meta.ua*

Цитування: Калатур К. А., Медков А. І., Янсе Л. А. Фітопаразитичні нематоди ризосфери міскантусу гігантського (*Miscanthus* × *giganteus*): фітосанітарні ризики та засади інтегрованого захисту насаджень від нематодозів. *Біоенергетика*. 2025. № 2. С. 74–90. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp74-90

Мета. Провести комплексний аналіз сучасних наукових досліджень щодо поширеності, видового складу та шкідливості фітонематод у насадженнях міскантусу гігантського для оцінки фітосанітарних ризиків та обґрунтування стратегії інтегрованого захисту культури від ураження її нематодозами в Україні. **Методи.** Пошук наукових публікацій в електронних базах даних і на бібліографічних платформах Scopus, Web of Science Core Collection, CAB Abstracts, AGRIS (FAO) та Google Scholar. **Результати.** За результатами моніторингових досліджень, проведених у США, Україні та Польщі, у ризосфері міскантусу гігантського (*Miscanthus* × *giganteus*) виявлено комплекс фітопаразитичних нематод, який включає представників родів *Pratylenchus*, *Helicotylenchus*, *Xiphinema*, *Longidorus*, *Paratrichodorus*, *Trichodorus*, *Heterodera*, *Hoplolaimus*, *Rotylenchus*, *Tylenchorhynchus*, *Criconemella*, *Amplimerlinius* та *Paratylenchus*. Установлено, що ектопаразитичні види родів *Xiphinema*, *Longidorus*, *Trichodorus* і *Paratrichodorus* становлять значну фітосанітарну загрозу як вектори патогенних фітовірусів. Доведено, що паразитування фітонематод ряду *Tylenchida* пригнічує основні фізіологічні процеси в рослинному організмі, що істотно знижує вихід сухої біомаси, а також створює сприятливі умови для проникнення всередину збудників грибних хвороб. Обґрунтовано необхідність впровадження обов'язкового передсадивного аналізу ґрунту та регулярного моніторингу нематодних угруповань у ризосфері міскантусу протягом усього періоду експлуатації плантацій. Запропоновано інтегровану систему захисту насаджень міскантусу від нематодозів. **Висновки.** Для підвищення ефективності вирощування міскантусу *M.* × *giganteus* в Україні необхідним є проведення системних досліджень комплексу фітопаразитичних нематод у його ризосфері. Ключовою передумовою ефективного управління нематодними ризиками у насадженнях міскантусу є передсадивний моніторинг, який дасть змогу своєчасно виявити економічно значущі види фітонематод, оцінити структуру їхніх угруповань та встановити щільність їхніх популяцій. На основі результатів цих дослідження будуть розроблені стратегії інтегрованого захисту міскантусу від ураження його нематодозами, у яких пріоритет надаватиметься профілактичним, агротехнічним та біологічним заходам, а також системному контролю нематодних угрупувань впродовж усього періоду експлуатації плантацій.

Ключові слова: міскантус гігантський; фітонематоди; видовий склад; шкідливість; пороги шкідливості; моніторинг; система інтегрованого захисту рослин.

Одержано 07.11.2025 ● **Погоджено** 10.12.2025 ● **Опубліковано онлайн** 29.12.2025

Вступ

Сучасний розвиток біоенергетики та зростання потреби у відновлюваних джерелах енергії зумовлюють інтенсивний пошук енергетичних культур, що вирізняються високою продуктивністю, екологічною безпечністю та стійкістю до впливу абіотичних і біотичних чинників [1, 2]. Однією з найперспективніших рослин для виробництва біомаси як в Україні, так і у світі є міскантус гігантський *Miscanthus* × *giganteus* J.M.Greef & Deuter ex Hodk. & Renvoize [2, 3]. На сьогодні ця біоенергетична культура відповідає ключовим глобальним і національним викликам, серед яких – необхідність зменшення викидів парникових газів, оптимізація землекористування, збільшення частки біопалива в енергетичному балансі країни, а також відновлення деградованих земель [1, 4, 5]. Особливо актуально це для України, де внаслідок тривалого антропогенного впливу та військових дій значні території зазнали суттєвої деградації [4, 6]. Вирощування на таких землях міскантусу забезпечує не лише отримання високоякісної біомаси, а й сприяє їхній фітостабілізації та фіторемедіації [1, 7–9]. Завдяки потужній, добре розвиненій кореневій системі та високій стійкості до стресових чинників ця культура допомагає відновити структуру деградованих ґрунтів і підвищити вміст в них органічної речовини [8, 9]. Наукові дослідження також свідчать, що її довготривале (20–25 років) вирощування на одному місці сприяє стабілізації ґрунтового покриву, зменшенню ерозійних процесів та підтриманню сталого вуглецевого балансу [1, 4]. Крім того, міскантус досить невимогливий до родючості ґрунтів, завдяки чому його можна використовувати на малопродуктивних землях, економічно невигідних для традиційного землеробства [2, 3, 10].

Водночас варто відзначити, що, як і інші монокультурні агроекосистеми, насадження *M.* × *giganteus* зазнають впливу низки біотичних чинників, серед яких особливе місце посідають фітопаразитичні нематоди [11–19]. Відомо, що ці облігатні паразити здатні уражувати кореневу систему рослин, спричиняючи істотні зниження їх продуктивності, а також створюючи умови для проникнення всередину вторинних патогенів – збудників вірусних та грибних хвороб [14–16, 20–24]. Такі «фітопатологічні комплекси» не лише негативно впливають на врожайність і якість біомаси, але можуть призводити до повної загибелі рослин [16–18, 20–23]. Однак, попри активне впровадження міскантусу до європейських систем агровиробництва, інформація щодо видового складу та шкідливості фітонематод у його насадженнях залишається недостатньо повною й потребує поглибленого вивчення [11, 12, 19]. А відсутність чіткої системи інтегрованого захисту рослин від ураження їх нематодозами може стати критичним обмежувальним чинником для подальшого сталого вирощування міскантусу як стратегічної енергетичної культури.

Мета дослідження – провести комплексний аналіз сучасних наукових досліджень щодо поширеності, видового складу та шкідливості фітонематод у насадженнях міскантусу гігантського для оцінки фітосанітарних ризиків та обґрунтування стратегії інтегрованого захисту культури від ураження її нематодозами в Україні.

Матеріали та методи дослідження

З метою узагальнення сучасних наукових досліджень щодо видового складу, поширеності та шкідливості фітопаразитичних нематод у ризосфері міскантусу гігантського *M.* × *giganteus*, а також аналізу підходів до оцінки фітосанітарних ризиків і формування інтегрованих стратегій захисту його насаджень від нематодозів, здійснювали пошук наукових публікацій в електронних базах даних і на бібліографічних платформах *Scopus*, *Web of Science Core Collection*, *CAB Abstracts*, *AGRIS (FAO)* та *Google Scholar*. Додатково використовували перехресний пошук за списками літератури ключових статей та пошук публікацій, які їх цитують. Пошук проводили українською та англійською мовами із застосуванням операторів AND/OR та ключових слів: *Miscanthus* × *giganteus*, фітонематоди, ризосфера, шкідливість, фітосанітарний ризик, інтегрований захист рослин.

Інформацію узагальнювали за напрямами:
- таксономічна структура нематодних комплексів у ризосфері міскантусу гігантського;
- видовий склад нематод-векторів фітовірусів;

– економічно значущі ендо- та ектопаразитичні види нематод, симптоми ураження ними рослин та шкідливість;

– підходи до моніторингу фітонематод, визначення порогів їхньої шкідливості та оцінки фітосанітарних ризиків;

– елементи інтегрованого захисту насаджень міскантусу від нематодозів (моніторинг, профілактичні, агротехнічні, біологічні та хімічні заходи).

Результати дослідження

Незважаючи на те, що міскантус гігантський *M.* × *giganteus* є новою культурою, яка вирощується в промислових масштабах лише протягом останніх двох десятиліть, дослідження біорізноманіття її ризосфери привертає дедалі більшу увагу наукової спільноти [11–13, 16, 18]. Значною мірою це стосується найпоширенішої та найчисельнішої групи безхребетних тварин – фітонематод, які мешкають в ґрунті та відіграють важливу роль у функціонуванні ґрунтової екосистеми [24–33]. Наразі відомо, що вони не тільки беруть участь у кругообігу поживних речовин, впливають на здоров'я ґрунту і можуть бути індикаторами його стану, а й одночасно є небезпечними паразитами кореневої системи багатьох культурних рослин, зокрема й міскантусу [27–31, 33].

На сьогодні у різних країнах світу вже проведено низку фундаментальних досліджень щодо визначення видового складу фітонематод та оцінки їхньої потенційної шкідливості в насадженнях міскантусу [11–19]. Зокрема, за результатами масштабного обстеження, проведеного на 35 ділянках міскантусу в США (штати Айова, Іллінойс, Джорджія, Кентуккі, Південна Дакота та Теннессі), було ідентифіковано 20 видів фітопаразитичних нематод, які потенційно можуть завдати шкоди цій біопаливній культурі. До них належать представники родів *Xiphinema* (*X. americanum*, *X. rivesi*, *Xiphinema* spp.), *Longidorus* (*L. breviannulatus*, *Longidorus* spp.), *Paratrichodorus* spp., *Pratylenchus* (*Pr. penetrans*, *Pr. hexincisus*, *Pr. scribneri*, *Pr. crenatus*), а також *Hoplolaimus galeatus*, *Heterodera glycines*, *Helicotylenchus* (*H. pseudorobustus*, *H. digonicus*, *H. platyurus*), *Tylenchorhynchus* (*T. agri*), *Criconemella* spp. та *Paratylenchus* spp. [14–16].

Аналогічні обстеження насаджень міскантусу були проведені також в Україні та Польщі. Згідно з результатами спільного нематологічного моніторингу, у цих країнах було ідентифіковано 53 види нематод, що належать до 22 родів і 10 родин [11–13, 17–19]. Серед паразитичних видів було виявлено: *Longidorus elongatus*, *L. attenuatus*, *Paralongidorus rex*, *Xiphinema brevicole*, *X. diversicaudatum*, *Trichodorus sparsus*, *T. similis*, *T. viruliferus*, *Paratrichodorus pachydermus*, *P. teres*, *Paratylenchus bukowinensis*, *P. nanus*, *P. projectus*, *P. neoamblycephalus*, *Amplimerlinius macrurus*, *Pratylenchus crenatus*, *Pr. neglectus*, *Pr. fallax*, *Pr. thornei*, *Helicotylenchus digonicus*, *H. pseudorobustus*, *Rotylenchus pumilus*, *R. robustus*, *R. reniformes*, *R. agnetis* (табл. 1) [11–13, 17–19]. Також траплялися представники родів *Mesocriconema*, *Criconema*, *Geocenamus*, *Bitylenchus*, *Merlinius*, *Neodolichorhynchus*, *Sauertylenchus* та *Scutylenchus* [11, 12, 18].

Окрім фітопаразитичних видів, у зразках ґрунту були виявлені представники чотирьох родів вільноживучих нематод – *Cylindrolaimus*, *Rhabditis*, *Plectus* і *Anaplectus*, які живляться гіфами грибів або органічними рештками (сапрофаги). Їхня присутність вказує на відносно стабільний ґрунтовий біоценоз і наявність складної трофічної структури нематодного угруповання у ризосфері міскантусу [11].

Аналіз нематологічного комплексу, який був виявлений у різних ґрунтово-кліматичних умовах, дозволив науковцям встановити, що міскантус є господарем для широкого спектра нематод, зокрема фітопаразитичних, які можуть негативно впливати на ріст і продуктивність цієї біоенергетичної культури. Особливу увагу привертає присутність ектопаразитичних видів нематод родів *Xiphinema*, *Longidorus*, *Trichodorus* та *Paratrichodorus*, які не лише пошкоджують кореневу систему рослин, але й можуть переносити два типи фітовірусів – неповіруси і тобравіруси [14, 20, 21, 34–40].

Наразі встановлено, що *X. americanum*, *X. diversicaudatum* та *X. rivesi*, які виявлені у ризосфері міскантусу, переносять цілий ряд небезпечних вірусів, а саме вірус мозаїки резухи (ArMV), мозаїки стоколосу (BMV), скручування листків вишні (CLRV), латентної кільцевої плямистості суниці (SLRSV), кільцевої плямистості гвоздики (CRSV), томатів (TomRSV) та тютюну (TobRSV) [20, 21, 34, 35, 39–41].

Таблиця 1. Видовий склад та систематичне положення фітопаразитичних нематод у ризосфері міскантусу гігантського [11–19]

Родина	Рід	Вид	Трофічна група	Країна виявлення
		Dorylaimida		
Longidoridae	*Xiphinema*	*Xiphinema americanum*, *X. rivesi*, *Xiphinema* spp.	Ектопаразит	США
		X. brevicole, *X. diversicaudatum*	Ектопаразит	Україна, Польща
	Longidorus	*Longidorus breviannulatus*, *Longidorus* spp.	Ектопаразит	США
		L. elongatus, *L. attenuatus*	Ектопаразит	Україна, Польща
	Paralongidorus	*Paralongidorus rex*	Ектопаразит	Україна, Польща
		Triplonchida		
Trichodoridae	*Paratrichodorus*	*Paratrichodorus* spp.	Ектопаразит	США
		Paratrichodorus pachydermus, *P. teres*	Ектопаразит	Україна, Польща
	Trichodorus	*Trichodorus sparsus*, *T. similis*, *T. viruliferus*	Ектопаразит	Україна, Польща
		Tylenchida		
Pratylenchidae	*Pratylenchus*	*Pratylenchus penetrans*, *P. hexincisus*, *P. scribneri*, *P. crenatus*	Мігруючий ендопаразит	США
		P. crenatus, *P. neglectus*, *P. fallax*, *P. thornei*	Мігруючий ендопаразит	Україна, Польща
Hoplolaimidae	*Hoplolaimus*	*Hoplolaimus galeatus*	Екто- / напівендопаразит	США
	Helicotylenchus	*Helicotylenchus pseudorobustus*, *H. digonicus*, *H. platyurus*	Екто- / напівендопаразит	США
		H. pseudorobustus, *H. digonicus*	Екто- / напівендопаразит	Україна, Польща
	Rotylenchus	*Rotylenchus pumilus*, *R. robustus*, *R. agnetis*	Екто- / напівендопаразит	Україна, Польща
	Rotylenchulus	*Rotylenchulus reniformes*	Екто- / напівендопаразит	Україна, Польща
Heteroderidae	*Heterodera*	*Heterodera glycines*	Седентарний ендопаразит	США
Telotylenchidae	*Tylenchorhynchus*	*Tylenchorhynchus agri*	Ектопаразит	США
Merliniidae	*Amplimerlinius*	*Amplimerlinius macrurus*	Ектопаразит	Україна, Польща
Criconematidae	*Criconemella*	*Criconemella* spp.	Ектопаразит	США
Paratylenchidae	*Paratylenchus*	*Paratylenchus* spp.	Ектопаразит	США
		Paratylenchus bukowinensis, *P. nanus*, *P. projectus*, *P. neoamblycephalus*	Ектопаразит	Україна, Польща

Види, які належать до роду *Longidorus*, зокрема *L. elongatus* та *L. attenuatus*, сприяють ураженню рослин вірусами чорної кільцевої плямистості томатів (TBRV) та кільцевої плямистості малини (RRSV) [36, 38, 40]. Щодо фітонематод з родів *Trichodorus* (*T. similis*, *T. viruliferus*) та *Paratrichodorus* (*P. pachydermus*, *P. teres*), то вони можуть передавати два віруси – вірус погремковості тютюну (TRV) та раннього побуріння гороху (PEBV) [20, 21, 34, 36, 37].

Із переліку наведених вище вірусів особливе занепокоєння викликає вірус мозаїки стоколосу (*Brome mosaic virus*, BMV). Цей вірус уражує багато важливих сільськогосподарських культур родини Злакові (*Poaceae*), зокрема ячмінь, пшеницю, кукурудзу, просо, овес, рис, сорго, а також багаторічні трави, до яких належить і міскантус [42–44]. На відміну від багатьох інших фітовірусів, BMV характеризується високою стабільністю та здатністю легко поширюватися механічним шляхом (через пошкодження тканин технікою), за допомогою комах-переносників, зокрема попелиць та деяких видів жуків, а також переноситися нематодою *X. diversicaudatum* [20, 34, 39, 41, 45].

Дослідження довели, що ураження рослин вірусом мозаїки стоколосу спричиняє деформацію, пожовтіння та відмирання листків, значне відставання в рості та зниження врожайності. Так, за раннього інфікування посівів пшениці BMV втрати врожаю зерна можуть досягати 61%, що призводить до суттєвих економічних збитків [42, 43]. З огляду на те, що міскантус вирощується як монокультура впродовж багатьох років (більше 20 років на одному місці), накопичення в ґрунті інфекції та збільшення чисельності фітонематод з роду *Xiphinema*, які здатні посилити вразливість кореневої системи до збудників вірусних хвороб, може становити серйозну загрозу для виробництва біопалива в майбутньому [14].

Також не варто недооцінювати присутність у ризосфері міскантусу нематод родини *Trichodoridae* (роди *Trichodorus* та *Paratrichodorus*). Хоча вони більше відомі як переносники вірусів для картоплі, ці нематоди завдають значної шкоди і зерновим культурам – пшениці, ячменю, вівсу та кукурудзі [20, 21, 36, 37]. Внаслідок їхнього живлення бічні корені рослин стають короткими та потовщеними, утворюючи характерні симптоми «обірваних коренів» (*stubby root*), що призводить до порушення водо- та мінерального живлення, пригнічення росту, а іноді – до загибелі рослин [37, 38]. Наразі в Україні та Польщі виявлено п'ять видів фітонематод цієї родини, що необхідно враховувати під час проведення подальших нематологічних досліджень [11].

Окрім фітонематод ряду *Dorylaimida* та *Triplonchida*, у переліку паразитичних видів, виявлених у насадженнях міскантусу, значну частку становлять представники, які належать до ряду *Tylenchida*. Насамперед привертає увагу присутність видів двох родів – *Heterodera* та *Pratylenchus*, оскільки саме ці фітонематоди посідають відповідно другу та третю позиції у світовому рейтингу найбільш економічно шкідливих паразитів багатьох сільськогосподарських культур [46, 47].

Зокрема, у США було виявлено соєву цистоутворювальну нематоду *H. glycines*, яка уражує посіви сої, викликаючи захворювання під назвою жовта карликовість (*yellow dwarf disease* або *daizu-iwo-byo*) [16, 48, 49]. Проте відомо, що цей вид нематоди передусім завдає шкоди рослинам із родини бобові (*Fabaceae*), тому його присутність у ризосфері міскантусу не призведе до ураження цієї культури, адже міскантус, як зазначалося раніше, належить до родини злакові (*Poaceae*), які не є рослинами-господарями *H. glycines* [48, 50].

Дослідженнями доведено, що вирощування злакових культур (пшениці, кукурудзи та ін.) на полях, заражених соєвою нематодою, сприяє суттєвому зниженню її популяції в ґрунті, оскільки личинки *H. glycines* не здатні живитися та завершити свій життєвий цикл на таких рослинах [48, 51]. Водночас повністю знищити цього паразита в насадженнях міскантусу буде складно, адже він може підтримувати свою чисельність, харчуючись на понад 100 видах бур'янів, серед яких найсприятливішими господарями є глуха кропива пурпурова *Lamium purpureum*, глуха кропива стеблообгортна *Lamium amplexicaule*, талабан польовий *Thlaspi arvense* та інші види [52]. Варто зазначити, що в Україні станом на 2025 рік соєву цистоутворювальну нематоду *H. glycines* внесено до Переліку регульованих шкідливих організмів (список А-1) як карантинний об'єкт, що наразі відсутній на території нашої держави [53].

На відміну від попереднього виду, представники родини *Pratylenchidae* (рід *Pratylenchus*) мають надзвичайно широке коло господарів, уражуючи майже 400 видів рослин із різних родин [46, 47]. Зокрема, вони завдають суттєвої шкоди посівам пшениці, кукурудзи, картоплі, цукрових буряків та тростини, а також бобовим, овочевим, плодовим, хвойним і декоративним культурам [27, 54].

На сьогодні в країнах, де проводили нематологічні обстеження насаджень міскантусу, було виявлено сім видів пратиленхів: *Pr. thornei*, *Pr. penetrans*, *Pr. neglectus*, *Pr. hexincisus*, *Pr. scribneri*, *Pr. crenatus та Pr. fallax* [11, 15, 16]. На думку вчених, перші три види є найбільш шкідливими серед понад 100 описаних представників цього роду [46, 47, 54].

Ці мігруючі ендопаразити проникають у корінь у зоні його росту та кореневих волосків, після чого мігрують і живляться переважно всередині клітин кортикальної паренхіми, утворюючи тунелеподібні порожнини; окремі особини здатні проникати навіть у центральну стелу кореня [47, 54]. Унаслідок їхньої життєдіяльності на поверхні коренів утворюються глибокі некротичні рани темно-коричневого або майже чорного кольору, з подальшим розтріскуванням епідермісу [27, 47].

Паразитування пратиленхів спричиняє затримку росту й розвитку рослин, порушення водного режиму, хлороз та зменшення розміру листя [47, 54]. Саме ці фітонематоди є однією з основних причин явища «ґрунтовтомлення» [47]. Встановлено, що за сумісного ураження посівів пшениці нематодами *Pr. thornei* та *Pr. neglectus* втрати врожаю можуть сягати 56–74% [55]. Крім того, численними дослідженнями підтверджено, що механічне пошкодження пратиленхами тканин кореневої системи пшениці та кукурудзи підвищує вразливість цих культур до ураження грибами родів *Fusarium* та *Colletotrichum* відповідно, що призводить до додаткових втрат урожаю [21, 23]. Наразі дані щодо суттєвої шкідливості виявлених видів *Pratylenchus* у насадженнях міскантусу обмежені, що зумовлює необхідність проведення подальших досліджень для оцінки їхнього реального впливу на продуктивність культури [11].

Окрему групу серед виявлених фітонематод становлять представники роду *Paratylenchus* – одні з найдрібніших паразитів кореневої системи рослин [24, 56–60]. У насадженнях міскантусу ідентифіковано чотири види цього роду: *P. bukowinensis*, *P. nanus*, *P. projectus* та *P. neoamblycephalus* [11, 16].

За типом живлення паратиленхи є ектопаразитами – за допомогою подовженого стилета вони проколюють епідермальні клітини кореня, не занурюючись у тканини рослини-живителя [31, 56, 61–64]. Попри малі розміри, за високої щільності популяції в ґрунті ці нематоди спричиняють помітне пригнічення росту та розвитку рослин [60, 61, 64]. Особливо небезпечним вважається вид *P. projectus*, який здатний викликати затримку росту та пожовтіння вегетативної маси злакових культур [60]. Хоча пряма загибель посівів від цього виду спостерігається вкрай рідко, встановлено, що він суттєво знижує ефективність використання рослинами мінеральних добрив та води, а також зменшує інтенсивність їхнього кущення [60].

У багаторічних насадженнях, таких як міскантус, поступове накопичення в його ризосфері *P. projectus* може спричинити передчасне старіння плантації та зниження виходу біомаси [12, 13, 56, 60]. Хоча нематоди роду *Paratylenchus* вважаються менш агресивними порівняно з ендопаразитичними видами (наприклад, роду *Pratylenchus*) [27, 54], їхня присутність у складі паразитарного комплексу може призвести до зниження продуктивності культури, особливо на легких за механічним складом ґрунтах [57, 60–61, 64]. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на встановлення економічних порогів шкідливості паратиленхів та вивчення динаміки їхньої чисельності залежно від віку насаджень.

До переліку паразитичних видів також увійшли представники родів *Rotylenchus* та *Helicotylenchus* (родина *Hoplolaimidae*), відомі як спіральні нематоди [31, 65–68]. Ці мігруючі ектопаразити та напівендопаразити мають широке коло рослин-живителів і відіграють важливу роль у зниженні продуктивності різних сільськогосподарських культур, зокрема й багаторічних злакових культур, до яких належить міскантус [26, 27, 61, 62, 64, 66, 67].

Зокрема, в Україні було виявлено декілька видів роду *Rotylenchus*, а саме *R. agnetis*, *R. pumilus*, *R. robustus*, а також представник спорідненого роду *Rotylenchulus reniformis* [11, 19]. Особливу увагу привертає *R. agnetis*, який визначено як специфічний паразит насаджень міскантусу в умовах нашої країни [19]. На відміну від типових ектопаразитів, цей вид є напівендопаразитом (*semi-endoparasite*) [65–67]. Завдяки подовженому стилету *R. agnetis* здатний частково занурюватися в корінь, руйнуючи клітини кортикальної паренхіми, що спричиняє утворення некротичних ділянок та знижує абсорбційну здатність кореневої системи рослини [65, 66]. Ще одним небезпечним видом є *R. robustus*, який часто зустрічається у різних агроценозах [47, 66–69]. Через значні розміри тіла (до 1,2–1,8 мм) та довгий стилет він завдає рослинам глибоких механічних пошкоджень, що призводить до помітного пригнічення росту не лише злакових, а й овочевих культур (морква, салат) та сіянців хвойних дерев у лісорозсадниках [66, 69].

Постійно трапляється у ризосфері багаторічних насаджень також вид *R. pumilus*. Хоча він вважається дрібним представником роду, його роль у патогенезі енергетичних культур наразі активно досліджується в межах моніторингу сталого розвитку плантацій [19].

Науковці встановили, що для багаторічних плантацій міскантусу накопичення в ґрунті таких видів як *R. agnetis* та *R. pumilus* є критичним біотичним чинником [13, 19]. Адже відомо, що саме ці види часто зумовлюють явище «втоми ґрунту», яке згодом може призвести до помітного зниження виходу біомаси рослин [26, 40, 47].

Значне місце у родині Hoplolaimidae посідають представники роду *Helicotylenchus* [61, 62, 64, 66, 70–72]. У посівах енергетичних культур наразі виявлено три види: *H. digonicus*, *H. platyurus* та *H. pseudorobustus* [11, 16]. Останній вважається одним із найбільш агресивних видів цього роду [71, 72]. За типом живлення він є мігруючим ектопаразитом, проте здатний до напівендопаразитизму, частково занурюючи передню частину тіла в кортикальну паренхіму кореня [66, 71]. Його паразитування спричиняє утворення чітких некротичних плям на корінні рослин, що призводить до деформації кореневої системи та зниження її поглинальної здатності [67, 72].

Значно поширений у посівах злакових трав і добре адаптований до різних типів ґрунтів вид *H. digonicus* [70, 72]. Висока щільність популяції в ґрунті цього виду призводить до затримки росту рослин та підвищення їхньої чутливості до водного стресу через порушення гідравлічної провідності уражених коренів [26, 27, 72].

Найменш агресивним, порівняно з попередніми видами, є вид *H. platyurus* [66, 72]. Проте науковці вже відмітили тенденцію до зростання його чисельності в ризосфері багаторічних насадженнях міскантусу, що створює ризики для продуктивності рослин у довгостроковій перспективі [13].

Також варто добавити, що механічні пошкодження кореневої системи рослин, спричинені фітонематодами родів *Rotylenchus* та *Helicotylenchus*, стають «вхідними воротами» для проникнення всередину вторинних ґрунтових патогенів. Зокрема, це сприяє інфікуванню рослин грибами роду *Fusarium* та ін., що сприяє розвитку комплексних кореневих гнилей [21, 23].

На сьогодні вчені розглядають сумарну шкідливість спіральних нематод у насадженнях міскантусу як чинник «хронічного виснаження рослин» [26, 40, 47]. За прогностичними оцінками, це може призвести до недобору сухої біомаси в межах 10–15% [12, 13]. З огляду на таку ситуацію, регулярний моніторинг чисельності цих паразитичних видів у ґрунті є обов'язковою умовою для прогнозування довговічності та рентабельності енергетичних плантацій [13, 18].

У США в насадженнях міскантусу був виявлений ще один представник родини *Hoplolaimidae – H. galeatus*, відомий як «ланцетоподібна нематода» [16]. Цей вид є одним із найнебезпечніших фітопаразитів, здатним уражати широкий спектр культур – від багаторічних злакових трав до лісових дерев [73, 75, 76]. Біологічною особливістю *H. galeatus* є те, що він може живитися клітинами кореня, перебуваючи як зовні (ектопаразит), так і повністю занурюючись усередину рослинної тканини (ендопаразит) [73, 76].

Механічне руйнування клітин кореня потужним стилетом нематоди у поєднанні з виділенням агресивних ферментів призводить до появи на його поверхні характерних коричневих або чорних плям та спричиняє масове відмирання кореневих волосків [74–76]. Унаслідок цього уражені рослини стають низькорослими, спостерігається їхнє передчасне в'янення, а через неспроможність пошкодженої кореневої системи засвоювати азот та інші мінеральні речовини листя поступово жовтіє [26, 40, 75]. Крім прямої шкоди, пошкодження, завдані *H. galeatus*, сприяють ураженню рослин збудниками грибних хвороб, що може значно прискорити загибель насаджень [21, 23, 73].

На сьогодні в Україні та країнах ЄС цей вид перебуває під пильним наглядом фітосанітарних служб [53, 73]. Попри те, що станом на 2025 рік *H. galeatus* ще не внесено до офіційного переліку карантинних організмів України (списки А1 та А2), фахівці Держпродспоживслужби та науковці класифікують цей вид як об'єкт високого фітосанітарного ризику [53, 73]. Є реальна загроза занесення цього паразита на територію нашої держави разом з імпортованим ґрунтом або зараженим садивним матеріалом [73–76]. Здатність нематоди успішно акліматизуватися в умовах помірного клімату Європи створює потенційно високий рівень небезпеки для стратегічних галузей – зернового господарства, лісівництва та вирощування енергетичних культур, зокрема і міскантусу [40, 73]. У зв'язку з цим експерти наголошують на необхідності посиленого лабораторного контролю за імпортованими рослинами-господарями та проведенні регулярного моніторингу плантацій [73]. Своєчасна діагностика за допомогою молекулярно-генетичних методів (ПЛР) є критично важливою для недопущення поширення цього небезпечного фітопаразиту в Україні [70, 71, 73].

Окрему увагу серед паразитичної фауни міскантусу в Україні заслуговує вид *A. macrurus* [17]. Це мігруюча ектопаразитична нематода, чия присутність у ризосфері *M.* × *giganteus* була вперше зафіксована вітчизняними та закордонними науковцями під час комплексного обстеження плантацій у зоні Лісостепу [17]. Як представник родини *Merliniidae*, цей вид спеціалізується на живленні тканинами коренів рослин родини злакові (*Poaceae*) [77]. Завдяки відносно масивному стилету *A. macrurus* проколює епідермальні клітини та клітини паренхіми кореня, висмоктуючи їхній вміст. На відміну від ендопаразитів, він не проникає всередину тканини, проте його постійна міграція та численні мікропроколи призводять до значного скорочення об'єму кореневої системи рослин, особливо тонких всисних корінців. Це знижує ефективність поглинання води та мінеральних речовин із ґрунті, що робить рослини вразливими до кліматичних стресів, зокрема посух, та суттєво обмежує вихід сухої біомаси [77].

З урахуванням того, що міскантус використовується не лише як енергетична культура, а й як інструмент фіторемедіації для відновлення техногенно забруднених, деградованих та малопродуктивних ґрунтів, дослідження *A. macrurus* набуває додаткового фундаментального значення. Динаміка чисельності цього виду в ризосфері може відображати загальний стан ґрунтової екосистеми, зокрема рівень антропогенного навантаження, структуру мікробіоценозів і доступність поживних елементів. У цьому контексті *A. macrurus* може розглядатися як біоіндикатор змін ґрунтового середовища в багаторічних насадженнях міскантусу [13, 17].

Хоча наразі тривають дослідження щодо визначення точного порогу шкідливості *A. macrurus* саме для міскантусу, цей вид уже розглядається як потенційно небезпечний паразит і збільшення його чисельності в ґрунті є лише питанням часу [17]. Зважаючи на це, подальше вивчення біоекології *A. macrurus* та впровадження системного моніторингу його популяцій є важливими завданнями, вирішення якого дасть змогу контролювати фітосанітарний стан сучасних плантацій міскантусу.

Ще одним із небезпечних видів фітонематод, який був виявлений у насадженнях міскантусу, є *T. agri*, що належить до родини *Telotylenchidae* і є типовим мігруючим ектопаразитом злакових культур, а також багаторічних трав та газонних покриттів [16, 78, 79]. Він не занурюється в тканини кореня повністю, а переміщується в ґрунті від однієї рослини до іншої, живлячись клітинами епідермісу та кореневих волосків. За високої щільності популяції *T. agri* в ґрунті спостерігається затримка росту рослин, коренева система стає слабко розгалуженою, а кореневі волоски відмирають. Це спричиняє зниження здатності рослини поглинати воду та поживні речовини та призводить до хлорозу листків. Хоча поодинокі особини не завдають суттєвої шкоди міскантусу, їхня висока чисельність може призвести до його виснаження. Це особливо небезпечно на ранніх етапах вирощування, т. б. в перші один-три роки, коли молоді рослини найбільш вразливі до ураження їх нематодозами. Тому моніторинг чисельності *T. agri* в перші роки вегетації культури є необхідним для оцінки загального фітосанітарного стану енергетичних насаджень, оскільки його синергічна взаємодія з іншими видами нематод може призводити до суттєвих втрат біомаси, особливо в умовах обмеженого вологозабезпечення [16].

Варто також розглянути фітонематод роду *Criconemella*, відомих як кільчасті нематоди (*ring nematodes*) [80–83]. Представники цього роду є специфічною групою ектопаразитичних нематод, які все частіше зустрічаються в ризосфері багаторічних злакових культур. За допомогою потужного стилету вони проколюють клітини епідермісу та кортикальної паренхіми кореня рослин, що призводить до припинення поділу клітин у точках їхнього росту [80–83]. Зазвичай ураження міскантусу цими нематодами часто не має специфічних ознак на ранніх стадіях розвитку рослин, проте за високої щільності їхніх популяцій спостерігається пожовтіння пагонів, затримка росту та формування вкороченої, деформованої кореневої системи. Наукові дослідження підтверджують, що кільчасті нематоди є потенційними патогенами біоенергетичних культур [11, 16]. Їхня присутність у ґрунті може спричинити зниження виходу сухої біомаси, особливо на плантаціях старше 5 років, де чисельність паразитів здатна досягнути критичних рівнів. Враховуючи малорухливий спосіб життя цих фітонематод, їхня присутність у ґрунті є негативним біотичним чинником, що вимагає регулярного моніторингу на всіх етапах вирощування міскантусу.

Окрім визначення видового складу фітопаразитичних нематод у насадженнях міскантусу, науковці також намагалися встановити економічні пороги їхньої шкідливості (ЕПШ) для цієї культури [16]. Проте розрахунок критичного рівня чисельності нематод саме для міскантусу виявився надзвичайно складним і методично проблематичним. Основною причиною цього є біологічні й агротехнічні особливості культури, зокрема її довготривалий цикл вирощування – міскантус зазвичай вирощується як монокультура протягом 20–25 років [2, 3, 5, 10].

Сьогодні переважна більшість методик щодо визначення ЕПШ розроблена для короткоротаційних однорічних культур, таких як пшениця, кукурудза, ячмінь та інші зернові, де шкідливість від ураження їх нематодозами проявляється вже протягом одного вегетаційного періоду і може безпосередньо впливати на урожайність посівів [84–88]. Приміром, Mekete et al. у своїх дослідженнях спираються на пороги шкідливості нематод, які були визначені для газонних трав [16]. За їхніми даними, пороговими значеннями на 100 см³ ґрунту вважається чисельність: для *Pratylenchus* spp. – 50–100 особин, *Helicotylenchus* spp. – 300 і більше, *Xiphinema* spp. – 50–100, *Hoplolaimus* spp. – 40–150, *Longidorus* spp. – 5–25, *Tylenchorhynchus* spp. – 150–300, *Criconemella* spp. – 300–600 [84, 85]. Водночас, за даними українських вчених, втрати врожаю пшениці спостерігаються вже за сумарної чисельності фітопаразитичних нематод у межах 28–479 особин на 100 см³ ґрунту [88]. Натомість застосування таких підходів до багаторічних насаджень міскантусу є некоректним, оскільки накопичувальний ефект ураження кореневої системи нематодами проявляється поступово і часто стає помітним лише через кілька років після закладання плантації. Адже, як було зазначено раніше, негативний вплив окремих видів або всього комплексу паразитичних нематод на ріст і розвиток міскантусу не має миттєвого характеру. Їхня шкідливість у ризосфері рослин стає очевидною, коли внаслідок тривалої «діяльності» цих паразитів відбувається значне відмирання кореневої системи, зниження інтенсивності поглинання води й елементів живлення, а також погіршення загального фітосанітарного стану насаджень. Для однорічних культур, що вирощуються в сівозміні, подібний довгостроковий кумулятивний ефект не є характерним, що ще більше ускладнює пряме порівняння рівнів шкідливості для різних культур.

Додатковою складністю є розрахунок кількісної оцінки втрат урожаю біомаси рослин. Якщо для зернових культур зниження врожайності легко вимірюється у фізичних одиницях (тонах зерна з гектара), то для міскантусу, який формує суху біомасу протягом багатьох років, така оцінка є менш стандартизованою та залежить від низки чинників – віку насаджень, погодних умов, технології вирощування та інтенсивності ураження кореневої системи фітопаразитами [2]. За прогностичними даними, втрати врожаю сухої біомаси міскантусу внаслідок ураження його нематодозами можуть становити в середньому 10–15%, однак ці показники потребують подальшого уточнення в довгострокових польових експериментах.

Значною проблемою також є те, що багато видів нематод, зокрема представники ряду *Dorylaimida*, є переносниками фітовірусів, тоді як представники ряду *Tylenchida*, ушкоджуючи кореневу систему рослин, відкривають так звані «вхідні ворота» для проникнення збудників фітопатогенних грибів, зокрема *Fusarium*, *Pythium* та ін. [20, 21, 23, 89]. У результаті формується складний фітопатологічний комплекс, сукупна шкода від якого істотно перевищує негативний вплив кожного окремого патогену [89]. Це значно ускладнює визначення ЕПШ для кожного виду нематод окремо, оскільки фактичні втрати врожаю є результатом взаємодії кількох біотичних, а також абіотичних чинників [47].

Вирощування міскантусу на одному місці впродовж багатьох років також визначає особливу специфіку контролю фітопаразитичних нематод у його ризосфері. На відміну від системи захисту однорічних культур, де після збирання врожаю можна провести глибоку оранку ґрунту, застосувати сівозміну та інші заходи, на багаторічних плантаціях міскантусу після висаджування ризом захистити рослини від нематод стає майже неможливо без знищення самої плантації. Тому, на думку науковців, стратегія контролю цих паразитів у ризосфері цієї культури повинна базуватися на принципі «попередити краще, ніж компенсувати» [90–92].

Ключовим елементом такого підходу є, по-перше, ретельний нематологічний моніторинг ділянки ще до закладання насаджень, а, по-друге, системні обстеження ґрунту впродовж усього періоду їх експлуатації [62, 92, 93]. Так, метою передпосадкового моніторингу є встановлення видового складу фітопаразитичних нематод, визначення щільності їхніх популяцій та структури нематодного угруповання. Це дозволяє ідентифікувати економічно значущі види та оцінити потенційні ризики зниження продуктивності плантації за ураження ними рослин [62, 90, 94].

Для цього до висаджування ризом міскантусу проводять відбирання проб ґрунту за сіткою або маршрутною схемою з формуванням середніх зразків для загальної нематологічної оцінки ділянки [62]. Водночас необхідно здійснювати цільовий відбір проб у зонах підвищеного ризику, зокрема у місцях перезволоження, зонах ущільнення ґрунту, по краях поля, а також на ділянках, де спостерігалося пригнічення росту і розвитку рослин попередніх культур [95].

Лабораторний аналіз зразків має включати екстракцію нематод із ґрунту, їхню морфологічну ідентифікацію, а для таксономічно складних або найбільш ризикових груп – підтвердження видової належності за допомогою молекулярних методів (наприклад ПЛР) [62, 93]. Результати проведених аналізів повинні містити дані як щодо якісного складу нематодних угруповань, так і кількісні показники щільності їх популяцій (особин/100 $см^3$ ґрунту).

Оскільки універсальні пороги шкідливості фітонематод для міскантусу ще перебувають на стадії опрацювання, то рішення щодо закладання його плантації доцільно приймати на основі ризик-орієнтованого підходу. Цей підхід базується на аналізі наявності в ґрунті найбільш небезпечних таксонів – мігруючих ендопаразитів та нематод-переносників вірусів, а також оцінці їхньої чисельності та рівня домінування в нематодокомплексі [96, 97].

У разі виявлення високих ризиків рекомендується зміна ділянки або відтермінування садіння до проведення комплексу превентивних агротехнічних заходів, які включають: застосування сівозміни (один-три роки) з підбором культур-попередників або покривних культур, що знижують чисельність найбільш небезпечних видів нематод, вирощування та заорювання в ґрунт біомаси сидеральних і біофумігаційних культур родини *Brassicaceae*, збагачення ґрунту органічною речовиною з метою підвищення його супресивності, підтримання належної аерації ґрунту та уникнення його ущільнення, забезпечення збалансованого мінерального живлення рослин [26, 29, 61, 64, 94, 95, 98, 99].

Завершальним етапом передсадивної підготовки ділянки є обов'язкове повторне контрольне обстеження ґрунту для верифікації ефективності проведених агротехнічних заходів [90].

Після вибору ділянки для закладки багаторічних насаджень міскантусу особливу увагу слід приділяти профілактичним заходам для запобігання занесення нематод разом із ґрунтом і садивним матеріалом. Для цього необхідно використовувати ризоми виключно з сертифікованих розсадників, мінімізувати перенесення ґрунту з ними, ретельно очищати техніку та робочі органи при переміщенні між ділянками (особливо за умов підвищеної вологості), знищувати бур'яни-господарі та самосів попередніх культур, які можуть підтримувати розмноження популяцій нематод у ґрунті [61, 64, 96, 100].

Ще одним із важливих і перспективних компонентів інтегрованої системи захисту міскантусу від нематодозів є біологічні заходи. Вони охоплюють використання антагоністичних мікроорганізмів, спеціалізованих біопрепаратів нематоцидної дії, механізми індукції системної стійкості рослин та стимулювання регенеративних процесів їх кореневої системи [97–99, 101, 102]. Слід зауважити, що їхня ефективність критично залежить від початкової щільності популяцій фітонематод (що додатково підкреслює пріоритетність передсадивного моніторингу), едафічних чинників, вмісту органічної речовини в ґрунті, а також системності застосування біоагентів та їхньої інтеграції з іншими заходами захисту, зокрема профілактичними та агротехнічними [99]. На сьогодні впровадження біоконтролю фітонематод у промислових насадженнях міскантусу є актуальним напрямом, який потребує поглибленого вивчення для розроблення адаптованих схем захисту, що відповідали б екологічним та економічним вимогам до вирощування біоенергетичних культур.

Щодо застосування хімічних препаратів для зниження чисельності паразитичних видів нематод у насадженнях міскантусу, то на сьогодні дозволених до використання нематоцидів в Україні немає. Така ситуація зумовлена високою токсичністю більшості фумігантів та фосфорорганічних сполук і суперечить концепції екологічно безпечного вирощування біоенергетичних культур [91, 102]. Більше того, тривалий період вегетації міскантусу на одному місці робить суцільне хімічне знезараження ґрунту економічно недоцільним та небезпечним для корисного ґрунтового мікробіому. Враховуючи загальноєвропейську тенденцію до скорочення використання синтетичних пестицидів, основна увага в захисті міскантусу зміщується на превентивні агротехнічні та біологічні заходи контролю, які дозволяють стримувати зростання щільності популяцій фітонематод без негативного впливу на довкілля [90–92].

Після проведення передпосадкових заходів та безпосереднього закладання плантації міскантусу необхідно проводити регулярний нематологічний моніторинг його ризосфери, який доцільно здійснювати у ключові фази вегетації рослин та зі щорічною періодичністю. Це дозволить дослідникам і практикам відстежувати динаміку чисельності та сукцесійні зміни домінуючих груп фітонематод у багаторічному циклі вирощування культури, своєчасно виявляти вогнища пригнічення росту або випадання рослин, що дає змогу оперативно коригувати агротехнічні заходи на локальному рівні, об'єктивно оцінювати пролонговану ефективність застосованих біологічних агентів та агротехнічних методів контролю нематодозів, корелювати дані лабораторного аналізу з візуальними польовими індикаторами, такими як нерівномірність висоти стеблостою, передчасне в'янення, зрідження насаджень та прояви симптомів кореневих гнилей [62]. Особливого значення такий моніторинг набуває у контексті виявлення латентних інфекцій, спричинених мігруючими ендо- та ектопаразитами, чия шкідливість часто маскується під дефіцит елементів живлення або посуху. Більше того, згодом, такий системний моніторинг може стати основою для формування комплексних баз даних щодо фітосанітарного стану багаторічних біоенергетичних агроценозів [12, 13, 18]. Це є дуже важливим для моделювання та прогнозування довгострокової продуктивності плантацій, оскільки дозволяє розраховувати кумулятивний негативний вплив нематодних угрупувань на кореневу систему рослин протягом десятиліть. Крім того, результати нематологічного моніторингу можуть бути інтегровані з даними агрохімічного та мікробіологічного аналізу ґрунту, що дозволяє сформувати цілісне уявлення про функціонування ризосфери міскантусу та взаємозв'язки між фітонематодами, корисною і шкідливою мікрофлорою та рослиною-господарем [12, 13]. Саме такий міждисциплінарний підхід створює наукове підґрунтя для розроблення адаптивних, екологічно безпечних систем захисту культури, орієнтованих не лише на зниження шкідливості цих паразитів, а й на підтримання ґрунтового біорізноманіття. Наразі такі дослідження активно проводять у багатьох країнах світу, зокрема в межах міжнародних програм із декарбонізації та відновлення деградованих ландшафтів [1, 7]. Тому регулярний нематологічний моніторинг слід розглядати не як разовий діагностичний захід, а як невід'ємний елемент довгострокового управління плантаціями міскантусу. Науковці впевнені, що його впровадження сприятиме підвищенню стабільності агроекосистем, зниженню фітосанітарних ризиків і забезпеченню прогнозованої, економічно обґрунтованої продуктивності біоенергетичних насаджень упродовж усього періоду їх експлуатації, мінімізуючи при цьому пестицидне навантаження на довкілля [33, 92, 93].

Таблиця 2. Система інтегрованого захисту (СІЗ) насаджень міскантусу гігантського від фітопаразитичних видів нематод

Компонент СІЗ	Конкретні заходи	Цільові групи та фітосанітарні ризики	Етап застосування	Ключовий результат
Передсадивний нематологічний моніторинг (обов'язково)	Відбір зразків ґрунту та екстракція із них нематод; ідентифікація видового складу; розрахунок індексів різноманіття та щільності популяції	Комплекс фітопаразитичних видів нематод	До закладання плантації міскантусу (за 3–6 місяців)	Рішення про придатність ділянки та її зонування; вибір стратегії підготовки ґрунту до закладання плантації міскантусу
Профілактичні заходи та фітосанітарний контроль	Використання здорового садивного матеріалу (ризомів); очищення с.-г. техніки від ґрунту; знищення бур'янів-резерваторів нематод	Ризик інтродукції карантинних та інших фітопаразитичних видів нематод; транслокація інвазійного фону між ділянками; підтримання популяцій нематод бур'янами-господарями	Перед садінням + протягом всього циклу вирощування міскантусу	Запобігання первинному зараженню ділянки фітонематодами та їхньому подальшому поширенню
Сівозміна	Дотримання перерви (один-три роки) після вирощування зернових культур (пшениця, кукурудза), які є спільними рослинами-господарями для фітонематод	Комплекс фітопаразитичних видів нематод	За один-три роки до закладання плантації міскантусу	Зниження початкової чисельності популяцій нематод в ґрунті
Використання сидератів / біофумігаціних культур	Вирощування та заорювання зеленої біомаси в ґрунт сидеральних культур (гірчиця біла, гірчиця сарептська, редька олійна)	Комплекси фітопаразитичних видів нематод та збудників хвороб рослин	Підготовчий етап перед закладанням плантації міскантусу	Оздоровлення та покращення структури ґрунту; пригнічення розвитку нематод та інших паразитів; стимуляція природної супресивності ґрунту
Посилення супресивності ґрунту	Внесення компосту та органічних меліорантів для стимуляції розвитку грибів-нематофагів (*Arthrobotrys* та ін.) і хижих нематод (*Mononchida*)	Дисбаланс ґрунтової біоти; накопичення вузькоспеціалізованих видів фітонематод у ґрунті	До закладання плантації міскантусу + регулярне підживлення впродовж експлуатації	Формування саморегульованої екосистеми; посилення природного антагонізму та біологічного стримування фітонематод
Оптимізація живлення та імуномодуляція	Збалансоване внесення K, Ca та Si для зміцнення клітинних стінок та посилення лігніфікації тканин кореня рослин	Фізіологічне виснаження та зниження толерантності рослин; ураження вторинними грибними та вірусними патогенами	Протягом вегетації міскантусу (регулярно)	Підвищення механічної стійкості коренів до проникнення нематод; обмеження розвитку кореневих гнилей; активізація системної імунної відповіді рослин на ураження паразитами
Біологічний контроль та біостимуляція	Застосування біопрепаратів на основі грибів-антагоністів (*Trichoderma*, *Paecilomyces* / *Purpureocillium* й ін.) та ентомопатогенних бактерій (*Bacillus* spp.)	Личинки та яйця фітонематод; стимуляція росту кореневих волосків	Під час садіння (інокуляція ризомів) + щорічне внесення у міжряддя	Пролонговане стримування шкідливості фітонематод; швидка регенерація кореневої системи; активізація росту кореневих волосків
Хімічні заходи (терапевтичні)	Локальне застосування дозволених нематоцидів за умови перевищення чисельності нематод економічного порогу шкідливості (ЕПШ)	Висока чисельність деяких видів нематод; загроза повної загибелі молодих рослин міскантусу	Ранні етапи органогенезу рослин міскантусу (перший-другий рік вегетації)	Локалізація критичних вогнищ нематодозів; збереження густоти насаджень
Системний нематологічний моніторинг (обов'язково)	Періодичний нематологічний контроль ризосфери рослин; виявлення «гарячих точок» за допомогою GPS / NDVI-картування; корегування системи заходів захисту	Сукцесійні зміни в нематодних угрупованнях; ризик передчасної деградації плантації міскантусу	Щорічно (фаза активного росту рослин та перед зимівлею)	Об'єктивний аналіз нематол. стану насаджень міскантусу; оцінка ефективності заходів захисту; стратегічне прогнозування врожайності плантації на 10–15 років

Висновки

Для забезпечення сталого розвитку біоенергетичного сектору України та підвищення ефективності вирощування міскантусу (*M.* × *giganteus*) необхідним є проведення системних, довгострокових досліджень комплексу фітопаразитичних нематод, які формують приховану загрозу продуктивності цієї культури протягом усього періоду експлуатації його плантацій. Ключовою передумовою ефективного управління нематодними ризиками у багаторічних насадженнях міскантусу має стати передсадивний фітосанітарний моніторинг, який дозволить своєчасно виявити економічно значущі види фітонематод, оцінити структуру їхніх угруповань та встановити щільність їх популяцій. Лише на основі цих даних слід приймати обґрунтовані рішення щодо придатності ділянки для закладання плантації, необхідності її передсадивного «оздоровлення» та добору профілактичних заходів. Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути спрямовані на встановлення економічних порогів шкідливості для ключових видів фітопаразитичних нематод із урахуванням багаторічного циклу вирощування культури, кумулятивного характеру шкоди та взаємодії з іншими фітопатогенними організмами, зокрема збудниками грибних та вірусних хвороб. Отримані наукові результати такої роботи мають стати теоретичним і практичним підґрунтям для розроблення адаптованих до умов України стратегій інтегрованого захисту насаджень міскантусу від ураження його нематодозами, у яких пріоритет надаватиметься передсадивному моніторингу, профілактичним, агротехнічним та біологічним заходам, а також подальшому системному контролю нематодних угрупувань упродовж всього періоду експлуатації плантацій. Реалізація таких стратегій сприятиме підвищенню економічної доцільності вирощування міскантусу, збереженню родючості ґрунтів і зміцненню енергетичної безпеки країни.

Список використаних джерел

1. Pidlisnyuk, V., Stefanovska, T., Lewis, E. E., & Erickson, L. E. (2014). Miscanthus as a productive biofuel crop for phytoremediation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *33*(1), 1–19. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.847616

2. 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, Ya. D., Honcharuk, H. S., Furman, V. A., Suslyk, L. O., Makukh, Ya. P., Remeniuk, S. O., Ivanina, V. V., Fursa, A. V., Bekh, N. S., Kotsar, M. I., ... Katelevskyi, V. M. (2019). *Miscanthus in Ukraine*. FOP Yamchynskyi O. V. https://doi.org/10.47414/978-617-7804-11-5 [In Ukrainian]

3. Kurylo, V. L., Hanzhenko, O. M., Humentyk, M. Ya., Kvak, V. M., Fuchylo, Ya. D., Khivrych, O. B., Zykov, P. Yu., Honcharuk, H. S., Smirnykh, V. M., Horobets, A. M., & Zamoiskyi, O. I. (2016). *Metho-dological recommendations on the technology of growing and processing of giant miscanthus*. Komprynt. [In Ukrainian]

4. Kulyk, M., Galytska, M., Samoylik, M., & Zhornyk, I. (2019). Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. *Agrology*, *2*(1), 65–73. https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.14020

5. Dekovets, V. O., & Kulyk, M. I. (2020). Ecological features and agricultural measures for growing *Miscanthus giganteus* biomass to ensure energy efficiency in rural areas. In T. O. Chaika, I. O. Yasnolob, & O. O. Horb (Eds.), *Energy efficiency of rural areas* (pp. 102–114). Astraia. [In Ukrainian]

6. Hanzhenko, O. M., Kravchuk, V. I., Humentyk, M. Ya., Kvak, V. M., Fuchylo, Ya. D., Pravdyva, L. A., Honcharuk, H. S., & Khivrych, O. B. (2025). *Scientific and methodological recommendations for the effective cultivation of perennial cereal bioenergy crops*. Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS. [In Ukrainian]

7. Pidlisnyuk, V. V., Erickson, L. E., Trögl, J., & Shapoval, P. (2017). Metals uptake behaviour in *Miscanthus × giganteus* plant during growth at contaminated soil from the military site in Sliač, Slovakia. *Polish Journal of Chemical Technology*, *20*(2), 1–7. https://doi.org/10.2478/pjct-2018-0016

8. Al Souki, K. S., Burdová, H., Mamirova, A., Kuráň, P., Kříženecká, S., Oravová, L., Tolaszová, J., Nebeská, D., Popelka, J., Usťak, S., Honzík, R., & Trögl, J. (2021). Evaluation of the *Miscanthus × giganteus* short-term impacts on enhancing the quality of agricultural soils affected by single and/or multiple contaminants. *Environmental Technology & Innovation*, *24*, Article 101890. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101890

9. Bastia, G., Al Souki, K. S., & Pourrut, B. (2023). Evaluation of *Miscanthus × giganteus* Tolerance to Trace Element Stress: Field Experiment with Soils Possessing Gradient Cd, Pb, and Zn Concentrations. *Plants*, *12*(7), Article 1560. https://doi.org/10.3390/plants12071560

10. Kvak, V. M. (2012). Growth, development and productivity of miscanthus (*Miscanthus*) under different fertilizer rates. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, *14*, 548–551. [In Ukrainian]

11. Stefanovska, T., Skwiercz, A., Zouhar, M., Pidlisnyuk, V., & Zhukov, O. (2021). Plant-feeding nematodes associated with *Miscanthus × giganteus* and their use as potential indicators of the plantations' state. *Inter-*

national Journal of Environmental Science and Technology, *18*(1), 57–72. https://doi.org/10.1007/s13762-020-02865-z

12. Stefanovska, T., Skwiercz, A., Zhukov, O., & Pidlisnyuk, V. (2024). Soil nematodes as a monitoring tool of bioenergy crop production management: The case of *Miscanthus giganteus* cultivation on different soil types. *Biosystems Diversity*, *32*(2), 217–224. https://doi.org/10.15421/012423

13. Stefanovska, T., Skwiercz, A., Pidlisnyuk, V., Zhukov, O., & Shapoval, P. (2023). Can nematode communities work as an indicator of soil health in a multiyear *Miscanthus* × *giganteus* plantation growing in lead-contaminated soil? *Agronomy*, *13*(6), Article 1620. https://doi.org/10.3390/agronomy13061620

14. Mekete, T., Gray, M. E., & Niblack, T. L. (2009). Distribution, morphological description, and molecular characterization of *Xiphinema* and *Longidorus* spp. associated with plants *Miscanthus* spp. and *Panicum virgatum* used for biofuels. *Global Change Biology Bioenergy*, *1*(4), 257–266. https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01020.x

15. Mekete, T., Reynolds, K., Lopez-Nicora, H. D., Gray, M. E., & Niblack, T. L. (2011). Distribution and diversity of root-lesion nematodes (*Pratylenchus* spp.) associated with *Miscanthus* × *giganteus* and *Panicum virgatum* used for biofuels, and species identification by multiplex polymerase chain reaction. *Nematology*, *13*(6), 673–686. https://doi.org/10.1163/138855410X538153

16. Mekete, T., Reynolds, K., Lopez-Nicora, H. D., Gray, M. E., & Niblack, T. L. (2011). Plant-parasitic nematodes are potential pathogens of *Miscanthus* × *giganteus* and *Panicum virgatum* used for biofuels. *Plant Disease*, *95*(4), 413–418. https://doi.org/10.1094/PDIS-05-10-0335

17. Stefanovska, T., Skwiercz, A., Flis, Ł., Pidlisnyuk, V., & Zouhar, M. (2021). First record of the ectoparasitic nematode *Amplimerlinius macrurus* (Nematoda: Tylenchida) on the perennial grass *Miscanthus* × *giganteus* (Angiosperms: Poaceae) in Ukraine. *Journal of Nematology*, *53*(1), Article e2021-24. https://doi.org/10.21307/jofnem-2021-024

18. Stefanovska, T., Skwiercz, A., Pidlisnyuk, V., Zhukov, O., Kozacki, D., Mamirova, A., Newton, R. A., & Ust'ak, S. (2022). The short-term effects of amendments on nematode communities and diversity patterns under the cultivation of *Miscanthus* × *giganteus* on marginal land. *Agronomy*, *12*(9), Article 2063. https://doi.org/10.3390/agronomy12092063

19. Skwiercz, A., Stefanovska, T., Zouhar, M., Pidlisnyuk, V., & Flis, Ł. (2022). First report of *Rotylenchus agnetis* Szczygiel, 1968, *Rotylenchus pumilus* Perry, 1959, and *Paratylenchus nanus* Cobb, 1923 associated with *Miscanthus* × *giganteus* J. M. Greef & Deuter ex Hodk & Renvoize in Ukraine. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, *21*(5), 153–161. https://doi.org/10.24326/asphc.2022.5.13

20. Kalatur, K. A., Pylypenko, L. A., & Boiko, A. L. (2016). The role of phytonematodes of the families *Longidoridae* and *Trichodoridae* in the vector transmission of plant viral diseases pathogens. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, *24*, 100–111. https://doi.org/10.47414/np.24.2016.216918 [In Ukrainian]

21. Kalatur, K. A., Borzykh, O. I., Siharova, D. D., & Janse, L. A. (2020). *Relationships between phytonematodes and other pathogenic organisms*. Lazuryt-Polihraf. [In Ukrainian]

22. Sharma, H., & Kumar Chaubey, A. (2023). Plant parasitic nematodes: Insights into the parasitic potential, adaptations and their interaction with other microorganisms. In *Nematodes – Ecology, Adaptation and Parasitism*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1003258

23. Sigaryova, D. D., & Kalatur, K. A. (2012). Complex damage to crops by fungi and nematodes. *Plant Protection and Quarantine*, *58*, 201–213. [In Ukrainian]

24. Siddiqi, M. R. (2000). *Tylenchida: Parasites of plants and insects* (2nd ed.). CAB International.

25. Mesa-Valle, C. M., Garrido-Cardenas, J. A., Cebrian-Carmona, J., Talavera, M., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). Global Research on Plant Nematodes. *Agronomy*, *10*(8), Article 1148. https://doi.org/10.3390/agronomy10081148

26. Bernard, G. C., Egnin, M., & Bonsi, C. (2017). The impact of plant-parasitic nematodes on agriculture and methods of control. In M. M. Shah (Ed.), *Nematology – Concepts, Diagnosis and Control* (pp. 121–151). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.68958

27. Nicol, J. M., Turner, S. J., Coyne, D. L., Nijs, L. den, Hockland, S., & Maafi, Z. T. (2011). Current nematode threats to world agriculture. In J. Jones, G. Gheysen, & C. Fenoll (Eds.), *Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions* (pp. 21–43). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0434-3_2

28. Manzanilla-López, R. H., Evans, K., & Bridge, J. (2004). Plant diseases caused by nematodes. In Z. X. Chen, S. Y. Chen, & D. W. Dickson (Eds.), *Nematology Advances and Perspectives: Vol. 2. Nematode Management and Utilization* (pp. 637–716). CABI Publishing. https://doi.org/10.1079/9780851996462.0637

29. Lehman, P. S. (2004). Cost benefits of nematode management through regulating programs. In Z. Chen, S. Chen, & D. W. Dickson (Eds.), *Nematology – Advances and perspectives: Vol. 2. Nematode management and utilization* (pp. 1133–1177). CABI Publishing. https://doi.org/10.1079/9780851996462.1133

30. Lopes, E. A., & Ferraz, S. (2016). Importance of phytonematodes in agriculture. In C. M. G. Oliveira, M. A. Santos, & L. H. S. Castro (Eds.), *Diagnosis of phytonematodes* (pp. 1–10). Millenium Editora.

31. Decraemer, W., & Geraert, E. (2006). Ectoparasitic nematodes. In R. N. Perry, & M. Moens (Eds.), *Plant Nematology* (pp. 153–184). CAB International. https://doi.org/10.1079/9781780641515.0179

32. Singh, S. K., Hodda, M., & Ash, G. J. (2013). Plant-parasitic nematodes of potential phytosanitary importance, their main hosts and reported yield losses. *EPPO Bulletin*, *43*(2), 334–374. https://doi.org/10.1111/epp.12050

33. Dietrich, P., Cesarz, S., Liu, T., Roscher, C., & Eisenhauer, N. (2021). Effects of plant species diversity on nematode community composition and diversity in a long-term biodiversity experiment. *Oecologia*, *197*(2), 297–311. https://doi.org/10.1007/s00442-021-04956-1

34. Singh, S., Awasthi, L. P., Jangre, A., & Nirmalkar, V. K. (2020). Transmission of plant viruses through soil-inhabiting nematode vectors. In L. P. Awasthi (Ed.), *Applied Plant Virology* (pp. 291–300). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818654-1.00022-0

35. MacFarlane, S. A., & Robinson, D. J. (2004). Transmission of plant viruses by nematodes. In S. H. Gillespie, G. L. Smith, & A. Osbourn (Eds.), *Microbe-Vector Interactions in Vector-Borne Diseases* (pp. 263–286). Cambridge University Press.

36. Decraemer, W., & Robbins, R. T. (2007). The who, what and where of Longidoridae and Trichodoridae. *Journal of Nematology*, *39*(4), 295–297.

37. Poudel, D., & Yan, G. (2025). *Trichodorus* and *Paratrichodorus*. In N. Amaresan, & K. Kumar (Eds.), *Compendium of Phytopathogenic Microbes in Agro-Ecology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81999-5_30

38. Brown, D. J. F., & Trudgill, D. L. (1998). Nematode transmission of plant viruses – a 30 year perspective. *Annual Report from the Scottish Crop Research Institute (SCRI)*, 121–125.

39. Lamberti, F., Taylor, C. E., & Seinhorst, J. W. (Eds.). (1975). *Nematode vectors of plant viruses*. CABI. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0841-6

40. Abd-Elgawad, M. M. M., & Askary, T. H. (2015). Impact of Phytonematodes on Agriculture Economy. In T. H. Askary, & P. R. P. Martinelli (Eds.), *Biocontrol Agents of Phytonematodes* (pp. 3–49). CABI.

41. Schmidt, H. B., Fritzsche, R., & Lehmann, W. (1963). Die Übertragung des Weidelgrasmosaik-Virus durch Nematoden. *Die Naturwissenschaften*, *50*(10), 386–386. https://doi.org/10.1007/BF00600766

42. Nar, B., Ranabhat, J. P., Fellers, M. A., Bruce, J. L., & Shoup, R. (2023). Brome mosaic virus detected in Kansas wheat co-infected with other common wheat viruses. *Frontiers in Plant Science*, *14*(3), Article 1096249. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1096249

43. Hodge, B. (2020). *Wheat virus more serious than first thought*. Ohio Farmer. https://www.farmprogress.com/wheat/wheat-virus-more-serious-than-first-thought

44. Kyrychenko, A. M., Bohdan, M. M., Snigur, H. O., & Shcherbatenko, I. S. (2022). Weeds as virus reservoirs in agrobiocenoses of grain crops in Ukraine. *Microbiological Journal*, *84*(6), 72–86. https://doi.org/10.15407/microbiolj84.06.072 [In Ukrainian]

45. Ryzhkova, A. E., Polishchuk, V. P., Verves, Y. G., & Boyko, A. L. (2002). *Plant Virus Vectors*. Ukrainian Phytosociological Center. [In Ukrainian]

46. Jones, J. T., Haegeman, A., Danchin, E. G. J., Gaur, H. S., Helder, J., Jones, M. G. K., Kikuchi, T., Manzanilla-López, R., Wesemael, W. M. L., & Perry, R. N. (2013). Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, *14*(9), 946–961. https://doi.org/ 10.1111/mpp.12057

47. Kalatur, K. A., & Janse, L. A. (2021). Phytonematodes as a limiting biotic factor of agricultural production in the world (review). *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, *29*, 13–46. https://doi.org/10.47414/np.29.2021.244423 [In Ukrainian]

48. Riggs, R. D., & Wrather, J. A. (Eds.). (1992). *Biology and management of the soybean cyst nematode*. American Phytopathological Press.

49. Wrather, J. A., Anderson, T. R., Arsyad, D. M., Gai, J., Ploper, L. D., Porta-Puglia, A., Ram, H. H., & Yorinori, J. T. (1997). Soybean disease loss estimates for the top 10 soybean producing countries in 1994. *Plant Disease*, *81*(1), 107–110. https://doi.org/10.1094/pdis.1997.81.1.107

50. University of Missouri Extension. (2010). *Soybean cyst nematodes: Diagnosis and Management*. https://extension.missouri.edu/publications/g4450

51. Chen, S., MacDonald, D. H., Kurle, J. E., & Reynolds, D. A. (2001). *The soybean cyst nematode* (FO-03935). University of Minnesota Extension Service. https://hdl.handle.net/11299/94033

52. Venkatesh, S. K., Harrison, R. M., & Riedel, R. (2000). Weed hosts of soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*) in Ohio. *Weed Technology*, *14*(1), 156–160.

53. *List of regulated harmful organisms defined by the Law of Ukraine "On Plant Quarantine"*. (2025). https://data.gov.ua/dataset/44379f00-5555-4d22-a7e6-4fdd45dffab4/resource/93778064 [In Ukrainian]

54. Castillo, P., & Volvas, N. (2007). *Pratylenchus (Nematoda: Pratylenchidae): Diagnosis, biology, pathogenicity and management* (Nematology Monographs and Perspectives, Vol. 6). Brill.

55. Vanstone, V. A., Lonergan, P. F., & Rathjen, A. J. (1995). Resistance and tolerance of cereals to root lesion nematode (*Pratylenchus neglectus*) in South Australia. In *Proceedings of the 10th Biennial Conference of the Australasian Plant Pathology Society* (p. 40). Australasian Plant Pathology Society.

56. Clavero-Camacho, I., Cantalapiedra-Navarrete, C., Archidona-Yuste, A., Castillo, P., & Palomares-Rius, J. E. (2021). Remarkable cryptic diversity of *Paratylenchus* spp. (Nematoda: Tylenchulidae) in Spain. *Animals*, *11*(4), Article 1161. https://doi.org/10.3390/ani11041161

57. Čermák, V., & Renčo, M. (2010). The family Paratylenchidae Thorne, 1949 in the rhizosphere of grass and woody species in Europe: A review of the literature. *Helminthologia*, *47*(3), 139–146. https://doi.org/10.2478/s11687-010-0021-z

58. Ciobanu, M., Geraert, E., & Popovici, I. (2003). The genera *Paratylenchus* Micoletsky, 1922 and *Gracilacus* Raski, 1962 in Romania (Nematoda: Tylenchulidae). *Nematologia Mediterranea*, *31*, 55–59.

59. Ghaderi, R., & Karegar, A. (2013). Some species of *Paratylenchus* (Nematoda: Tylenchulidae) from Iran. *Iranian Journal of Plant Pathology*, *49*, 137–156. https://ijpp.areeo.ac.ir/article_15386.html?lang=en

60. Ghaderi, R. (2019). The damage potential of pin nematodes, *Paratylenchus* Micoletzky, 1922 sensu lato spp. (Nematoda: Tylenchulidae). *Journal of Crop Protection*, *8*, 243–257.

61. Kalatur, K. A., Janse, L. A., & Janse, J. D. (2023). *Plant parasitic nematodes in sugar beet fields: management guide*. Agrarna nauka. https://doi.org/10.31073/978-966-540-578-8 [In Ukrainian]

62. Kalatur, K. A., Janse, L. A., & Janse, J. D. (2024). *Nematological monitoring in sugar beet crops: Scientific and methodological recommendations*. IBCiSB. [In Ukrainian]

63. Geraert, E. (1965). The genus *Paratylenchus*. *Nematologica*, *11*, 301–334. https://doi.org/10.1163/187529265X00221

64. Kalatur, K. A., Janse, J. D., & Janse, L. A. (2022). Sugar beet nematodes: Their occurrence, epidemiology, and management in Ukraine. In V. Misra, S. Srivastava, & A. K. Mall (Eds.), *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing* (pp. 711–736). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_35

65. Klinkenberg, C. H. (1963). Observations on the feeding habits of *Rotylenchus uniformis*, *Pratylenchus crenatus*, *P. penetrans*, *Tylenchorhynchus dubius*, and *Hemicycliophora similis*. *Nematologica*, *9*, 502–506. https://brill.com/view/journals/nema/9/4/article-p502_3.xml?ebody=previewPdf-130794

66. Golden, A. M. (1956). *Taxonomy of the spiral nematodes (Rotylenchus and Helicotylenchus), and the developmental stages and host-parasite relationships of R. buxophilus, n. sp., attacking boxwood* (Bulletin). University of Maryland, Agricultural Experiment Station.

67. Castillo, P., & Vovlas, N. (2005). *Bionomics and identification of the genus Rotylenchus (Nematoda: Hoplolaimidae)*. Brill Academic Publishers. https://doi.org/10.1163/9789047415077

68. Tran, V. D., Vu, V. L., Nguyen, H. T., & Trinh, Q. P. (2024). An updated species list of the genus *Rotylenchus* (Nematoda: Hoplolaimidae) and a browser-based interactive key for species identification. *Australasian Plant Pathology*, *53*, 79–88. https://doi.org/10.1007/s13313-023-00962-4

69. Winoto-Suatmadji, R., & Marks, G. C. (1989). *Rotylenchus robustus* in a *Pinus radiata* nursery in Victoria. *Australasian Plant Pathology*, *18*, 38. https://doi.org/10.1071/APP9890038

70. Baldwin, J., Inserra, R., Yeates, G., Powers, T., van den Berg, E., Subbotin, S., Mullin, P., Marais, M., & Roberts, P. (2011). Diversity and phylogenetic relationships within the spiral nematodes of *Helicotylenchus* Steiner, 1945 (Tylenchida: Hoplolaimidae) as inferred from analysis of the D2–D3 expansion segments of 28S rRNA gene sequences. *Nematology*, *13*, 333–345. https://doi.org/10.1163/138855410X520936

71. Subbotin, S. A., Vovlas, N., Yeates, G. W., Hallmann, J., Kiewnick, S., Chizhov, V. N., Manzanilla-López, R. H., Inserra, R. N., & Castillo, P. (2015). Morphological and molecular characterisation of *Helicotylenchus pseudorobustus* (Steiner, 1914) Golden, 1956 and related species (Tylenchida: Hoplolaimidae) with a phylogeny of the genus. *Nematology*, *17*, 27–52. https://doi.org/10.1163/15685411-00002850

72. Fayyaz, S. (2015). Review of the genus *Helicotylenchus* Steiner, 1945 (Nematoda: Hoplolaimidae) with updated diagnostic compendium. *Pakistan Journal of Nematology*, *33*, 115–160. https://doi.org/10.18681/2015.v33.i02.p01201507310001

73. EFSA Panel on Plant Health (PLH), Bragard, C., Baptista, P., Chatzivassiliou, E., Di Serio, F., Gonthier, P., Jaques Miret, J. A., Justesen, A. F., MacLeod, A., Magnusson, C. S., Milonas, P., Navas-Cortes, J. A., Parnell, S., Potting, R., Stefani, E., Thulke, H., Van der Werf, W., Vicent Civera, A., Yuen, J., … Reignault, P. L. (2023). Scientific opinion on the pest categorisation of *Hoplolaimus galeatus*. *EFSA Journal*, *21*(7), Article e08117. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8117

74. Ahmed, M., & Chen, T. A. (1980). Effect of certain environmental factors and host plants on reproduction of *Hoplolaimus galeatus*. *Plant Disease*, *64*, 479–480.

75. CABI. (2021). *Hoplolaimus galeatus*. CABI Compen. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.27520

76. Crow, W. T., & Brammer, A. S. (2002). Lance Nematode. *Hoplolaimus galeatus* (Cobb, 1913) Thorne, 1935 (Nematoda: Secernentea: Tylenchida: Tylenchoidea: Hoplolaimidae). *EDIS*, *9*. https://edis.ifas.ufl.edu/ in390

77. Ghaderi, R., & Karegar, A. (2014). Description of *Amplimerlinius macrurus* sp. n. (Nematoda: Merliniidae) and observations on three other species of the genus from Iran. *Zootaxa*, *3869*(1), 17–32. https://doi.org/10.11646/zootaxa.3869.1.2

78. Handoo, Z. A., Palomares-Rius, J. E., Cantalapiedra-Navarrete, C., Liébanas, G., Subbotin, S. A., & Castillo, P. (2014). (2014). Integrative taxonomy of the stunt nematodes of the genera *Bitylenchus* and *Tylenchorhynchus* (Nematoda, Telotylenchidae) with description of two new species and a molecular phylogeny. *Zoological Journal of the Linnean Society*, *172*(2), 231–264. https://doi.org/10.1111/zoj12175

79. Simon, A. (2018). First report of a stunt nematode (*Tylenchorhynchus agri*) from pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) in Guangxi Province of China. *Plant Disease*, *102*(12), Article 2662. https://doi.org/10.1094/PDIS-02-18-0343-PDN

80. Brzeski, M., Choi, Y. E., & Loof, P. A. A. (2002). Compendium of the genus *Criconemoides* Taylor, 1936 (Nematoda: Criconematidae). *Nematology*, *4*(3), 325–339. https://doi.org/10.1163/156854102760199178

81. Brzeski, M., Loof, P. A. A., & Choi, Y. E. (2002). Compendium of the genus *Mesocriconema* Andrassy, 1965 (Nematoda: Criconematidae). *Nematology*, *4*(3), 341–360. https://doi.org/10.1163/156854102760199187

82. Cordero, M. A., Robbins, R. T., & Szalanski, A. L. (2012). Taxonomic and molecular identification of *Mesocriconema* and *Criconemoides* species (Nematoda: Criconematidae). *Journal of Nematology*, *44*, 399–426. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23482878/

83. Geraert, E. (2010). *The Criconematidae of the World: Identification of the Family Criconematidae*. Academia Press.

84. Zeng, Y. S., Ye, W. M., Martin, S. B., Martin, M., & Tredway, L. (2012). Diversity and occurrence of plant-parasitic nematodes associated with golf course turfgrasses in North and South Carolina, USA. *Journal of Nematology*, *44*(4), 337–347.

85. Zeng, Y. S., Ye, W. M., Tredway, L., Martin, S., & Martin, M. (2012). Taxonomy and morphology of plant-parasitic nematodes associated with turfgrasses in North and South Carolina, USA. *Zootaxa*, *3452*, 1–46. https://doi.org/10.11646/zootaxa.3452.1.1

86. Ferris, H. (1978). Nematode economic thresholds: Derivation, requirements, and theoretical considerations. *Journal of Nematology*, *10*(4), 341–350.

87. Hill, N. S. (1988). Cultural practices for the management of plant-parasitic nematodes. *Ornamentals Northwest Archives*, *12*, 7–9. https://agsci.oregonstate.edu/sites/agscid7/files/horticulture/osu-nursery-greenhouse-and-christmas-trees/onn120407.pdf

88. Nikishicheva, K. S. (2002). *Phytonematode complexes in winter wheat agrocenoses of different soil and climatic zones and measures for regulating their numbers* [Candidate dissertation abstract]. National Agrarian University, Kyiv. [In Ukrainian]

89. Parrado, L. M., & Quintanilla, M. (2024). Plant-parasitic nematode disease complexes as overlooked challenges to crop production. *Frontiers in Plant Science*, *15*, Article 1439951. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1439951

90. Sikora, R. A., Padgham, J., & Desaeger, J. (2022). The unpredictability of adapting integrated nematode management to climate variability. In R. A. Sikora, J. Desaeger, & L. Molendijk (Eds.), *Integrated Nematode Management: State of the Art and Visions for the Future* (pp. 463–472). CAB International. https://doi.org/10.1079/9781789247541.0064

91. Sikora, R. A., Molendijk, L. P. G., & Desaeger, J. (2021). Integrated nematode management and crop health: Future challenges and opportunities. In R. A. Sikora, J. Desaeger, & L. Molendijk (Eds.), *Integrated Nematode Management: State-of-the-Art and Visions for the Future* (pp. 3–10). CAB International. https://doi.org/10.1079/9781789247541.0001

92. Sikora, R. A., Helder, J., Molendijk, L. P. G., Desaeger, J., Eves-van den Akker, S., & Mahlein, A.-K. (2023). Integrated nematode management in a world in transition: Constraints, policy, processes, and technologies for the future. *Annual Review of Phytopathology*, *61*, 209–230. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-113058

93. Shao, H., Zhang, P., Peng, D., Huang, W., Kong, L., Li, C., Liu, E., & Peng, H. (2023). Current advances in the identification of plant nematode diseases: From lab assays to in-field diagnostics. *Frontiers in Plant Science*, *14*, Article 1106784. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1106784

94. Ansari, T., & Saleem, M. (2023). Plant parasitic nematodes: A silent threat to agricultural output and sustainable approaches for their management. In M. Hasanuzzaman (Ed.), *Climate-Resilient Agriculture: Vol. 1* (pp. 781–803). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37424-1_36

95. Trivedi, P. C., & Barker, K. R. (1986). Management of nematodes by cultural practices. *Nematropica*, *16*(2), 213–236. https://scispace.com/pdf/nematological-reviews-management-of-nematodes-by-cultural-0609qpc3s6.pdf

96. Kantor, C., Eisenback, J. D., & Kantor, M. (2024). Biosecurity risks to human food supply associated with plant-parasitic nematodes. *Frontiers in Plant Science*, *15*, Article 1404335. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1404335

97. Palomares-Rius, J. E., Hasegawa, K., Siddique, S., & Vicente, C. S. (2021). Protecting our crops: Approaches for plant parasitic nematode control. *Frontiers in Plant Science*, *12*, Article 726057. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.726057

98. Abd-Elgawad, M. M. M., & Askary, T. H. (2018). Fungal and bacterial nematicides in integrated nematode management strategies. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, *28*(1), Article 74. https://doi.org/10.1186/s41938-018-0080-x

99. Askary, T. H., & Martinelli, P. R. P. (Eds.). (2015). *Biocontrol agents of phytonematodes*. CAB International.

100. Kalatur, K. A., & Pylypenko, L. A. (2017). Weeds: reserves of parasitic phytonematode species populations. *Advanced Agritechnologies*, *5*. https://doi.org/10.21498/na.5.2017.122232 [In Ukrainian]

101. Abd-Elgawad, M. M. M., De Luca, F., & Askary, T. H. (2024). Editorial: Nematodes: An integrated pest management approach. *Frontiers in Plant Science*, *14*, Article 1355670. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1355670

102. Döring, T. F., Pautasso, M., Finckh, M. R., & Wolfe, M. S. (2012). Concepts of plant health: Reviewing and challenging the foundations of plant protection. *Plant Pathology*, *61*(1), 1–15. https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02501.x

103. Gamalero, E., & Glick, B. R. (2020). The use of plant growth-promoting bacteria to prevent nematode damage to plants. *Biology*, *9*(11), Article 381. https://doi.org/10.3390/biology9110381

Phytoparasitic nematodes of the rhizosphere of *Miscanthus* × *giganteus*: phytosanitary risks and principles of integrated nematode control

K. A. Kalatur[1*], A. I. Medkov[2], L. A. Yanse[2,3]

[1] Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine
[2] Institute of Agroecology and Environmental Management, NAAS of Ukraine, 12 Metrolohichna St., Kyiv, 03143, Ukraine
[3] National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine, 9 Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka St., Kyiv, 01010, Ukraine

**Corresponding author: Kateryna Kalatur, kkalatur@meta.ua*

Citation: Kalatur, K. A., Medkov, A. I., & Yanse, L. A. (2025). Phytoparasitic nematodes of the rhizosphere of *Miscanthus* × *giganteus*: phytosanitary risks and principles of integrated nematode control. *Bioenergy*, *2*, 74–90. https://doi.org/10.47414/be.2025.No2.pp74-90

Aim. To conduct a comprehensive analysis of current scientific research on the prevalence, species composition, and harmfulness of phytonematodes in *Miscanthus* × *giganteus* plantations, in order to assess phytosanitary risks and substantiate a strategy for integrated nematode control in Ukraine. **Methods.** Search of scientific publications in electronic databases and bibliographic platforms: Scopus, Web of Science Core Collection, CAB Abstracts, AGRIS (FAO), and Google Scholar. **Results.** According to monitoring studies conducted in the United States, Ukraine, and Poland, a complex of phytoparasitic nematodes was identified in the rhizosphere of giant miscanthus (*M.* × *giganteus*). This complex includes representatives of the genera *Pratylenchus*, *Helicotylenchus*, *Xiphinema*, *Longidorus*, *Paratrichodorus*, *Trichodorus*, *Heterodera*, *Hoplolaimus*, *Rotylenchus*, *Tylenchorhynchus*, *Criconemella*, *Amplimerlinius*, and *Paratylenchus*. It was established that ectoparasitic species of the genera *Xiphinema*, *Longidorus*, *Trichodorus*, and *Paratrichodorus* pose a significant phytosanitary threat as vectors of pathogenic phytoviruses. Parasitism by phytoparasitic nematodes of the order *Tylenchida* was shown to suppress key physiological processes in the plant organism, resulting in a substantial reduction in dry biomass yield and creating favorable conditions for the penetration of fungal pathogens. The necessity of implementing mandatory pre-planting soil analysis and regular monitoring of nematode communities in the miscanthus rhizosphere throughout the entire plantation lifecycle is substantiated. An integrated system for protecting miscanthus plantations against nematode diseases is proposed. **Conclusions.** To increase the efficiency of cultivating *M.* × *giganteus* in Ukraine, systematic studies of the complex of phytoparasitic nematodes in its rhizosphere are required. A key prerequisite for effective management of nematode-related risks in miscanthus plantations is pre-planting monitoring, which will enable the timely detection of economically significant phytoparasitic nematode species, assessment of the structure of their communities, and determination of population densities. Based on the results of these studies, integrated strategies for protecting miscanthus from nematode damage will be developed, with priority given to preventive, agronomic, and biological measures, as well as to the systematic control of nematode communities throughout the entire period of plantation exploitation.

Keywords: *Miscanthus* × *giganteus*; phytonematodes; species composition; harmfulness; thresholds of harmfulness; monitoring; integrated plant protection system.

ORCID

Катерина Калатур / Kateryna Kalatur	https://orcid.org/0000-0003-0364-8462
Артем Медков / Artem Medkov	https://orcid.org/0000-0002-9305-8767
Лілія Янсе / Liliia Yanse	https://orcid.org/0000-0002-2567-5907