

УДК 633.15:631.53.027

Вплив мікродобрив на врожайність і якість зерна сорго зернового та його енергетичну продуктивність

 В. В. Іваніна^{1*},  А. С. Заришняк¹,  О. П. Стрілець¹,
 Р. В. Іваніна¹,  В. О. Зуза¹,  М. С. Данюк¹,  В. М. Смірних²

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

*e-mail: v_ivanina@ukr.net

²Веселоподільська дослідно-селекційна станція ІБКіЦБ НААН, вул. Селекціонерів, 1, с. Вереміївка,

Кременчуцький р-н, Полтавська обл., 38251, Україна

Мета. Установити вплив мікродобрив на врожайність, якість зерна та енергетичну продуктивність стеблин сорго зернового. **Методи.** Польовий з визначення впливу мікродобрив на біологічну та енергетичну продуктивність сорго зернового; вимірально-ваговий – для визначення врожайності, аналітичний – для визначення якості зерна; розрахунковий – для визначення енергетичної продуктивності стеблин; математично-статистичний – для обробки експериментальних даних з використанням програми Statistica 2013. **Результати.** Подано дані досліджень щодо впливу мікродобрив на врожайність та якість зерна сорго зернового, врожайність та енергетичну продуктивність стеблин. Виявлено, що застосування у позакореневе підживлення мікродобрив кремнію, бору та цинку на тлі органо-мінерального удобрення істотно підвищило біологічну та енергетичну продуктивність цієї культури. **Висновки.** В умовах недостатнього зволоження на чорноземі типовому слабкосолонцюватому застосування під сорго зернове 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, В забезпечило найвищу врожайність і якість зерна: врожайність – 8,25 т/га, вміст білка – 12,0 % з перевищенням контролю без добрив – відповідно на 2,5 т/га та 1,7 %. У вологому і теплому 2022 р. врожайність зерна була найвища – 8,8 т/га, натомість вміст білка в зерні був найвищим у посушливому 2024-му – 12,4 %. Встановлено високу кореляційну залежність між дозою внесення кремнію та врожайністю зерна сорго зернового з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,9422$, а також за внесення кремнію у поєднанні з цинком і бором і врожайністю зерна з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,9716$. Найвищу врожайність сухої біомаси стеблин отримали за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, В – 13,1 т/га з перевищенням контролю без добрив – на 6,0 т/га, органо-мінерального фону удобрення – на 3,8 т/га. У забезпеченому опадами і помірно теплому 2021 р. врожайність стеблин була найвища – 13,9 т/га. Максимальної енергетичної продуктивності стеблин сорго зернового досягнуто за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, В: вихід твердого біопалива – 13,1 т/га, вихід енергії – 210 ГДж/га з перевищенням контролю без добрив – відповідно на 6,0 т/га та 96 ГДж/га.

Ключові слова: мікроелементи; Si; Zn; В; сорго зернове; біомаса; енергія.

Вступ

В епоху глобального потепління вирощування культур адаптованих до посухи набуває особливого значення. Сорго зернове посідає особливе місце у цьому переліку, оскільки воно генетично адаптоване до вирощування в умовах посухи, здатне давати високі врожаї і має багатоцільове використання [1, 2]. Зерно сорго зернового використовують на харчові та кормові цілі, натомість стеблин – це потужна біомаса, яку за обмежених енергетичних ресурсів можна використовувати частково на цілі біоенергетики [3].

Як цитувати: Іваніна В. В., Заришняк А. С., Стрілець О. П., Іваніна Р. В., Зуза В. О., Данюк М. С., Смірних В. М. Вплив мікродобрив на врожайність і якість зерна сорго зернового та його енергетичну продуктивність. *Новітні агротехнології*. 2026. Т. 14, № 1. <https://doi.org/10.47414/na.14.1.2026.361550>



© The Author(s) 2026. Published by Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Добрива є головним фактором отримання високих і стабільних врожаїв сорго зернового [4, 5]. У сучасному виробництві цю культуру вирощують переважно після пшениці озимої, де базовим удобренням є внесення соломи та мінеральних добрив [6]. Така система удобрення недостатньо збалансована за мікроелементами, що є обмежуючим фактором у досягненні високої біологічної продуктивності сорго зернового [7]. Застосування мікродобрив в посівах сорго зернового істотно підвищило врожайність зерна [8], вміст білка в зерні [9], сприяло збільшенню врожайності сухої біомаси [10]. В умовах Лісостепу України питання ефективного застосування мікродобрив в посівах сорго зернового вивчені недостатньо, що і стало поштовхом для проведення цих досліджень.

Мета досліджень – установити вплив мікродобрив на врожайність, якість зерна та енергетичну продуктивність стеблиння сорго зернового.

Матеріали і методика досліджень

Науково-дослідні роботи проводили у тимчасовому польовому досліді на Веселоподільській дослідно-селекційній станції. Площа посівної ділянки – 75 м², облікової – 50 м². Розміщення варіантів систематичне послідовне, повторність чотириразова.

Ґрунт дослідного поля – чорнозем типовий слабкосолонцюватий середньосуглинковий, який має рН сольове – 7,5, суму увібраних основ – 38 мг-екв/100г ґрунту, вміст гумусу за Тюрніним – 4,9 %, рухомого фосфору та калію за Мачигініним – відповідно 34 та 112 мг/кг ґрунту.

У досліді сіяли гібрид сорго зернового 'Дніпровський 39'. До схеми досліді включено вісім варіантів: 1 – без добрив (контроль); 2 – вносили під оранку 5 т/га соломи + P₆₀K₆₀ та у передпосівну культувацію N₉₀ (Фон); 3, 5, 7 – Фон + 0,6; 1,0 та 1,4 л/га Si позакоренево у фази 3–5 та 8–10 листків; 4, 6, 8 – Фон + 0,6; 1,0 та 1,4 л/га Si + Zn, B позакоренево у фази 3–5 та 8–10 листків.

Під оранку вносили суперфосфат простий гранульований, калій хлористий, у передпосівну культувацію – амонійну селітру, позакоренево у фази 3–5 та 8–10 листків – кремнієве мікродобриво «BAI-Si», борне «Вітамін бор» в дозі 1 кг/га та цинк «Defenda» в дозі 1 л/га.

Вміст білка в зерні визначали розрахунковим методом за вмістом білкового азоту, який визначали методом Барштейна. Врожайність зерна та стеблиння сорго зернового визначали методом пробних ділянок з наступним перерахунком на 1 га. Енергетичну продуктивність стеблиння сорго зернового розраховували за методичними вказівками ІБКіЦБ. Результати досліджень опрацьовували методом дисперсійного та кореляційного аналізів з використанням комп'ютерної програми Statistica, 2013 та Excel.

Погодні умови за даними метеопункту м. Хорол були сприятливі для росту і розвитку сорго зернового. У 2021 році за вегетаційний період випало 268 мм опадів, що на 39 мм менше середнього багаторічного показника за середньодобової температури на 0,8 °С вище від багаторічного показника. У 2022 році середньодобова температура перевищила середній багаторічний показник на 0,4 °С, кількість опадів була вища – на 22 мм за абсолютного показника 313 мм. У 2023 році середньодобова температура за вегетацію була вища від середнього багаторічного показника на 1,1 °С, тоді як кількість опадів була на менша на 68 мм за абсолютного показника 223 мм. Найбільш спекотний і посушливий був 2024 рік (табл. 1).

Таблиця 1

Погодні умови у роки проведення досліджень

Показники	Рік	Місяці						Середнє за вегетацію
		квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	
Температура повітря, °С	2021	7,8	15,1	20,5	24,6	22,6	13,7	17,4
	2022	9,1	14,4	21,2	20,7	23,3	13,0	17,0
	2023	9,0	15,6	19,3	21,5	23,1	17,9	17,7
	2024	13,8	15,5	21,7	25,0	22,8	19,6	19,7
Середньобагаторічна температура, °С		8,2	16,0	19,7	21,7	20,8	13,0	16,6
Опади, мм	2021	35	54	70	37	21	51	268
	2022	64	20	45	66	59	59	313
	2023	27	36	43	56	10	51	223
	2024	41	8	81	10	5	15	160
Середньобагаторічні опади, мм		38	32	61	57	61	42	291

Середньодобова температура за вегетаційний період перевищила середній багаторічний показник на 3,1 °С, тоді як кількість опадів була на менша на 131 мм за абсолютного показника 160 мм. Цей рік відзначався надмірно жаркими і посушливими умовами упродовж липня – вересня. У липні середньодобова температура перевищила середній багаторічний показник на 3,3 °С, серпні – на 2,0 °С, вересні – на 4,6 °С, кількість опадів у ці місяці була нижчою від середнього багаторічного показника – відповідно на 51, 37 та 39 мм.

Отже, умови вегетаційного періоду 2021 р. можна охарактеризувати як достатньо забезпечені вологою і помірно теплі, 2022 року – помірно вологі й теплі, 2023-го – теплі й посушливі, 2024 р. – надмірно теплі й надмірно посушливі.

Результати досліджень

Дані досліджень показали, що сорго зернове позитивно відгукувалось на проведення позакореневих підживлень мікродобривами. Застосування під сорго зернове соломи, мінеральних добрив та проведення позакореневих підживлень мікродобривами істотно підвищило врожайність зерна цієї культури. У середньому за 2021–2024 рр. у контролі без добрив врожайність зерна була найменша – 5,7 т/га, за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ підвищилась на 0,9 т/га і становила 6,6 т/га. По роках дослідження найвища врожайність зерна у контролі без добрив була у 2022 р. – 6,4 т/га, найменша у 2021 р. – 4,8 т/га; на тлі внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ аналогічно у 2022 р. – 8,0 т/га, найменша у 2021 р. – 5,6 т/га. Помірно вологі і теплі погодні умови 2022 р. забезпечили найвищу прибавку врожайності зерна від внесення органічних і мінеральних добрив, яка порівняно з контролем без добрив зростає на 1,6 т/га (табл. 2).

Таблиця 2

Врожайність зерна сорго зернового залежно від удобрення, т/га

№ вар.	Варіант	Роки				Середнє
		2021	2022	2023	2024	
1	Без добрив (контроль)	4,8	6,4	5,5	6,3	5,7
2	5 т/га соломи + P ₆₀ K ₆₀ + N ₉₀ – Фон	5,6	8,0	6,0	6,9	6,6
3	Фон + 0,6 л/га Si	7,1	7,6	6,1	7,0	7,0
4	Фон + 0,6 л/га Si + Zn, B	7,8	7,8	6,4	7,1	7,3
5	Фон + 1,0 л/га Si	7,0	8,3	6,3	7,2	7,2
6	Фон + 1,0 л/га Si + Zn, B	7,2	8,5	6,3	7,3	7,3
7	Фон + 1,4 л/га Si	8,6	8,6	7,0	8,0	8,1
8	Фон + 1,4 л/га Si + Zn, B	8,5	8,8	7,3	8,4	8,3
	HP _{0,05}	0,4	0,5	0,4	0,5	0,45
	P, %	3,1	3,0	2,8	3,1	3,00

Примітка: фосфорні і калійні добрива вносили під оранку, азотні – у передпосівну культивуацію; кремній вносили позакоренево – половину дози у фазі 3–5 листків, іншу половину у фазі 8–10 листків.

Застосування у позакореневе підживлення кремнієвого мікродобрива «BAI-Si» істотно підвищило врожайність зерна сорго зернового. У середньому за 2021–2024 рр. порівняно з внесенням 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ врожайність зерна за дози кремнію 0,6 л/га підвищилась – на 0,4 т/га, дози 1,0 л/га – на 0,6 т/га, дози 1,4 л/га – на 1,5 т/га за абсолютних показників 7,0, 7,2 та 8,1 т/га. Найвищу врожайність зерна за внесення кремнію отримали у 2022 році, яка за дози кремнію 0,6 л/га становила 7,6 т/га, дози 1,0 л/га – 8,3 т/га, дози 1,4 л/га – 8,6 т/га.

Додавання до складу мікродобрив цинку і бору забезпечило подальше зростання врожайності зерна. У середньому за 2021–2024 рр. найвищу врожайність зерна отримали за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, B – 8,3 т/га, яка перевищила контроль без добрив – на 2,6 т/га, органо-мінеральний фон удобрення – на 1,7 т/га. По роках дослідження найменшу врожайність зерна отримали у теплому і посушливому 2023 р. – 7,3 т/га, а найвища у помірно вологому і теплому 2022-му – 8,8 т/га.

Встановлено високу кореляційну залежність між дозою внесення кремнію та врожайністю зерна сорго зернового з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,9422$, а також за внесення кремнію у поєднанні з цинком і бором і врожайністю зерна з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,9716$ (рис. 1).

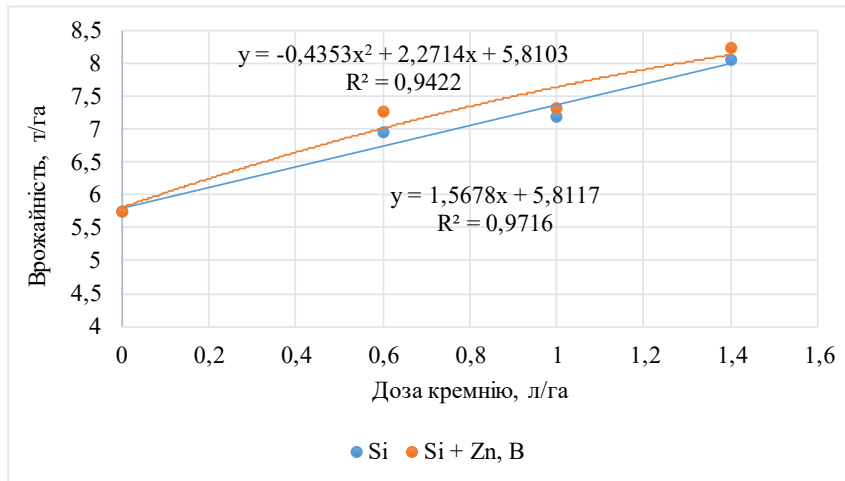


Рис. 1. Кореляційна залежність дозами кремнію та врожайністю зерна сорго зернового (2021–2024 рр.)

Примітка: кремній вносили в дозах – 0,6–1,4 л/га, бор та цинк – 1 л/га.

Застосування мікродобрих сприяло синтезу і накопиченню білка у зерні сорго зернового. У середньому за 2021–2024 рр. у контролі без добрив вміст білка у зерні був найменшим – 10,3 %, за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ підвищився до 11,0 %, або на 0,7 %. По роках дослідження найвищий вміст білка в зерні у контролі без добрив був у найбільш посушливому 2024 році – 10,9 %, а найменший у забезпеченому вологою і помірно теплому 2021 р. – 9,7 %; на тлі внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ аналогічно найвищий у 2024 р. – 11,4 %, найменший у 2021 р. – 10,5 %. В умовах 2021 р. внесення органічних і мінеральних добрив забезпечило найвищу прибавку вмісту білка в зерні порівняно з контролем без добрив – на 0,8 % (табл. 3).

Таблиця 3

Вміст білка в зерні сорго зернового залежно від удобрення, %

№ вар.	Варіант	Роки				Середнє
		2021	2022	2023	2024	
1	Без добрив (контроль)	9,7	10,2	10,5	10,9	10,3
2	5 т/га соломи + P ₆₀ K ₆₀ + N ₉₀ – Фон	10,5	10,9	11,1	11,4	11,0
3	Фон + 0,6 л/га Si	10,9	11,3	11,4	11,7	11,3
4	Фон + 0,6 л/га Si + Zn, B	11,4	11,6	11,8	11,8	11,7
5	Фон + 1,0 л/га Si	10,8	11,3	11,4	11,9	11,4
6	Фон + 1,0 л/га Si + Zn, B	11,1	11,7	11,9	12,1	11,7
7	Фон + 1,4 л/га Si	11,1	11,5	11,7	12,0	11,6
8	Фон + 1,4 л/га Si + Zn, B	11,5	11,7	12,2	12,4	12,0
	HP _{0,05}	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5
	P, %	2,1	1,9	2,2	2,4	2,3

Примітка: фосфорні і калійні добрива вносили під оранку, азотні – у передпосівну культивуацію; кремній вносили позакоренево – половину дози у фазі 3–5 листків, іншу половину у фазі 8–10 листків.

Застосування у позакореневе підживлення кремнію посилює синтез і накопичення білка у зерні. У середньому за 2021–2024 рр. порівняно з внесенням 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ вміст білка в зерні за дози кремнію 0,6 л/га підвищився – на 0,3 %, дози 1,0 л/га – на 0,4 %, дози 1,4 л/га – на 0,6 % за абсолютних показників 11,3; 11,4 та 11,6 %. Найвищий вміст білка в зерні за внесення кремнію спостерігали у занадто посушливому 2024 році, який становив за дози кремнію 0,6 л/га – 11,7 %, 1,0 л/га – 11,9 % та дози 1,4 л/га – 12,0 %. Додавання до складу мікродобрих цинку і бору забезпечило подальше зростання вмісту білка в зерні. У середньому за 2021–2024 рр. найвищий вміст білка в зерні спостерігали за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, B – 12,0 %, який перевищив контроль без добрив – на 1,7 %, органо-мінеральний фон удобрення – на 1,0 %. По роках дослідження найменший вміст білка в зерні спостерігали у забезпеченому опадами і помірно теплому 2021 р. – 11,5 %, а найвищий у надто посушливому 2024-му – 12,4 %.

Встановлено високу кореляційну залежність між дозою внесення кремнію у підживлення сорго зернового та вмістом білка в зерні з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,9792$, а також за внесення кремнію у поєднанні з цинком і бором і вмістом білка в зерні з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,957$ (рис. 2).

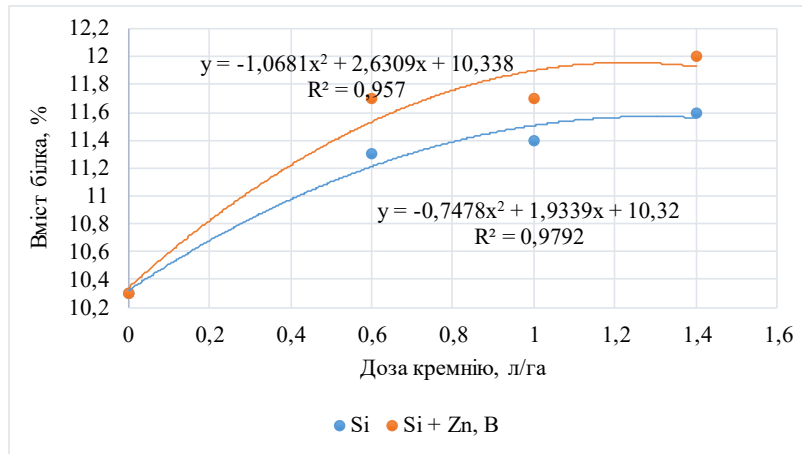


Рис. 2. Кореляційна залежність між дозами кремнію та вмістом білка в зерні сорго зернового (2021–2024 рр.)

Примітка: кремній вносили в дозах – 0,6–1,4 л/га, бор та цинк – 1 л/га.

Отже, за вирощування сорго зернового в умовах недостатнього зволоження на чорноземі типовому слабкосолонцюватому (ВПДСС) найвищої врожайності та якості зерна досягали за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, B: врожайність зерна – 8,3 т/га, вміст білка – 12,0 %.

У середньому за 2021–2024 рр. сорго зернове у контролі без добрив формувало врожайність сухої біомаси стеблиння 7,1 т/га, за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ – 9,3 т/га. На тлі альтернативного органо-мінерального удобрення сорго зернове збільшило врожайність сухої біомаси стеблиння порівняно з контролем без добрив на 2,2 т/га. По роках дослідження найвища врожайність біомаси стеблиння у контролі без добрив була у 2022 р. – 7,7 т/га, найменша у 2023 р. – 6,2 т/га; на тлі внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ найвища врожайність була у 2022 р. – 10,1 т/га, найменша у 2024 р. – 8,2 т/га. В умовах 2023 р. внесення органічних і мінеральних добрив забезпечило найвищу прибавку врожайності біомаси стеблиння порівняно з контролем без добрив – на 2,9 т/га (табл. 4).

Таблиця 4

Врожайність сухої біомаси стеблиння сорго зернового залежно від удобрення, т/га

№ вар.	Варіант	Роки				Середнє
		2021	2022	2023	2024	
1	Без добрив (контроль)	7,2	7,7	6,2	7,1	7,1
2	5 т/га соломи + P ₆₀ K ₆₀ + N ₉₀ – Фон	9,7	10,1	9,1	8,2	9,3
3	Фон + 0,6 л/га Si	12,3	10,8	9,5	9,0	10,4
4	Фон + 0,6 л/га Si + Zn, B	11,7	11,7	10,7	10,0	11,0
5	Фон + 1,0 л/га Si	11,9	11,8	10,9	9,8	11,1
6	Фон + 1,0 л/га Si + Zn, B	12,4	11,9	11,4	10,7	11,6
7	Фон + 1,4 л/га Si	13,2	12,8	12,0	11,7	12,4
8	Фон + 1,4 л/га Si + Zn, B	13,9	13,5	12,8	12,0	13,1
	НІР _{0,05}	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6
	P, %	2,8	2,6	2,3	2,4	2,5

Примітка: фосфорні і калійні добрива вносили під оранку, азотні – у передпосівну культивуацію; кремній вносили позакоренево – половину дози у фазі 3–5 листків, іншу половину у фазі 8–10 листків.

Застосування у позакоренево підживлення кремнію сприяло подальшому зростанню врожайності біомаси стеблиння. У середньому за 2021–2024 рр. порівняно з внесенням 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ врожайність сухої біомаси стеблиння за дози кремнію 0,6 л/га підвищилась – на 1,1 т/га, дози 1,0 л/га – на 1,8 т/га, дози 1,4 л/га – на 3,1 т/га за абсолютних показників 10,4; 11,1 та 12,4 т/га. Найвища врожайність біомаси стеблиння за внесення кремнію спостерігали у 2021 р., яка за дози кремнію 0,6 л/га становила 12,3 т/га, дози 1,0 л/га – 11,9 т/га, дози 1,4 л/га – 13,2 т/га.

Додавання до складу мікродобрив цинку і бору забезпечило подальше зростання врожайності стеблиння. У середньому за 2021–2024 рр. найвищу врожайність сухої біомаси стеблиння отримали за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, B – 13,1 т/га, яка перевищила контроль без добрив – на 6,0 т/га, органо-мінеральний фон удобрення – на 3,8 т/га. По роках дослідження найменша врожайність сухої біомаси спостерігалась у посушливому 2024 р. – 12,0 т/га, а найвища у забезпеченому опадами і помірно теплом 2021-му – 13,9 т/га.

За умов гострого дефіциту енергоресурсів стеблиння сорго зернового може бути використане для виготовлення гранул і опалювання приміщень. Проведені розрахунки показали, що за вирощування сорго зернового без внесення добрив в умовах недостатнього зволоження можна отримати 7,1 т/га твердого біопалива, що містить 114 ГДж/га енергії.

Внесення 5 т/га соломи + P₆₀K₆₀ під оран-ку + N₉₀ у передпосівну культивацією істотно підвищило енергетичну продуктивність сорго зернового: вихід твердого біопалива порівняно з контролем без добрив зріс на 2,2 т/га, вихід енергії – на 35 ГДж/га (табл. 5).

Таблиця 5

Вихід твердого біопалива та енергії зі стеблиння сорго зернового (2021–2024 рр.)

№ вар.	Варіант	Врожайність стеблиння, т/га	Вміст сухої речовини, %	Вихід твердого біопалива, т/га	Вихід енергії, ГДж/га
1	Без добрив (контроль)	30,9	23,0	7,1	114
2	5 т/га соломи + P ₆₀ K ₆₀ + N ₉₀ – Фон	40,4	23,0	9,3	149
3	Фон + 0,6 л/га Si	43,2	24,0	10,4	166
4	Фон + 0,6 л/га Si + Zn, В	45,5	24,3	11,1	177
5	Фон + 1,0 л/га Si	46,0	24,3	11,2	179
6	Фон + 1,0 л/га Si + Zn, В	47,4	24,5	11,6	186
7	Фон + 1,4 л/га Si	50,1	25,0	12,5	200
8	Фон + 1,4 л/га Si + Zn, В	51,4	25,5	13,1	210

Проведення позакореневих підживлень кремнієм забезпечило подальше зростання біологічної та енергетичної продуктивності сорго зернового. За дози кремнію 0,6 л/га на тлі внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ вихід твердого палива підвищився порівняно з контролем без добрив на 3,3 т/га, дози 1,0 л/га – на 4,1, дози 1,4 л/га – на 5,4 т/га, вихід енергії – відповідно на 52, 65 та 86 ГДж/га.

Найвищої біологічної та енергетичної продуктивності сорго зернового досягали за позакореневого підживлення комплексом трьох мікроелементів Si, Zn, В на тлі органо-мінеральної системи удобрення. За дози кремнію 0,6 л/га на тлі внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + Zn, В вихід твердого палива становив 11,1 т/га, дози 1,0 л/га – 11,6, дози 1,4 л/га – 13,1 т/га, вихід енергії – відповідно 177, 186 та 210 ГДж/га.

Отже, найвищого енергетичного потенціалу біомаси стеблиння сорго зернового досягали за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, В: вихід твердого палива – 13,1 т/га, енергії – 210 ГДж/га з перевищенням контролю без добрив – відповідно 6,0 т/га та 96 ГДж/га.

Встановлено тісну кореляційну залежність між дозами внесення кремнію та виходом енергії зі стеблиння сорго зернового з коефіцієнтом детермінації R² = 0,962 (рис. 3).

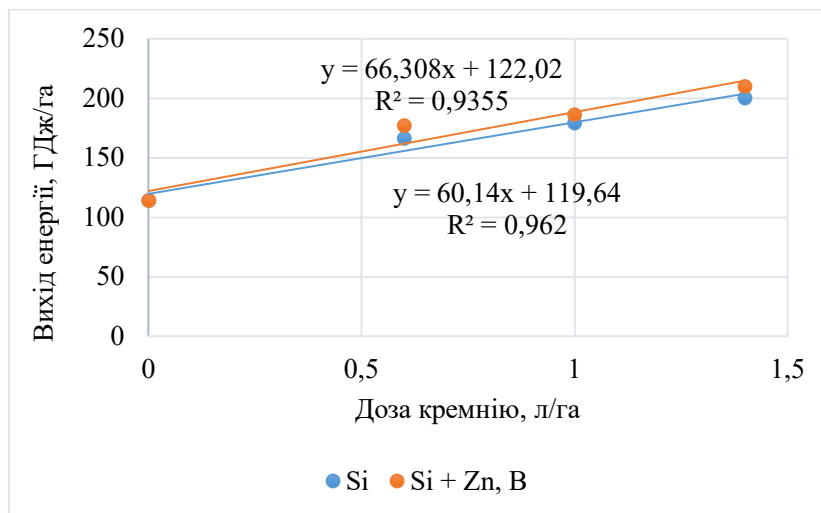


Рис. 3. Кореляційна залежність між дозами кремнію та виходом енергії за вирощування сорго цукрового (2021–2024 рр.)

Примітка: кремній вносили в дозах – 0,6–1,4 л/га, бор та цинк – 1 л/га.

Висновки

В умовах недостатнього зволоження на чорноземі типовому слабкосолонцюватуму застосування під сорго зернове 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, В забезпечило найвищу врожайність і якість зерна: врожайність – 8,25 т/га, вміст білка – 12,0% з перевищенням контролю без добрив – відповідно на 2,5 т/га та 1,7 %. У помірно вологому і теплому 2022 р. врожайність зерна була найвища – 8,8 т/га, натомість вміст білка в зерні був найвищим у посушливому 2024-му – 12,4 %. Встановлено високу кореляційну залежність між дозою внесення кремнію та врожайністю зерна сорго зернового з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,9422$, а також за внесення кремнію у поєднанні з цинком і бором і врожайністю зерна з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,9716$.

Найвищу врожайність сухої біомаси стеблин отримали за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, В – 13,1 т/га, яка перевищила контроль без добрив – на 6,0 т/га, органо-мінеральний фон удобрення – на 3,8 т/га. У забезпеченому опадами і помірно теплому 2021 р. врожайність стеблин була найвищою – 13,9 т/га.

В умовах недостатнього зволоження максимальної енергетичної продуктивності біомаси стеблин сорго зернового досягнуто за внесення 5 т/га соломи + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1,4 л/га Si + Zn, В: вихід твердого біопалива – 13,1 т/га, вихід енергії – 210 ГДж/га з перевищенням контролю без добрив – відповідно на 6,0 т/га та 96 ГДж/га.

Використана література

1. Akinseye F. M., Ajeigbe H. A., Traore P. C. et al. Improving sorghum productivity under changing climatic conditions: a modelling approach. *Field Crops Research*. 2020. Vol. 246. Article 107685. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107685>
2. Chadalavada K., Kumari B. D., Kumar T. S. Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality. *Planta*. 2021. Vol. 253. Article 113. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03631-2>
3. Pravdyva L. A., Doronin V. A., Dryha V. V. et al. Yield capacity and energy value of sorghum grain depending on the application of mineral fertilisers. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2022. Vol. 109, Iss. 2. P. 115–122. <https://doi.org/10.13080/z-a.2022.109.015>
4. Ganyo K. K., Muller B., Ndiaye M. et al. Defining fertilization strategies for sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) production under Sudano-Sahelian conditions: options for late basal fertilizer application. *Agronomy*. 2019. Vol. 9, Iss. 11. Article 697. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110697>
5. Munagilwar V. A., Khurade N. G., More V. R., Dhotare V. A. Response of sorghum genotypes to different fertility levels on growth and yield attributes of sorghum. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2020. Vol. 11. P. 3853–3858.
6. Maccarthy S. D., Vlek P. G. Impact of climate change on sorghum production under different nutrient and crop residue management in semi-arid region of China: modeling perspective. *African Crop Science Journal*. 2012. Vol. 20, Iss. 2. P. 275–291.
7. Zhang P., Chen X., Wei T. et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China. *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 160. P. 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.006>
8. Madukwe D. K., Amapu I. Y., Aliku O. Yield response of sorghum to micronutrient fortified fertilizer in the savanna agroecological zone of Nigeria. *FARA Research Report*. 2023. Vol. 7, Iss. 27. P. 351–358. <https://doi.org/10.59101/fr072327>
9. Batubara S. F., Chairuman N., Aryati V., Siagian D. R. Effects of micronutrients (Mn and Zn) fertilizer on the growth and production of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Planta Tropika*. 2023. Vol. 11, Iss. 2. P. 115–122. <https://doi.org/10.18196/pt.v11i2.15998>
10. Giridhar K., Gowda N. K., Pal D. T. et al. Feeding zinc bio enriched sorghum stover decreases zinc deficiency in sheep. *Indian Journal of Animal Sciences*. 2021. Vol. 91, Iss. 4. P. 299–304. <https://doi.org/10.56093/ijans.v91i4.114338>

References

1. Akinseye, F. M., Ajeigbe, H. A., Traore, P. C., Agele, S. O., Zemadim, B., & Whitbread, A. (2020). Improving sorghum productivity under changing climatic conditions: A modelling approach. *Field Crops Research*, 246, Article 107685. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107685>
2. Chadalavada, K., Kumari, B. D., & Kumar, T. S. (2021). Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality. *Planta*, 253, Article 113. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03631-2>
3. Pravdyva, L. A., Doronin, V. A., Dryha, V. V., Khakhula, V. S., Vakhniy, S. P., & Mykolaiko, I. I. (2022). Yield capacity and energy value of sorghum grain depending on the application of mineral fertilisers. *Zemdirbyste-Agriculture*, 109(2), 115–122. <https://doi.org/10.13080/z-a.2022.109.015>

4. Ganyo, K. K., Muller, B., Ndiaye, M., Gaglo, E. K., Guisse, A., & Adam, M. (2019). Defining fertilization strategies for sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) production under Sudano-Sahelian conditions: Options for late basal fertilizer application. *Agronomy*, 9(11), Article 697. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110697>

5. Munagilwar, V. A., Khurade, N. G., More, V. R., & Dhotare, V. A. (2020). Response of sorghum genotypes to different fertility levels on growth and yield attributes of sorghum. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 11, 3853–3858.

6. Maccarthy, S. D., & Vlek, P. G. (2012). Impact of climate change on sorghum production under different nutrient and crop residue management in semi-arid region of China: Modeling perspective. *African Crop Science Journal*, 20(2), 275–291.

7. Zhang, P., Chen, X., Wei, T., Yang, Z., Jia, Z., Yang, B., Han, Q., & Ren, X. (2016). Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China. *Soil and Tillage Research*, 160, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.006>

8. Madukwe, D. K., Amapu, I. Y., & Aliku, O. (2023). Yield response of sorghum to micronutrient fortified fertilizer in the savanna agroecological zone of Nigeria. *FARA Research Report*, 7(27), 351–358. <https://doi.org/10.59101/fr072327>

9. Batubara, S. F., Chairuman, N., Aryati, V., & Siagian, D. R. (2023). Effects of micronutrients (Mn and Zn) fertilizer on the growth and production of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Planta Tropika*, 11(2), 115–122. <https://doi.org/10.18196/pt.v11i2.15998>

10. Giridhar, K., Gowda, N. K., Pal, D. T., Krishnamoorthy, P., Joseph, R. F., Dey, D. K., & Shukla, A. K. (2021). Feeding zinc bio enriched sorghum stover decreases zinc deficiency in sheep. *Indian Journal of Animal Sciences*, 91(4), 299–304. <https://doi.org/10.56093/ijans.v9i4.114338>

UDC 633.631.81:631.682

Ivanina, V. V.^{1*}, Zaryshniak, A. S.¹, Strilets, O. P.¹, Ivanina, R. V.¹, Zuza, V. O.¹, Daniuk, M. S.¹, & Smirnykh, V. M.² (2026). Effect of micronutrients on sorghum grain yield and quality and energy productivity. *Advanced Agritechnologies*, 14(1). <https://doi.org/10.47414/na.14.1.2026.361550> [In Ukrainian]

¹ Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine, *e-mail: v_ivanina@ukr.net

² Veselyi Podil Experimental Breeding Station of the IBCSB NAAS, 1 Selektioneriv St., Veremiivka village, Kremenchuk District, Poltava Region, 38251, Ukraine

Aim. To study the effect of micronutrients on sorghum yield, grain quality, and the energy productivity of stems. **Methods.** The field method was used to determine the influence of micronutrients on the biological and energy productivity of grain sorghum; the measurement-weight method was used to determine yield; the analytical method was used to assess grain quality; the calculation method was used to determine stem energy productivity; and the mathematical-statistical method was used to process experimental data using Statistica 2013. **Results.** Data on the effect of micronutrients on grain yield and quality, as well as on stem yield and energy productivity, are presented. Foliar application of silicon, boron, and zinc micronutrients against an organic-mineral fertilisation background significantly increased the biological and energy productivity of sorghum. **Conclusions.** Under conditions of limited moisture on typical slightly saline chernozem, the application of 5 t/ha straw + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1.4 l/ha Si + Zn, B ensured the highest grain yield and quality: a yield of 8.25 t/ha and protein content of 12.0%, exceeding the unfertilised control by 2.5 t/ha and 1.7%, respectively. In the wet and warm year 2022, grain yield was the highest (8.8 t/ha), whereas protein content peaked in the dry year 2024 (12.4%). A strong correlation was established between silicon application rate and grain yield (coefficient of determination $r^2 = 0.9422$), as well as between the combined application of silicon with zinc and boron and grain yield ($r^2 = 0.9716$). The highest dry biomass yield (stems) was obtained under the application of 5 t/ha straw + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1.4 l/ha Si + Zn, B – 13.1 t/ha, exceeding the unfertilised control by 6.0 t/ha and the organo-mineral background by 3.8 t/ha. In the humid and moderately warm year 2021, stem yield was the highest – 13.9 t/ha. Maximum energy productivity of sorghum stems was achieved with the application of 5 t/ha straw + N₉₀P₆₀K₆₀ + 1.4 l/ha Si + Zn, B: a solid biofuel yield of 13.1 t/ha and energy yield of 210 GJ/ha, exceeding the unfertilised control by 6.0 t/ha and 96 GJ/ha, respectively.

Keywords: micronutrients; Si; Zn; B; grain sorghum; biomass; energy.

Надійшла / Received 09.01.2026

Погоджено до друку / Accepted 17.02.2026

Опубліковано онлайн / Published online 28.05.2026