

DOI <https://doi.org/10.31359/2413.7642.2026.1.150>

УДК 633.174: 631.86

**Ганженко О. М.**, д-р с.-г. наук, ст наук. співроб., завідувач відділу селекції і сталих технологій вирощування та переробляння

біоенергетичних культур,

[ganzhenko74@gmail.com](mailto:ganzhenko74@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-8118-1645](https://orcid.org/0000-0002-8118-1645)

**Бойко І. І.**, канд. с.-г. наук, ст. наук. співроб., завідувач спеціалізованої контрольно-насінневої аналітико-технологічної лабораторії,

[sknatla2019@ukr.net](mailto:sknatla2019@ukr.net), [orcid.org/0000-0003-3116-3753](https://orcid.org/0000-0003-3116-3753)

**Злиденний І. І.**, аспірант,

[lpv197528@gmail.com](mailto:lpv197528@gmail.com), [orcid.org/0009-0004-2787-2287](https://orcid.org/0009-0004-2787-2287)

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України, м. Київ, Україна

**Гончарук Г. С.**, канд. с.-г. наук, ст. наук. співроб., завідувач

лабораторії технологій вирощування біоенергетичних культур на малопродуктивних землях, [goncharukgr@gmail.com](mailto:goncharukgr@gmail.com)

Ялтушківська дослідно-селекційна станція Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України, с. Черешневе, Україна

## **ВПЛИВ ОБРОБКИ НАСІННЯ МІКОРИЗОУТВОРЮЮЧИМ БІОПРЕПАРАТОМ І БІОЧАРОМ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЗЕРНА І БІОМАСИ РОСЛИН СОРГО ЗВИЧАЙНОГО (ДВОКОЛЬОРОВОГО) НА МАЛОПРОДУКТИВНИХ ЗЕМЛЯХ**

**Анотація.** В умовах глобальних кліматичних змін та необхідності декарбонізації енергетики постає гостра потреба в інтенсифікації вирощування сорго звичайного (двокольорового) як стратегічної сировини для біопалива. Попри значний потенціал культури, недостатньо вивченим залишається вплив сучасних біопрепаратів на якісні показники зерна й біомаси, що визначають ефективність виходу біопалива. **Мета.** Встановити вплив обробки насіння мікоризоутворюючим біопрепаратом і біочаром на продуктивність та показники якості зерна і біомаси рослин сорго звичайного (двокольорового) на малопродуктивних землях. **Методи.** Біологічні (проведення польового дослідження) та статистичні (описова статистика та дисперсійний аналіз). Польові дослідження проводили у 2023 – 2025 рр. на малопродуктивних землях Ялтушківської дослідно-селекційної станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (Вінницька обл.) за схемою двофакторного дослідження: фактор А – Мікофренд (0, 4 та 8 г/кг), фактор В – БМ-нанобіочар (0, 4 та 8 г/кг насіння). **Результати.** Встановлено, що передпосівна обробка насіння сорго звичайного (двокольорового) ранньостиглого гібриду ‘Сват’ препаратами Мікофренд та БМ-нанобіочаром суттєво інтенсифікує ростові процеси та покращує якісні характеристики сировини. Максимальна врожайність вологої біомаси (15,1 т/га) зафіксована за поєднання високої норми Мікофренду (8 г/кг) та середньої норми біочару (4 г/кг), що на 26,9 % перевищує контрольні показники.

Найвищі значення врожайності сухої речовини (8,19 т/га) та насіння (6,74 т/га) отримано за умови спільного застосування помірних доз обох компонентів у нормі 4+4 г/кг. Аналіз біохімічного складу свідчить про зростання вмісту крохмалю в зерні до 72,1 – 72,3 % за використання БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг як самостійно, так і в комбінації з Мікофрендом. Водночас обробка насіння біопрепаратами у нормі 4 г/кг призводить до збільшення зольності біомаси до 8,03 % та зниження частки структурних вуглеводів, тоді як максимальне накопичення лігніну (10,05 %) забезпечує роздільне застосування біочару в нормі 8 г/кг. Енергетична оцінка показала, що обробка насіння біопрепаратами дозволяє підвищити загальний вихід енергії до 202,8 ГДж/га, що на 26,7 % перевищує показник на контролі. У структурі енерговиходу домінуючим складником є енергія твердого біопалива (69 – 72 %), вихід якого сягає 9,01 т/га при поєднанні препаратів у нормі 4+4 г/кг. За цієї ж схеми зафіксовано максимальний вихід біоетанолу (2,34 т/га) та найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності – 9,43, що підтверджує високу економічну та технологічну доцільність використання досліджуваних біопрепаратів для виробництва відновлюваних видів палива. Визначено, що подальше нарощування норм обробки понад 4 г/кг кожного біопрепарату спричиняє поступове зниження продуктивності та енергетичної окупності витрат. **Висновки.** Встановлено, що передпосівна обробка насіння сорго звичайного (двокольорового) сумішшю Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормі 4+4 г/кг є оптимальною і забезпечує найвищу врожайність сухої речовини (8,19 т/га) та зерна (6,74 т/га). За цієї схеми досягається найвищий вихід біоетанолу (2,34 т/га) і твердого біопалива (9,01 т/га), що забезпечує загальний вихід енергії 202,8 ГДж/га та коефіцієнт енергетичної ефективності 9,43. Синергічна дія обох біопрепаратів сприяє накопиченню крохмалю (до 72,1 %) та сухої речовини (до 55,6 %), хоча й зумовлює зростання зольності біомаси. У структурі енерговиходу на всіх варіантах домінує енергія твердого біопалива (близько 70 %), що підтверджує високу енергетичну цінність культури як сировини для відновлюваної енергетики.

**Ключові слова:** геміцелюлоза, зольність, лігнін, нанобіочар, мікоризоутворюючий препарат, урожайність зерна, урожайність сухої біомаси, целюлоза.

**O. Hanzhenko**, Senior Researcher, Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Breeding and Sustainable Technologies for Growing and Processing Bioenergy Crops,

ganzhenko74@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8118-1645

**I. Boiko**, Senior Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Specialized Seed Control and Analytical and Technological Laboratory,

sknatla2019@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3116-3753

**I. Zlydennyi**, postgraduate, lpv197528@gmail.com, orcid.org/0009-0004-2787-2287

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

**Hr. Honcharuk**, Senior Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Technologies for Growing Bioenergy Crops on Marginal Lands, goncharukgr@gmail.com

Yaltushkiv Research and Breeding Station of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Chereshneve village, Ukraine

### **Influence of seed treatment with mycorrhizo-forming bioproducts and biochar on productivity and grain quality indicators and biomass of sorghum bicolor on marginal lands**

**Formulation of the problem.** In the context of global climate change and the need to decarbonize the energy sector, there is an urgent need to intensify the cultivation of sorghum bicolor as a strategic raw material for biofuels. Despite the significant potential of the crop, the impact of modern biological products on the quality indicators of grain and biomass, which determine the efficiency of biofuel yield, remains insufficiently studied.

**Purpose.** To determine the effect of seed treatment with a mycorrhizal biopreparation and biochar on the productivity and quality indicators of grain and biomass of common sorghum (bicolor) plants on marginal lands. **Methods.** Biological (conducting a field experiment) and statistical (descriptive statistics and analysis of variance). Field studies were conducted in 2023-2025 on marginal lands of the Yaltushiv Research and Breeding Station of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS (Vinnytsia region) according to the scheme of a two-factor experiment: factor A - Mycofriend (0, 4 and 8 g/kg of seeds), factor B - BM-nanobiochar (0, 4 and 8 g/kg of seeds). **Results.** It was established that pre-sowing treatment of seeds of sorghum bicolor early-ripening hybrid sorghum 'Svat' with the preparations Mycofriend and BM-nanobiochar significantly intensifies growth processes and improves the quality characteristics of the raw material. The maximum yield of wet biomass (15.1 t/ha) was recorded with a combination of a high dose of Mycofriend (8 g/kg) and an average dose of biochar (4 g/kg), which is 26.9% higher than the control indicators. The highest values of dry matter yield (8.19 t/ha) and seed yield (6.74 t/ha) were obtained with the joint use of moderate doses of both components at a rate of 4+4 g/kg. Analysis of the biochemical composition indicates an increase in the starch content in the grain to 72.1–72.3% with the use of BM-nanobiochar at a rate of 4 g/kg both independently and in combination with Mycofriend. At the same time, seed treatment with biopreparations at a rate of 4 g/kg leads to an increase in biomass ash content to 8.03% and a decrease in the share of structural carbohydrates, while the maximum accumulation of lignin (10.05%) ensures the separate use of biochar at a rate of 8 g/kg. Energy assessment showed that seed treatment with biopreparations allows to increase the total energy yield to 202.8 GJ/ha, which is 26.7% higher than the control indicator. In the structure of energy yield, the dominant component is the energy of solid biofuel (69-72%), the yield of which

reaches 9.01 t/ha when combining preparations at a rate of 4+4 g/kg. Under the same scheme, the maximum yield of bioethanol (2.34 t/ha) and the highest energy efficiency coefficient – 9.43 were recorded, which confirms the high economic and technological feasibility of using the studied biopreparations for the production of renewable fuels. It was determined that further increase in processing rates above 4 g/kg of each biological product causes a gradual decrease in productivity and energy cost recovery. **Conclusions.** It was established that pre-sowing treatment of sorghum bicolor seeds with a mixture of Mycofriend and BM-nanobiochar at a rate of 4+4 g/kg is optimal and provides the highest yield of dry matter (8.19 t/ha) and grain (6.74 t/ha). This scheme achieves the highest yield of bioethanol (2.34 t/ha) and solid biofuel (9.01 t/ha), which provides a total energy yield of 202.8 GJ/ha and an energy efficiency coefficient of 9.43. The synergistic effect of both biological preparations contributes to the accumulation of starch (up to 72.1%) and dry matter (up to 55.6%), although it also causes an increase in the ash content of biomass. In the structure of energy output in all variants, solid biofuel energy dominates (about 70%), which confirms the high energy value of the crop as a raw material for renewable energy.

**Keywords:** hemicellulose, ash content, lignin, nanobiochar, mycorrhizal preparation, grain yield, dry biomass yield, cellulose

**Вступ.** На сьогодні сорго звичайне (двокольорове) (*Sorghum bicolor* L.) розглядається як одна з основних сільськогосподарських культур для боротьби з абіотичними стресами в умовах глобального потепління [1, 2]. Завдяки низькому коефіцієнту транспірації та природній стійкості до посухи сорго забезпечує стабільно високу врожайність зерна і біомаси на малопродуктивних землях та в умовах дефіциту вологи [3, 4, 5]. У контексті Паризької Кліматичної Угоди та Зеленого Європейського Курсу сорго розглядається як інструмент декарбонізації через заміну викопного палива та секвестрацію вуглецю в ґрунті [2, 6, 7].

За обсягом виробництва сорго займає п'яте місце у світі серед зернових культур і є базовим продуктом для понад півмільярда людей у посушливих регіонах [2, 7]. Його поживна цінність зумовлена високим вмістом білка, складних вуглеводів, вітамінів та мінералів [8, 9]. Біоактивні сполуки, які містяться у зерні сорго, мають антиоксидантні властивості і допомагають у профілактиці хронічних захворювань та діабету, а відсутність глютену робить сорго незамінним для дієтичного харчування [8].

Висока фотосинтетична продуктивність (C4-тип фотосинтезу) дозволяє сорго формувати значну біомасу за короткий період, що робить його перспективною культурою для біоенергетики [10, 11]. За врожайності зерна 8 т/га та вмісту крохмалю близько 70 % вихід біоетанолу з 1 га посівів сорго звичайного (двокольорового) може становити близько 2,4 т/га [12, 13, 14, 15, 16]. Сухі стебла є сировиною для виробництва твердого біопалива, біометану та біоводню [12, 17]. Високий вміст целюлози і геміцелюлози дозволяє виготовляти зі стебел сорго біоетанол другого покоління та наноцелюлозу [18]. Загальний

вихід енергії з одного гектара посівів сорго звичайного (двокольорового) може сягати 214 ГДж/га, причому 72 – 76 % енергії акумулюється в стеблах [12]. Енергетична стратегія України до 2050 року передбачає збільшення частки відновлюваних джерел, в тому числі за рахунок біопалива, у зв'язку з чим сорго є стратегічною культурою завдяки можливості його вирощування на малопродуктивних землях, що виключає конкуренцію з продовольчими культурами [19, 20]. Комплексне переробляння усїєї вегетативної маси сорго (зерна та стебел) дозволяє отримувати як харчові продукти, так і енергію та цінні біоматеріали [17].

Попередніми дослідженнями встановлено, що за оптимальної агротехніки сорго звичайне (двокольорове) в умовах України здатне формувати урожайність зерна на рівні 8 т/га [12, 21, 22], а за використання регуляторів росту вихід енергії становить 134 ГДж/га [10]. Застосування препаратів біологічного походження дозволяє знизити пестицидне навантаження без втрати врожайності, що особливо важливо для переходу на екологічно зберігаючі технології [23]. Використання біочару є перспективним способом інтенсифікації вирощування сорго. Цей меліорант покращує агрофізичні властивості ґрунту, підвищує врожайність та депонує вуглець, знижуючи рівень викидів парникових газів [24, 25]. Науковий інтерес становить синергія біочару з мікоризуючими препаратами [26, 27], оскільки така комбінація стимулює розвиток мікоризи та оптимізує водний режим рослин в умовах кліматичних змін [28]. Зважаючи на позитивний вплив обробки насіння біологічними препаратами на його посівні якості та продуктивність рослин [5, 29, 30], актуальним є дослідження впливу біопрепаратів на показники якості зерна і біомаси сорго звичайного (двокольорового), вирощеного на малопродуктивних землях.

*Мета дослідження* – встановити вплив обробки насіння мікоризоутворюючим біопрепаратом і біочаром на продуктивність та показники якості зерна і біомаси рослин сорго звичайного (двокольорового) на малопродуктивних землях.

*Матеріали та методика дослідження.* Польові дослідження проводились впродовж 2023-2025 років на Ялтушківській дослідно-селекційній станції ІБКіЦБ НААН на сірому лісовому легкосуглинковому ґрунті з вмістом гумусу (за Тюрінім) 0,86 %; лужногідролізованого азоту (за Корнфільдом) 63,0 мг/кг рухомого фосфору та калію (за Чиріковим) – відповідно 109 та 119 мг/кг ґрунту, рН сольове – 5,3; гідролітична кислотність (за Каппеном) – 2,9 мг-екв./100 г ґрунту.

Вегетаційний період 2023 року на Ялтушківській дослідно-селекційній станції характеризувався підвищеною температурою

повітря та дефіцитом вологи (табл. 1). Температурні показники стабільно перевищували кліматичну норму, причому пік відхилення зафіксовано у серпні (+4,4°C) та вересні (+4,3°C). Загалом повітря було на 2,4°C теплішим за середні багаторічні дані, а недобір опадів за вегетаційний період досяг 73,5 мм. Поєднання цих факторів призвело до виникнення умов слабкої посухи (ГТК = 0,77).

**Таблиця 1. Метеорологічні умови за роки проведення досліджень**

Місяці	Температура повітря, С°				Кількість опадів, мм			
	2023	2024	2025	багаторічн і	2023	2024	2025	багаторічн і
Квітень	7,7	11,2	9,3	7,3	72,0	69,0	3,5	42,0
Травень	15,1	15,0	11,9	13,5	13,4	32,5	156,0	62,0
Червень	18,6	20,1	18,3	16,4	84,5	32,2	18,1	74,0
Липень	20,1	23,1	21,2	18,5	69,7	96,7	196,7	88,0
Серпень	22,1	21,6	18,8	17,7	28,0	49,0	18,3	55,0
Вересен ь	17,7	18,2	15,6	13,4	22,2	77,0	84,5	49,0
Жовтень	10,5	7,5	7,6	7,9	36,7	37,0	41,5	30,0
Гідротермічний коефіцієнт Селянінова (ГТК)					0,77	1,09	1,74	1,37

Найбільше перевищення температури повітря у 2024 році відносно середніх багаторічних значень зафіксовано у вересні (+4,8°C), квітні (+3,9°C) та серпні (+3,7°C), тоді як показники травня та жовтня були найближчими до норми (відхилення +1,5°C та -0,4°C відповідно). Попри те, що середня температура в період вегетації перевищила норму на 3,1°C, а недобір опадів становив 6,6 мм, загальний рівень зволоження (ГТК=1,1) дозволяє класифікувати умови року як достатньо вологі.

Температурний режим 2025 року переважно перевищував кліматичну норму (за винятком травня та жовтня), проте середнє відхилення (+1,2°C) було менш вираженим, ніж у попередні 2023 – 2024 роки. Особливістю сезону 2025 року стала нерівномірна вологозабезпеченість посівів сорго звичайного (двокольорового). Суттєвий надлишок вологи зафіксовано у травні (+94 мм) та липні (+108,7 мм), а також у вересні та жовтні. Водночас у квітні, червні та серпні спостерігався значний дефіцит опадів (від -36,7 до -55,9 мм відносно норми). Загальна сума опадів за вегетацію перевищила багаторічну норму на 118,6 мм, що зумовило високе значення ГТК (1,7) та дозволило класифікувати рік як надмірно вологий.

Таким чином, впродовж трьох років досліджень спостерігалася значна мінливість кліматичних умов: від слабкої посухи у 2023 році

(ГТК=0,77) та помірного зволоження у 2024 році (ГТК=1,1) до надмірного вологозабезпечення на фоні менш інтенсивного потепління у 2025 році (ГТК=1,7).

Відповідно до схеми досліду (табл. 2) насіння сорго звичайного (двокольорового) безпосередньо перед сівбою обробляли мікоризоутворюючим біопрепаратом Мікофренд (фактор А) та вуглецевомістким адсорбентом БМ-нанобіочар (фактор В) в розрахунку 0, 4 та 8 г препарату на 1 кг насіння. Мікофренд (ТУ У 24.1-30165603-020:2010), виготовлений на основі грибів *Glomus sp.* з додаванням мікроорганізмів, що підтримують утворення мікоризи та ризосфери рослин, а також фосфатмобілізуючих бактерій і біологічно активних речовини. Біопрепарат БМ-нанобіочар (ТУ У 20.1-2571100774-001:2021) отриманий термохімічним перетворенням біомаси з розміром часточок менше 5 мкм, загальною площею поверхні 864 м<sup>2</sup>/г та вмістом вуглецю 95 %.

**Таблиця 2. Схема двофакторного польового досліду**

Фактор А Норма застосування Біочару:	Фактор В Норма застосування регулятора:
A1 (контроль)	B1 (контроль)
A2 – 4 г/кг	B2 – 4 г/кг
A3 – 8 г/кг	B3 – 8 г/кг

Площа посівної ділянки 50 м<sup>2</sup>, облікової – 25 м<sup>2</sup>, повторність досліду – чотириразова, загальна площа досліду – 0,18 га. Дослід закладається за методом систематичних повторювань: в кожному повторенні варіанти досліду розміщуються на ділянках послідовно. Сівбу насіння проводили на глибину 4-6 см з шириною міжрядь 45 см та густотою стояння рослин 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. Маса 1000 насінин становила 28,2±0,4 г за вологості насіння 14,1±0,3 %. Восени під основний обробіток вносили нітроамофоску в розрахунку N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>, а навесні під передпосівну культивуацію – аміачну селітру (N<sub>30</sub>).

Вміст крохмалю в зерні сорго звичайного (двокольорового) та структурний склад листово-стебельної маси визначали за стандартними методиками [31, 32]. Вихід біопалива розраховували відповідно до науково-методичних рекомендацій [32], енергетичну оцінку – за методикою Медведовського О.К. [33]. Отримані експериментальні дані обробляли методами описової статистики, регресійним та дисперсійним (ANOVA) аналізами з використанням програмного середовища Statistica [34].

**Результати досліджень.** Аналіз результатів трирічних польових досліджень свідчить про значний вплив обробки насіння сорго звичайного (двокольорового) біопрепаратами на показники продуктивності та якості біомаси і зерна (табл. 3). Так, передпосівна обробка насіння сорго звичайного (двокольорового) біопрепаратами Мікофренд та БМ-нанобіочар суттєво впливає на формування зернової продуктивності культури. У контрольному варіанті, де стимуляція насіння не проводилася, було зафіксовано мінімальну врожайність зерна на рівні 5,90 т/га. Застосування тільки БМ-нанобіочару (без Мікофренду) у нормі 4 г/кг забезпечило прибавку врожаю на рівні 0,25 т/га, а у нормі 8 г/кг – 0,17 т/га. Оскільки ці значення є нижчими за показник найменшої істотної різниці, таке підвищення вважається статистично недостовірним. Аналогічна ситуація спостерігалася і за застосування одного Мікофренду. Так, за норми Мікофренду 4 г/кг врожайність зерна зросла до 6,13 т/га (+0,23 т/га до контролю), а за норми 8 г/кг навіть дещо знизилася відносно контролю – до 5,75 т/га. Це підтверджує, що роздільне застосування препаратів у вказаних нормах не забезпечує статистично доведеного приросту зернової продуктивності.

**Таблиця 3. Показники продуктивності та якості біомаси і зерна сорго звичайного (двокольорового) залежно від обробки насіння біопрепаратами**

Фактор А: Норма Мікофренда, г/кг	Фактор В: Норма БМ-нанобіочару, г/кг	Урожайність зерна, т/га	Вміст крохмалю в зерні, %	Урожайність біомаси (волога), т/га	Вміст сухої речовини, %	Урожайність сухої біомаси, т/га	Вміст золи, %	Вміст целюлози, %	Вміст гемцелюлози, %	Вміст лігніну, %
0	0	5,9	69,9	11,9	52,7	6,27	7,08	35,1	11,4	9,43
0	4	6,15	72,3	13,3	54,8	7,3	6,97	35,6	11,4	9,75
0	8	6,07	69,7	13,4	52,5	7,01	7,47	33,9	11,1	10,05
4	0	6,13	71	13,3	52,5	6,99	7,19	34,7	11,3	9,61
4	4	6,74	72,1	14,7	55,6	8,19	8,03	32,5	10,3	9,59
4	8	6,3	71,1	14,3	55,2	7,87	7,51	34	10,9	9,73
8	0	5,75	69,2	13,6	50,5	6,83	7,38	33,9	10,6	9,55
8	4	6,47	71,2	15,1	52,7	7,9	7,52	33,7	11	9,39
8	8	6,2	69,3	13,6	52,6	7,12	7,4	34,1	11	9,68
НІР <sub>0,05</sub>		0,69	4,3	1,6	4,6	1,06	0,68	2,3	1,1	1,37
Р, %		3,9	2,2	4,2	3,1	5,2	3,3	2,4	3,4	5

Найвищу ефективність продемонстрували варіанти із поєднанням обох біопрепаратів. Так, спільна обробка насіння Мікофрендом та БМ-нанобіочаром у нормі 4 г/кг кожного дозволила отримати найвищу у досліді врожайність зерна на рівні 6,74 т/га, що на 0,84 т/га перевищує

контроль. За збільшення норми БМ-нанобіочару до 8 г/кг на фоні 4 г/кг Мікофренду врожайність склала 6,30 т/га, що також вище за контроль, але приріст (0,40 т/га) вже не був статистично істотним.

Вміст крохмалю у зерні сорго звичайного (двокольорового) є важливим якісним показником, оскільки саме цей полісахарид виступає основною сировиною для ферментації та визначає кінцевий вихід біоетанолу. У контрольному варіанті досліду, де передпосівна обробка насіння біопрепаратами не проводилася, вміст крохмалю становив 69,9 %. Застосування тільки БМ-нанобіочару у нормі 4 г/кг забезпечило найбільш суттєве зростання цього показника до 72,3 % (приріст до контролю – 2,4 %). Хоча це підвищення є вагомим з технологічної точки зору, воно не перевищувало показник найменшої істотної різниці, що вказує на відсутність статистично доведеного впливу одного лише біочару в даній нормі. Збільшення дози БМ-нанобіочару до 8 г/кг призвело до зниження вмісту крохмалю до рівня 69,7 %. Обробка насіння одним лише Мікофрендом також не забезпечила стабільного позитивного ефекту. Так, за норми 4 г/кг вміст крохмалю зріс до 71,0 %, а за норми 8 г/кг зафіксовано його зниження до 69,2 %. В обох випадках відхилення від контролю були математично неістотними, що підтверджує обмежений вплив поодинокого застосування мікоризації на біохімічний склад зерна.

Найбільш стабільні результати серед варіантів із комплексним впливом отримано за умови сумісного використання обох біопрепаратів. Зокрема, за поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг вміст крохмалю склав 72,1 %, що на 2,2 % вище за контроль. За збільшення норми Мікофренду до 8 г/кг на фоні 4 г/кг БМ-нанобіочару вміст крохмалю становив 71,2 %. Проте подальше нарощування доз обох біопрепаратів до максимальних у досліді значень (8 г/кг) спричинило зниження концентрації крохмалю до 69,3 %, що практично відповідає рівню контролю. Таким чином, для забезпечення максимального виходу біоетанолу найбільш доцільним є використання БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг як самостійно, так і в поєднанні з помірною нормою Мікофренду, оскільки це сприяє вищому накопиченню крохмалю в зерні.

Застосування БМ-нанобіочару та Мікофренду сприяло підвищенню врожайності не лише зерна, але й біомаси сорго звичайного (двокольорового). У контрольному варіанті, де обробка насіння біопрепаратами не проводилася, зафіксовано найнижчий показник урожайності вологої біомаси – 11,9 т/га. Застосування тільки БМ-нанобіочару (без Мікофренду) у нормі 4 та 8 г/кг дозволило підвищити врожайність біомаси на 1,4 та 1,5 т/га, відповідно, однак ця прибавка була статистично не достовірною. Це вказує на те, що обробка насіння тільки БМ-нанобіочаром не істотно впливає на врожайність вологої біомаси сорго звичайного (двокольорового).

Обробка насіння тільки Мікофрендом у нормі 4 г/кг також на забезпечила істотного збільшення врожайності вологої біомаси сорго звичайного (двокольорового), яка на цьому варіанті досліду підвищилась на 1,4 т/га порівняно з контролем. Водночас підвищення норми Мікофренду до 8 г/кг дозволило статистично істотно підвищити врожайність вологої біомаси до 13,6 т/га.

Максимальні показники продуктивності біомаси сорго звичайного (двокольорового) були зафіксовані за спільного використання обох біопрепаратів. Так, за обробки насіння БМ-нанобіочаром та Мікофрендом у нормі 4 г/кг кожного біопрепарату було отримано врожайність вологої біомаси 14,7 т/га, що на 2,8 т/га більше за контроль. Збільшення дози БМ-нанобіочару до 8 г/кг при цій же нормі Мікофренду призвело до незначного зниження показника до 14,3 т/га. Максимальні показники продуктивності вологої біомаси сорго звичайного (15,1 т/га) були зафіксовані за поєднання найвищої норми Мікофренда (8 г/кг) та середньої норми БМ-нанобіочару (4 г/кг). Проте подальше збільшення норми БМ-нанобіочару до 8 г/кг (на фоні 8 г/кг Мікофренду) спричинило зниження врожайності до 13,6 т/га. На нашу думку, причина пригнічення полягає в тому, що надмірна концентрація нанобіочару на поверхні насіння починає діяти як потужний сорбент, який блокує доступ води та поживних речовин до проростка, а надлишок мікоризного інокулюму переводить симбіоз у фазу «паразитизму», коли гриб забирає у молодій рослини надто багато вуглеводів на свій розвиток. Фізично це призводить до осмотичного та трофічного стресу рослини на початковому етапі їх розвитку, що й гальмує ростові процеси.

Вміст сухої речовини та підсумкова врожайність сухої біомаси сорго звичайного (двокольорового) також залежали від варіантів передпосівної обробки насіння. У контрольному варіанті (без застосування біопрепаратів) було зафіксовано найнижчий вихід сухої біомаси – 6,27 т/га за вмісту сухої речовини 52,7 %.

Застосування тільки БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг дозволило дещо підвищити врожайність сухої біомаси до 7,30 т/га (приріст до контролю – 1,03 т/га). Збільшення норми БМ-нанобіочару до 8 г/кг призвело до зниження врожайності сухої маси порівняно з попереднім варіантом до 7,01 т/га. Обробка насіння одним лише Мікофрендом у нормі 4 г/кг забезпечила врожайність сухої біомаси 6,99 т/га, а у нормі 8 г/кг – 6,83 т/га. В обох випадках прибавка врожайності була не істотною. За норми Мікофренду 8 г/кг було зафіксовано найнижчий у дослідженні вміст сухої речовини – 50,5 %.

Максимальну продуктивність сухої біомаси було отримано за умови сумісного використання біопрепаратів. Найвищий показник (8,19 т/га) зафіксовано за поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг. Це забезпечило достовірну прибавку 1,92 т/га (30,6%) відносно

контролю. Саме в цьому варіанті також спостерігався максимальний вміст сухої речовини (55,6 %), що підтверджує позитивний вплив синергічної дії препаратів на інтенсивність фотосинтетичних процесів та накопичення органічної маси. За збільшення норми Мікофренду до 8 г/кг у поєднанні з 4 г/кг БМ-нанобіочару врожайність сухої біомаси склала 7,90 т/га, що також істотно перевищує показник на контролі, однак подальше нарощування норм обох препаратів до 8 г/кг спричинило зниження врожайності до 7,12 т/га. Таким чином, оптимальним для отримання максимального виходу сухої речовини є поєднання середніх норм обох компонентів.

Вміст золи в біомасі сорго звичайного (двокольорового) є важливим показником її якості, оскільки зниження зольності підвищує енергетичну цінність та технологічну придатність сировини. У контрольному варіанті, де передпосівна обробка насіння не проводилася, вміст золи становив 7,08 %. Застосування тільки БМ-нанобіочару у нормі 4 г/кг дозволило дещо знизити цей показник до 6,97 %, однак ця зміна була статистично не істотною. Збільшення норми БМ-нанобіочару до 8 г/кг, навпаки, призвело до неістотного зростання зольності до 7,47 %. Роздільне застосування Мікофренду в нормах 4 та 8 г/кг також не сприяло покращенню якості біомаси за цим показником, спричинивши підвищення вмісту золи до 7,19 % та 7,38 % відповідно. Найгірші результати щодо зольності зафіксовано за спільного використання обох біопрепаратів у нормі 4 г/кг кожного, де показник сягнув максимуму – 8,03 %, що на 0,95 % вище за контроль та є статистично достовірним погіршенням якості.

За поєднання високої норми Мікофренду (8 г/кг) зі середньою (4 г/кг) та високою (8 г/кг) нормами БМ-нанобіочару вміст золи залишався вищим за контрольні значення (7,52 та 7,40 %, відповідно). Таким чином, для отримання біомаси з найменшим вмістом золи найбільш доцільним виявилось використання БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг без додавання Мікофренду, тоді як сумісне застосування препаратів призводило до небажаного накопичення мінеральних елементів у тканинах рослин.

Якісний склад біомаси сорго звичайного (двокольорового) за вмістом структурних вуглеводів та лігніну має визначальне значення для подальшого енергетичного використання сировини, оскільки целюлоза і геміцелюлоза є основними субстратами для виробництва біоетанолу 2-го покоління, тоді як високий вміст лігніну підвищує теплотворну здатність твердого біопалива. У контрольному варіанті дослідження вміст целюлози становив 35,1 %, геміцелюлози – 11,4 %, а лігніну – 9,43 %. Застосування тільки БМ-нанобіочару у нормі 4 г/кг забезпечило неістотне зростання частки целюлози до 35,6 % та лігніну до 9,75 %. Збільшення норми БМ-нанобіочару до 8 г/кг призвело до зниження вмісту целюлози до 33,9 % та геміцелюлози до 11,1 %, водночас

сприяючи накопиченню лігніну до максимального значення серед варіантів без Мікофренду – 10,05 %. Така тенденція вказує на те, що високі норми БМ-нанобіочару можуть дещо зміщувати вектор використання біомаси сорго звичайного (двокольорового) у бік виготовлення паливних гранул чи брикетів.

Обробка насіння лише Мікофрендом у нормі 4 г/кг та 8 г/кг не забезпечила істотного приросту енергетично цінних компонентів. Так, вміст целюлози коливався в межах 34,7 – 33,9 %, а геміцелюлози – 11,3 – 10,6%, що є нижчим за контроль. Вміст лігніну на цих варіантах залишався стабільним (близько 9,6 %), що підтверджує відсутність суттєвого впливу поодинокого застосування мікоризації на структуру клітинних стінок біомаси.

Найбільш динамічні зміни хімічного складу спостерігалися за сумісного використання обох біопрепаратів. Зокрема, за поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг було зафіксовано найнижчі показники вмісту целюлози (32,5 %) та геміцелюлози (10,3 %). Враховуючи, що ці компоненти є цільовими для біоконверсії в етанол, таке зниження (на 2,6% та 1,1% відповідно порівняно з контролем) є статистично значущим і свідчить про зміну метаболізму рослин у бік накопичення інших речовин, наприклад, крохмалю або зольних елементів. При збільшенні норми Мікофренду до 8 г/кг на фоні 4 г/кг БМ-нанобіочару вміст целюлози дещо зріс до 33,7 %, а лігніну склав 9,39 %. Спільне застосування максимальних норм (8 г/кг) обох біопрепаратів призвело до показників, наближених до контрольних. Таким чином, для потреб виробництва біоетанолу найбільш придатна сировина з контролю або варіанту з 4 г/кг БМ-нанобіочару, тоді як для твердого палива оптимальним є варіант із застосуванням 8 г/кг БМ-нанобіочару, що забезпечує найвищу концентрацію лігніну.

Отже, результати досліджень свідчать, що передпосівна обробка насіння сорго звичайного сумішшю Мікофренду та БМ-нанобіочару забезпечує виражений синергічний ефект, дозволяючи отримати максимальну врожайність вологої (15,1 т/га) та сухої (8,19 т/га) біомаси, а також зерна (6,74 т/га). Оптимальним поєднанням для підвищення вмісту енергетично цінних компонентів, зокрема крохмалю (72,1 – 72,3 %) та сухої речовини (55,6 %), є застосування помірних норм обох препаратів (4 г/кг) або одного біочару в нормі 4 г/кг. Водночас надмірне збільшення норм обробки до 8 г/кг призводить до зниження продуктивності та погіршення якості сировини. Таким чином, для комплексного покращення кількісних і якісних показників сорго звичайного (двокольорового) як сировини для біоенергетики найбільш доцільним є використання комбінованої обробки насіння в нормі 4 г/кг кожного біопрепарату.

Аналіз результатів досліджень свідчить, що застосування біопрепаратів Мікофренд та БМ-нанобіочар суттєво впливає на потенційний вихід біоетанолу. У контрольному варіанті, де обробка насіння біопрепаратами не проводилася, було зафіксовано мінімальний вихід біоетанолу на рівні 1,99 т/га, що забезпечило отримання 49,7 ГДж/га енергії (табл. 4).

Застосування тільки БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг дозволило підвищити вихід рідкого біопалива до 2,15 т/га, а вихід енергії — до 53,6 ГДж/га. Збільшення дози біочару до 8 г/кг дещо знизило ці показники порівняно з попереднім варіантом (до 2,04 т/га та 51,0 ГДж/га відповідно), хоча вони залишалися вищими за контроль. Окрема обробка насіння Мікофрендом у нормі 4 г/кг забезпечила вихід біоетанолу на рівні 2,10 т/га (52,5 ГДж/га), тоді як при збільшенні його норми до 8 г/кг спостерігалось зниження продуктивності нижче контрольних значень — до 1,92 т/га та 48,0 ГДж/га.

Максимальний у дослідженні вихід біоетанолу (2,34 т/га) було зафіксовано за поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг кожного. Це дозволило отримати найвищий показник енергії з рідкого палива 58,6 ГДж/га, що на 17,9 % перевищує контроль. Поєднання високої норми Мікофренду (8 г/кг) з середньою нормою БМ-нанобіочару (4 г/кг) також забезпечило високий результат (2,22 т/га біоетанолу та 55,6 ГДж/га енергії). Проте подальше нарощування норм обох препаратів до 8 г/кг спричинило зниження виходу рідкого біопалива до 2,07 т/га (51,8 ГДж/га). Отримані дані підтверджують, що найбільш стабільний позитивний вплив на енергетичну продуктивність сорго за виходом біоетанолу справляє синергічна дія помірних норм біопрепаратів.

**Таблиця 4. Вихід біопалива та енергії з біомаси і зерна сорго звичайного (двокольорового) залежно від обробки насіння біопрепаратами**

Фактор А: Норма Мікофренда, г/кг	Фактор В: Норма БМ-нанобіочару, г/кг	Вихід біопалива, т/га		Вихід енергії, ГДж/га			Коефіцієнт енергетичної ефективності
		тверде біопаливо	біоетанол	тверде біопаливо	біоетанол	разом	
0	0	6,90	1,99	110,3	49,7	160,0	7,44
0	4	8,03	2,15	128,5	53,6	182,1	8,47
0	8	7,72	2,04	123,5	51,0	174,5	8,11
4	0	7,69	2,10	123,0	52,5	175,5	8,16
4	4	9,01	2,34	144,2	58,6	202,8	9,43
4	8	8,65	2,16	138,5	54,0	192,5	8,95
8	0	7,51	1,92	120,2	48,0	168,3	7,83
8	4	8,69	2,22	139,1	55,6	194,6	9,05
8	8	7,84	2,07	125,4	51,8	177,2	8,24

Продуктивність сорго звичайного (двокольорового) за виходом твердого біопалива та генерованої з нього енергії також суттєво залежала від схеми передпосівної обробки насіння біопрепаратами. У контрольному варіанті досліду було зафіксовано найнижчі показники, – вихід твердого палива становив 6,90 т/га, що дозволило отримати 110,3 ГДж/га енергії.

Застосування тільки БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг забезпечило помітне зростання виходу твердого палива до 8,03 т/га та енергії до 128,5 ГДж/га. Проте збільшення дози біочару до 8 г/кг призвело до зниження продуктивності порівняно з попереднім варіантом до 7,72 т/га твердого біопалива та 123,5 ГДж/га енергії. Самостійне використання Мікофренду продемонструвало аналогічну тенденцію. За норми 4 г/кг вихід твердого біопалива склав 7,69 т/га (123,0 ГДж/га), а за норми 8 г/кг показники знизилися до 7,51 т/га та 120,2 ГДж/га відповідно.

Максимальна енергетична продуктивність за виходом твердого біопалива була досягнута за умови сумісного використання біопрепаратів. Найвищий у дослідженні результат (9,01 т/га палива та 144,2 ГДж/га енергії) зафіксовано за поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг. Це забезпечило прибавку енергії на рівні 30,7 % відносно контролю. За збільшення норми Мікофренду до 8 г/кг у поєднанні з 4 г/кг БМ-нанобіочару вихід твердого палива склав 8,69 т/га (139,1 ГДж/га), що також істотно перевищує показники на контролі. Однак подальше нарощування норм обох препаратів до 8 г/кг спричинило зниження виходу твердого біопалива до 7,84 т/га та енергії до 125,4 ГДж/га. Таким чином, оптимальним для отримання максимальної кількості твердого біопалива та енергії з нього є поєднання середніх норм обох компонентів (4+4 г/кг), що підтверджує їхню високу синергічну ефективність.

Загальна енергетична продуктивність сорго звичайного (двокольорового) за виходом енергії з обох видів біопалива (твердого та біоетанолу) також залежала від обробки насіння біопрепаратами. Так, у контрольному варіанті було зафіксовано мінімальний загальний вихід енергії на рівні 160,0 ГДж/га. Застосування тільки БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг забезпечило зростання загального енерговиходу до 182,1 ГДж/га, тоді як збільшення його дози до 8 г/кг призвело до зниження показника до 174,5 ГДж/га. Окреме використання Мікофренду продемонструвало схожу динаміку. Так, за норми 4 г/кг загальний вихід енергії склав 175,5 ГДж/га, а при 8 г/кг показник опустився до 168,3 ГДж/га, що лише незначно перевищує контроль.

Максимальний загальний вихід енергії у досліді було досягнуто за поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг, що дозволило отримати 202,8 ГДж/га. Це на 42,8 ГДж/га (або на 26,8 %)

більше порівняно з контрольним варіантом. Варіант із поєднанням 8 г/кг Мікофренду та 4 г/кг БМ-нанобіочару також показав високу ефективність (194,6 ГДж/га). Проте подальше нарощування норм обох компонентів до 8 г/кг спричинило зниження загального виходу енергії до 177,2 ГДж/га.

У структурі загального енерговиходу на всіх варіантах досліджу домінує енергія, отримана з твердого біопалива, частка якої складає близько 69 – 72 % від загального виходу енергії. Таким чином, домінування твердого біопалива у структурі енерговиходу в поєднанні з синергічною дією препаратів у помірних нормах дозволяє досягти найвищих показників загального виходу енергії з посівів сорго звичайного (двокольорового).

Коефіцієнт енергетичної ефективності, що розраховується як відношення загального виходу енергії до витрат енергії на вирощування, є інтегральним показником оцінки доцільності застосування досліджуваних агрозаходів. У контрольному варіанті значення КЕЕ було найнижчим і становило 7,44. Застосування тільки БМ-нанобіочару в нормі 4 г/кг дозволило підвищити ефективність використання енергії до 8,47, тоді як збільшення його дози до 8 г/кг призвело до зниження коефіцієнта до 8,11. Окреме використання Мікофренду продемонструвало аналогічну динаміку. За норми 4 г/кг КЕЕ склав 8,16, а при підвищенні норми до 8 г/кг він знизився до 7,83. Це свідчить про те, що роздільне застосування препаратів забезпечує позитивний енергетичний відгук, проте його рівень обмежений ресурсною віддачею окремих компонентів.

Найвищий рівень енергетичної окупності витрат було зафіксовано за умови сумісного використання обох біопрепаратів. Максимальне значення КЕЕ у дослідженні (9,43) досягнуто за поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг кожного. Це значення на 26,7 % перевищує показник контролю, що підтверджує високу енергетичну доцільність саме такої комбінації. Висока ефективність також спостерігалася при поєднанні 8 г/кг Мікофренду та 4 г/кг біочару, де КЕЕ становив 9,05. Однак подальше нарощування норм обох препаратів до 8 г/кг спричинило зниження коефіцієнта до 8,24. Таким чином, використання помірних норм Мікофренду та БМ-нанобіочару (4+4 г/кг) є найбільш раціональним технологічним рішенням, яке забезпечує максимальний вихід енергії на одиницю витрачених енергоресурсів під час вирощування сорго звичайного (двокольорового) на енергетичні цілі.

Отже, аналіз енергетичної продуктивності рослин сорго звичайного (двокольорового) підтверджує, що найбільший сумарний вихід енергії (202,8 ГДж/га) та найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності (9,43) досягаються за поєднання помірних норм

Мікофренду та БМ-нанобіочару по 4 г/кг. У структурі загального енерговиходу домінуючим складником на всіх варіантах дослідів залишається енергія, отримана з твердого біопалива.

**Висновки.** Передпосівна обробка насіння сорго звичайного (двокольорового) сумішшю Мікофренду та БМ-нанобіочару дозволяє суттєво підвищити продуктивність рослин. Максимальну врожайність вологої біомаси (15,1 т/га) зафіксовано за поєднання високої норми Мікофренду (8 г/кг) та середньої дози БМ-нанобіочару (4 г/кг). Водночас найвищі в досліді показники збору сухої речовини (8,19 т/га) та насіння (6,74 т/га) відмічено за умови використання помірних доз обох препаратів – по 4 г/кг. Подальше збільшення норм обробки насіння до 8 г/кг спричиняє зниження продуктивності культури, що, очевидно, пов'язано з виникненням осмотичного та трофічного стресу рослин у період проростання.

Спільне застосування біопрепаратів сприяє покращенню біохімічного складу сировини, зокрема підвищенню вмісту крохмалю в зерні до 71,2–72,1 % та сухої речовини в біомасі до 55,6 %. Водночас використання суміші Мікофренду і БМ-нанобіочару у нормі 4+4 г/кг призводить до зростання зольності до 8,03 % та деякого зниження частки структурних вуглеводів (целюлози та геміцелюлози), що змінює технологічну придатність сировини. Найвищий вміст лігніну (10,05 %) забезпечує самостійне застосування БМ-нанобіочару в максимальній дозі 8 г/кг.

Найвищу енергетичну продуктивність агрофітоценозу забезпечує поєднання Мікофренду та БМ-нанобіочару в нормах по 4 г/кг, що дозволяє отримати максимальний вихід біоетанолу (2,34 т/га) та твердого біопалива (9,01 т/га), а також загальний вихід енергії (202,8 ГДж/га) та найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності (9,43). У загальній структурі енерговиходу на всіх варіантах дослідів домінуючим складником залишається енергія, отримана з твердого біопалива, частка якої становить близько 70 % від загального виходу енергії.

### **Конфлікт інтересів**

Немає

### **Список використаних джерел**

1. Liaqat W., Altaf M. T., Barutcular C., Mohamed H. I., Ahmad H., Jan M. F., Khan E. H. Sorghum: a Star Crop to Combat Abiotic Stresses, Food Insecurity, and Hunger Under a Changing Climate: a Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2024. Vol. 24, No. 1. P. 74–101. DOI: 10.1007/s42729-023-01607-7

2. Hossain M. S., Islam M. N., Rahman M. M., Mostofa M. G., Khan M. A. R. Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022. Vol. 8. 100300. DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100300

3. Khalifa M., Eltahir E. A. B. Assessment of global sorghum production, tolerance, and climate risk. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023. Vol. 7. 1184373. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1184373

4. Bombelli A., Di Paola A., Chiriaco M. V., Perugini L., Castaldi S., Valentini R. Climate Change, Sustainable Agriculture and Food Systems: The World After the Paris Agreement. *Achieving the Sustainable Development Goals Through Sustainable Food Systems*. 2019. P. 25–34. DOI: 10.1007/978-3-030-23969-5\_2

5. Ганженко О. М., Злиденний І. І. Посівні якості насіння сорго звичайного (двокольорового) залежно від обробки біопрепаратами. *Біоенергетика*. 2025. № 1. С. 11–14. DOI: 10.47414/be.2025.No1.pp.11-14

6. Srivastava A. K., Riaz A., Jiang J. M., Li X. Y., Uzair M., Mishra P., Zeb A., Zhang J. W., Singh R. P., Luo L. F. Advancing Climate-Resilient Sorghum: the Synergistic Role of Plant Biotechnology and Microbial Interactions. *Rice*. 2025. Vol. 18, No. 1. 41. DOI: 10.1186/s12284-025-00796-2

7. Abreha K. B., Enyew M., Carlsson A. S., Vetukuri R. R., Feyissa T., Motlhaodi T., Ng'uni D., Geleta M. Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*. 2022. Vol. 255, No. 1. 20. DOI: 10.1007/s00425-021-03799-7

8. Khalid W., Ali A., Arshad M. S., Afzal F., Akram R., Siddeeg A., Kousar S., Rahim M. A., Aziz A., Maqbool Z. Nutrients and bioactive compounds of Sorghum bicolor L. used to prepare functional foods: a review on the efficacy against different chronic disorders. *International Journal of Food Properties*. 2022. Vol. 25, No. 1. P. 1045–1062. DOI: 10.1080/10942912.2022.2071293

9. Mawouma S., Condurache N. N., Turturica M., Constantin O. E., Croitoru C., Rapeanu G. Chemical Composition and Antioxidant Profile of Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) Grains Cultivated in the Far-North Region of Cameroon. *Foods*. 2022. Vol. 11, No. 14. 2026. DOI: 10.3390/foods11142026

10. Тігаренко О. С., Карпук Л. М. Урожайність та енергетична ефективність сорго зернового за різних заходів догляду за посівами. *Агробіологія*. 2022. № 1. С. 145–151. DOI: 10.33245/2310-9270-2022-171-1-145-151

11. Роїк М. В., Правдива Л. А., Ганженко О. М., Доронін В. А., Сінченко В. М., Курило В. Л., Фучило Я. Д., Квак В. М., Хіврич О. Б., Зиков П. Ю., Гончарук Г. С., Смірних В. М., Іванова О. Г., Дубовий Ю. П., Атаманюк О. М., Яланський О. В. Технологія вирощування сорго

зернового як сировини для харчової промисловості та виробництва біопалива. *Науково-методичні рекомендації*. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2020. 21 с.

12. Ivanina V., Ionitsoi-Dotsenko Y., Strilets O., Sinchuk G., Orlov S., Zinchenko O., Hanzhenko O., Khivrych O., Mazur G. Effect of fertilisers on yield, water consumption and energy capacity of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Acta agriculturae Slovenica*. 2025. Vol. 121, No. 1. P. 1–9. DOI: 10.14720/aas.2025.121.1.18753

13. Gamayunova V., Khonenko L., Kovalenko O. Bioethanol producing from sorghum crops. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2022. Vol. 26, No. 1. P. 9–18. DOI: 10.56407/2313-092X/2022-26(1)-1

14. Іваніна В. В., Пашинська К. Л., Смірних В. М. Винос і баланс елементів живлення в агроценозі сорго зернового залежно від удобрення. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 12. С. 28–32. DOI: 10.31073/agrovisnyk202112-03

15. Zahid M. K., Ahmad D., Amin R., Bao J. S. Sorghum starch: Composition, structure, functionality, and strategies for its improvement. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. Vol. 24, No. 1. e70101. DOI: 10.1111/1541-4337.70101

16. Zhang K. Y., Ke F. L., Zhou H. L., Wang J. X., Ma Z. B., Zhang F., Wang Y. Q., Zhang Z. P., Lu F., Duan Y. H. The correlation of starch composition, physicochemical and structural properties of different sorghum grains. *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. 1515022. DOI: 10.3389/fpls.2025.1515022

17. Bakari H., Djomdi, Ruben Z. F., Roger D. D., Cedric D., Guillaume P., Pascal D., Philippe M., Gwendoline C. Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) and Its Main Parts (By-Products) as Promising Sustainable Sources of Value-Added Ingredients. *Waste and Biomass Valorization*. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 1023–1044. DOI: 10.1007/s12649-022-01992-7

18. Babicka M., Wozniak M., Bartkowiak M., Peplinska B., Waliszewska H., Zborowska M., Borysiak S., Ratajczak I. Miscanthus and Sorghum as sustainable biomass sources for nanocellulose production. *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 186. 115177. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115177

19. Energy strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness". Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 605-r. 2017.

20. Abreu M., Silva L., Ribeiro B., Ferreira A., Alves L., Paixao S. M., Gouveia L., Moura P., Carvalho F., Duarte L. C. Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels-A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 12. 4348. DOI: 10.3390/en15124348

21. Правдива Л. А. Вплив мінерального живлення рослин на формування біометричних показників сорго зернового. *Агробіологія*. 2022. № 1. С. 43–52. DOI: 10.33245/2310-9270-2022-171-1-43-52

22. Правдива Л. А., Яланський О. В. Продуктивність та елементи структури врожайності різних сортів сорго звичайного двокольорового (*Sorghum bicolor* L.). *Новітні агротехнології*. 2022. Т. 10, № 3. DOI: 10.47414/na.10.3.2022.270497

23. Kanatas P., Travlos I., Gazoulis I., Antonopoulos N., Tataridas A., Mpechliouli N., Petraki D. Biostimulants and Herbicides: A Promising Approach towards Green Deal Implementation. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, No. 12. 3205. DOI: 10.3390/agronomy12123205

24. Kavitha B., Reddy P.V.L., Kim B., Lee S.S., Pandey S.K., Kim K.H. Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 227. P. 146-154. Doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.082

25. Panahi H.K.S., Dehghani M., Ok Y.S., Nizami A.S., Khoshnevisan B., Mussatto S.I., Aghbashlo M., Tabatabaei M., Lam S.S. A comprehensive review of engineered biochar: Production, characteristics, and environmental applications. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 270. Article No122462. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122462

26. Bhantana P., Rana M.S., Sun X.C., Moussa M.G., Saleem M.H., Syaifudin M., Shah A., Poudel A.P., Pun A.B., Alam M., Mandal D.L., Shah S., Dong Z., Tan Q., Hu C.X. Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*. 2021. Vol. 84, Iss. 1. P. 19-37. Doi: 10.1007/s13199-021-00756-6

27. Smith S.E., Smith F.A. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Nutrition and Growth: New Paradigms from Cellular to Ecosystem Scales. *Annual Review of Plant Biology*. 2011. Vol. 62. P. 227-250. Doi: 10.1146/annurev-arplant-042110-103846

28. Smith S.E., Jakobsen I., Gronlund M., Smith F.A. 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*. 2011. Vol. 156, Iss. 3. P. 1050-1057. Doi: 10.1104/pp.111.174581

29. Димитров С.Г., Саблук В.Т., Тищенко М.В., Смірних В.М. Мікоризоутворюючі препарати та їхній симбіоз із рослинами пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.). *Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2019. Випуск 27. С. 51-61. <https://doi.org/10.47414/np.27.2019.211138>

30. Хоменко Т., Дацько А., Квасніцька Л. Вплив обробки насіння комплексним мікоризотвірним препаратом мікофренд на продуктивність сої в умовах правобережного Лісостепу України.

Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2019. Випуск 24 (38). С. 260-267. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24\(38\)-27](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24(38)-27)

31. Грицаєнко З.М., Грицаєнко А.О., Карпенко В.П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. 320 с.

32. Правдива Л.А., Ганженко О.М., .Доронін В.А., Бойко І.І., Сінченко В.М., Фучило Я.Д., Квак В.М., Гончарук Г.С., Смірних В.М., Атаманюк О.М., Власенко С.І. Методичні рекомендації з проведення спостережень, обліків та визначення якісних показників у дослідженнях сорго зернового. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2021. 34 с.

33. Медведовський О. К., Іваненко П. І. Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільськогосподарському виробництві. Київ: Урожай, 1988. 208 с.

34. Ермантраут Е. Р., Присяжнюк О. І., Шевченко І. Л. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica 6.0 : методичні вказівки. Київ: Поліграф Консалтинг, 2007. 56 с.

#### REFERENCES

1. Liaqat, W., Altaf, M. T., Barutcular, C., Mohamed, H. I., Ahmad, H., Jan, M. F., & Khan, E. H. (2024). Sorghum: A star crop to combat abiotic stresses, food insecurity, and hunger under a changing climate: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(1), 74–101. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01607-7>

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

3. Khalifa, M., & Eltahir, E. A. B. (2023). Assessment of global sorghum production, tolerance, and climate risk. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1184373. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1184373>

4. Bombelli, A., Di Paola, A., Chiriaco, 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). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23969-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23969-5_2)

5. Hanzhenko, O. M., & Zlydennyi, I. I. (2025). Posivni yakosti nasinnia sorho zvychainoho (dvokolorovoho) zalezho vid obrobky biopreparatamy [Sowing qualities of sorghum seeds depending on treatment with biological preparations]. *Bioenergy*, 1, 11–14. <https://doi.org/10.47414/be.2025.No1.pp.11-14> [In Ukrainian]

6. Srivastava, A. K., Riaz, A., Jiang, J. M., Li, X. Y., Uzair, M., Mishra, P., Zeb A., Zhang, J. W., Singh, R. P., & Luo, L. F. (2025). Advancing

climate-resilient sorghum: The synergistic role of plant biotechnology and microbial interactions. *Rice*, 18(1), 41. <https://doi.org/10.1186/s12284-025-00796-2>

7. Abreha, K. B., Enyew, M., Carlsson, A. S., Vetukuri, R. R., Feyissa, T., Motlhaodi, T., Ng'uni, D., & Geleta, M. (2022). Sorghum in dryland: Morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*, 255(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>

8. Khalid, W., Ali, A., Arshad, M. S., Afzal, F., Akram, R., Siddeeg, A., Kousar, S., Rahim, M. A., Aziz, A., & Maqbool, Z. (2022). Nutrients and bioactive compounds of Sorghum bicolor L. used to prepare functional foods: A review on the efficacy against different chronic disorders. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 1045–1062. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2071293>

9. Mawouma, S., Condurache, N. N., Turturica, M., Constantin, O. E., Croitoru, C., & Rapeanu, G. (2022). Chemical composition and antioxidant profile of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) grains cultivated in the Far-North region of Cameroon. *Foods*, 11(14), 2026. <https://doi.org/10.3390/foods11142026>

10. Titarenko, O. S., & Karpuk, L. M. (2022). Urozhasnist ta enerhetychna efektyvnist sorho zernovoho za riznykh zakhodiv dohliadu za posivamy [Yield and energy efficiency of sorghum grain under different crop care measures.]. *Agrobiologia*, 1, 145–151. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-145-151> [In Ukrainian]

11. Roik, M. V., Pravdyva, L. A., Hanzhenko, O. M., Doronin, V. A., Sinchenko, V. M., Kurylo, V. L., Fuchylo, Ya. D., Kvak, V. M., Khivrych, O. B., Zykov, P. Yu., Honcharuk, H. S., Smirnykh, V. M., Ivanova, O. H., Dubovyi, Yu. P., Atamaniuk, O. M., & Yalanskyi, O. V. (2020). *Tekhnolohiia vyroshchuvannia sorho zernovoho yak syrovyny dlia kharchovoi promyslovosti ta vyrobnytstva biopalyva: Naukovo-metodychni rekomendatsii* [Technology of growing grain sorghum as a raw material for the food industry and biofuel production: Scientific and methodological recommendations]. FOP Yamchynskyi O.V. [In Ukrainian]

12. Ivanina, V., Ionitsoi-Dotsenko, Y., Strilets, O., Sinchuk, G., 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>

13. Gamayunova, V., Khonenko, L., & Kovalenko, O. (2022). Bioethanol producing from sorghum crops. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 26(1), 9–18. [https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26\(1\)-1](https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26(1)-1)

14. Ivanina, V. V., Pashynska, K. L., & Smirnykh, V. M. (2021). Vynos i balans elementiv zhyvlennia v ahrotsenozii sorho zernovoho zalezno vid udobrennia [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]
15. Zahid, M. K., Ahmad, D., Amin, R., & Bao, J. S. (2025). Sorghum starch: Composition, structure, functionality, and strategies for its improvement. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1), e70101. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70101>
16. Zhang, K. Y., Ke, F. L., Zhou, H. L., Wang, J. X., Ma, Z. B., Zhang, F., Wang, Y. Q., Zhang, Z. P., Lu, F., & Duan, Y. H. (2025). The correlation of starch composition, physicochemical and structural properties of different sorghum grains. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1515022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1515022>
17. Bakari, H., Djomdi, Ruben, Z. F., Roger, D. D., Cedric, D., Guillaume, P., Pascal, D., Philippe, M., & Gwendoline, C. (2023). Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) and its main parts (by-products) as promising sustainable sources of value-added ingredients. *Waste and Biomass Valorization*, 14(4), 1023–1044. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01992-7>
18. Babicka, M., Wozniak, M., Bartkowiak, M., Peplinska, B., Waliszewska, H., Zborowska, M., Borysiak, S., & Ratajczak, I. (2022). Miscanthus and Sorghum as sustainable biomass sources for nanocellulose production. *Industrial Crops and Products*, 186, 115177. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115177>
19. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2017). *Energy strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness"* (Decree No. 605-r).
20. Abreu, M., Silva, L., Ribeiro, B., Ferreira, A., Alves, L., Paixao, S. M., Gouveia, L., Moura, P., Carvalheiro, F., & Duarte, L. C. (2022). Low indirect land use change (ILUC) energy crops to bioenergy and biofuels—A review. *Energies*, 15(12), 4348. <https://doi.org/10.3390/en15124348>
21. Pravdyva, L. A. (2022). Vplyv mineralnoho zhyvlennia roslyn na formuvannia biometrychnykh pokaznykiv sorho zernovoho [Influence of crops mineral nutrition on the biometric indicators of grain sorghum formation]. *Agrobiologia*, 1, 43–52. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-43-52> [In Ukrainian]
22. Pravdyva, L. A., & Yalanskyi, O. V. (2022). Produktyvnist ta elementy struktury vrozhaivosti riznykh sortiv sorho zvychnoiho dvokoloroho (*Sorghum bicolor* L.) [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]

23. Kanatas, P., Travlos, I., Gazoulis, I., Antonopoulos, N., Tataridas, A., Mpechliouli, N., & Petraki, D. (2022). Biostimulants and herbicides: A promising approach towards Green Deal implementation. *Agronomy*, 12(12), 3205. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123205>

24. 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>

25. Panahi, H. K. S., Dehghani, 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, 122462. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122462>

26. Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X. C., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., Shah, A., Poudel, A. P., Pun, A. B., Alam, M., Mandal, D. L., Shah, S., Dong, Z., 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>

27. 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>

28. 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>

29. Dymytrov, S. H., Sabluk, V. T., Tyshchenko, M. V., & Smirnykh, V. M. (2019). Mikoryzoutvoriuiuchi preparaty ta yikhniy symbioz iz roslynamy pshenytsi miakoi ozymoi (*Triticum aestivum* L.) [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]

30. Khomenko, T., Datsko, A., & Kvasnitska, L. (2019). Vplyv obrobky nasinnia kompleksnym mikoryzotvirnym preparatom mikofrend na produktyvnist soi v umovakh pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [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. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24\(38\)-27](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24(38)-27) [In Ukrainian]

31. Hrytsaienko, Z. M., Hrytsaienko, A. O., & Karpenko, V. P. (2003). *Metody biologichnykh ta ahrokhimichnykh doslidzhen roslin i hruntiv* [Methods of biological and agrochemical research of plants and soils]. ZAT «Nichlava». [In Ukrainian]

32. Pravdyva, L. A., Hanzhenko, O. M., Doronin, V. A., Boiko, I. I., Sinchenko, V. M., Fuchylo, Ya. D., Kvak, V. M., Honcharuk, H. S., Smirnykh, V. M., Atamaniuk, O. M., & Vlasenko, S. I. (2021). *Metodychni rekomendatsii z provedennia sposterezhen, oblikiv ta vyznachennia yakisnykh pokaznykiv u doslidzhenniakh sorho zernovoho* [Methodological recommendations for observations, accounts and determination of qualitative indicators in research of grain sorghum]. FOP Yamchynskyi O.V. [In Ukrainian]

33. Medvedovskyi, O. K., & Ivanenko, P. I. (1988). *Enerhetychnyi analiz intensyvnykh tekhnolohii v silskohospodarskomu vyrobnytstvi* [Energy analysis of intensive technologies in agricultural production]. Urozhai. [In Ukrainian]

34. Ermantraut, E. R., Prysiazhniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statystychnyi analiz ahronomichnykh doslidnykh danykh v paketi Statistica 6.0: Metodychni vkazivky* [Statistical analysis of agronomic research data in the Statistica 6.0 package: Methodological guidelines]. Polihraf Konsaltnyh. [In Ukrainian]

Отримано: 03.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 22.05.2026.

DOI <https://doi.org/10.31359/2413.7642.2026.1.173>

УДК 633.854.78:631.527

**Білик В. В.**, аспірант кафедри генетики, селекції та насінництва  
E-mail [vadimbilyk998@gmail.com](mailto:vadimbilyk998@gmail.com), ORCID 0009-0008-6800-9251  
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

## **ФОРМУВАННЯ ЦІННИХ ГОСПОДАРСЬКИХ ОЗНАК У ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ГІБРИДІВ СОНЯШНИКА В УМОВАХ СХІДНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ**

**Анотація.** Соняшник є однією з найважливіших олійних культур світу та України, а підвищення його продуктивності значною мірою пов'язане зі створенням нових високопродуктивних гетерозисних гібридів. У сучасних умовах зміни клімату та зростання вимог до стабільності врожайності особливої актуальності набуває дослідження генетичної мінливості господарсько цінних ознак і встановлення взаємозв'язків між елементами структури врожаю. Комплексна оцінка експериментальних гібридів за морфологічними та продуктивними показниками дозволяє виділити перспективні генотипи для подальшого використання у селекції.