

КАРПАТСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТЕФАНІКА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КАРПАТСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТЕФАНІКА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СІТНИК АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ

УДК 631.147:633.63+633.35+633.
15+633.1:504.5(477.86)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ
БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ
ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ**

201 Агрономія

20 Аграрні науки та продовольство

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.А. Сітник

Науковий керівник: Карбівська Уляна Миронівна, доктор
сільськогосподарських наук, професор

Івано-Франківськ 2025

АНОТАЦІЯ

Сітник А.А. Особливості формування продуктивності біоенергетичних культур в умовах зміни клімату Західного регіону України. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 20 Аграрні науки та продовольство за спеціальністю 201 Агрономія. – Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, Міністерство освіти і науки України, м. Івано-Франківськ, 2025.

У дисертаційній роботі здійснено теоретичне узагальнення та запропоновано науково-практичне розв'язання проблеми збільшення врожайності біомаси, що полягає у встановленні закономірностей формування продуктивності енергетичних культур за різного удобрення. На основі експериментальних досліджень обґрунтовано оптимальні варіанти застосування мінеральних добрив, біостимулятора росту та титанового мікродобрива у технологіях вирощування багаторічних і однорічних культур на дерново-підзолистому ґрунті Західного регіону України.

У роботі подано результати наукових досліджень, які отримані у двох польових експериментах. Перший польовий дослід був спрямований на вивчення впливу віку насаджень та рівнів удобрення на продуктивність багаторічних енергетичних культур – міскантусу гігантського (*Miscanthus giganteus*) та проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L.). Другий дослід передбачав визначення оптимальних варіантів удобрення для однорічних енергетичних культур, зокрема сорго цукрового (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) та кукурудзи звичайної (*Zea mays* L.).

Структура дисертаційної роботи визначена логікою проведення досліджень і поставленими завданнями та включає вступ, шість розділів, загальні висновки, рекомендації для виробництва, список використаних джерел і додатки.

Метеорологічні умови місця проведення досліджень упродовж 2022–2025 рр., зокрема температурний режим, кількість атмосферних опадів і відносна вологість повітря, характеризувалися міжрічною мінливістю. Водночас зазначені коливання не досягали критичних значень, проте мали істотний вплив на формування рівня врожайності біоенергетичних культур.

В умовах Західного регіону на дерново-підзолистому ґрунті застосування мінеральних добрив, біостимулятора росту та мікродобрива на основі титану у всіх дослідних варіантах позитивно впливало на ріст і продуктивність енергетичних культур. Висота основного пагона міскантусу істотно залежала від року вегетації та системи удобрення. У перший рік вирощування найменші показники зафіксовано на контролі (111 см). Застосування Інтермаг Титан сприяло підвищенню цього значення до 128 м., а у варіантах $N_{30}P_{30}K_{30}+$ БЛЕК ДЖЕК КС та $N_{30}P_{30}K_{30}+$ Інтермаг Титан – до 136–140 см. На другий рік вегетації висота зросла до 205 см на контролі та 255–259 см у варіантах з мінеральними добривами. Максимальні показники за період досліджень відмічено у третій рік вегетації (282–289 см). У четвертий рік спостерігалось незначне зниження висоти (209–271 см), однак варіанти з поєднаним застосуванням мінеральних і мікродобрив забезпечували стабільно вищі показники порівняно з контролем.

Доведено, що міскантус гігантський сорту Осінній зорецвіт характеризується високою реакцією на системи удобрення, що підтверджується зростанням врожайності в 1,2–1,4 раза порівняно з контролем. Найбільший вплив на формування біомаси мають макроелементи, тоді як мікродобрива виконують роль каталізаторів фізіологічних фізіолого-біохімічних процесів. Комбіновані варіанти із застосуванням мінеральних добрив (NPK) у поєднанні з мікродобривами забезпечують синергічний ефект живлення, створюючи найбільш сприятливі умови для росту та розвитку культури. А за всі роки досліджень найвищу продуктивність міскантусу гігантського (36,87 т/га) зафіксовано у варіантах $N_{30}P_{30}K_{30}+$ БЛЕК ДЖЕК КС.

Установлено, що просо прутоподібне сорту Морозко як багаторічна злакова енергетична культура характеризується поступовим нарощуванням урожайності в

процесі формування травостою та стабільною реакцією на системи удобрення, що забезпечує приріст урожаю на 14–34 % залежно від застосованих препаратів. Максимальні показники продуктивності (20,15–20,33 т/га в середньому) отримано у комбінованих варіантах із внесенням NPK і мікродобрив. Основний приріст урожайності формувався через мінерального удобрення (NPK), тоді як мікродобрива виконували функцію підсилювального чинника. Стабільність продуктивності підвищувалася у варіантах із повним мінеральним живленням, що свідчить про зростання адаптивності культури до мінливих погодних умов. Щорічне зростання врожайності впродовж досліджуваного періоду підтверджує високу пластичність і значний продуктивний потенціал проса прутоподібного як енергетичної культури.

Сорго цукрове сорту Фаворит характеризується високим біоенергетичним потенціалом, формуючи 51,7–70,5 т/га зеленої маси залежно від системи живлення. Основним чинником підвищення врожайності є мінеральне удобрення, яке забезпечує +27 % приросту врожаю до контролю. Кукурудза гібриду Мантікора має високий генетичний потенціал продуктивності, що реалізується лише за умов оптимального мінерального та мікроелементного живлення. Застосування NPK дало найпотужніший ефект – +54 % прибавки порівняно з контролем, при цьому урожайність становила 10,36 т/га. Мікродобрива, що внесенні окремо забезпечували приріст +51 %, а найвищий вплив спостерігався при їхньому поєднанні з NPK, що підвищувало урожайність до $\geq 10,63$ т/га. Визначено, що комбіноване удобрення формувало найвищу та найстабільнішу продуктивність, визначаючи його як оптимальний варіант для інтенсивних технологій вирощування гібриду кукурудзи Мантікора.

Усі досліджувані культури реагують позитивно на оптимізацію живлення, найбільше – міскантус гігантський і сорго цукрове. Комбіновані варіанти застосування $N_{90}P_{90}K_{90}$ + мікродобрива забезпечують для міскантусу: +35 % приросту біопалива, у проса прутоподібного: +20 %, у кукурудзи: +10 %, у сорго цукрового: +39 % біогазу та +39 % твердого залишку. Це демонструє, що

мікродобрива підсилюють ефект макроелементів і формують найвищу енергетичну продуктивність агрофітоценозів даних енергокультур.

Результати дослідження хімічного складу зерна кукурудзи свідчать про суттєвий вплив удобрення на формування його якісних показників. На контрольному варіанті без удобрення вміст крохмалю становив 66,90 %, сирого протеїну – 8,31 %, жиру – 4,03 %. Застосування повного мінерального добрива у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ забезпечило підвищення концентрації основних поживних компонентів зерна, зокрема крохмалю (1,2 %), протеїну (0,9 %) та жиру (0,4 %), порівняно з контрольним варіантом.

Позакореневі препарати БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан позитивно впливали на процеси цукронакопичення в рослинах сорго цукрового, однак їх ефективність була нижчою порівняно з дією основного мінерального удобрення. У фазі молочної стиглості вміст загальних цукрів за їх окремого застосування становив 14,5 та 14,7 % відповідно, що перевищувало контрольний варіант, але поступалося показнику варіанту з внесенням $N_{30}P_{30}K_{30}$. Найвищі значення цукронакопичення сформувалися за поєднаного застосування мінеральних добрив із біостимуляторами.

Застосування мікродобрив істотно впливало на елементний склад рослин кукурудзи. Найвищий вміст фосфору зафіксовано у варіанті з Інтермаг Титан – 184 мг/100 г у листках та 114 мг/100 г у коренях, тоді як за внесення БЛЕК ДЖЕК КС максимальна концентрація фосфору відмічена у стеблах – 164 мг/100 г. Найбільший вміст калію сформувався за удобрення $N_{90}P_{90}K_{90}$ і становив 1205 мг/100 г у листках, 1362 мг/100 г у стеблах та 725 мг/100 г у зерні. Використання мікродобрив також забезпечило підвищення концентрацій Fe, Mn, Ti, Zn і Ni, що підтверджує їх стимулюючу дію на поглинання та нагромадження елементів живлення рослинами кукурудзи.

Економічний аналіз показав, що досліджувані культури формують суттєво різні фінансові моделі виробництва. Найбільш високорентабельними виявилися вирощування кукурудзи та міскантусу гігантського, тоді як просо прутоподібне демонструвало помірну прибутковість, а сорго цукрове при існуючій ціні зеленої

маси було збитковим. Міскантус гігантський характеризувався найвищим рівнем накопиченого прибутку у довгостроковому періоді. Незважаючи на значні первинні інвестиції (~65 тис. грн/га), точка окупності наставала на 3–4-й рік вирощування, після чого культура генерувала 20–35 тис. грн чистого прибутку щорічно. Комбіновані варіанти внесення NPK + мікродобрива забезпечили найвищий сумарний прибуток як у 4-річній, так і 15-річній перспективі.

Для проса прутоподібного встановлено, що економічна ефективність значною мірою залежить від співвідношення ефекту та затрат удобрення. Мікродобрива збільшували врожайність при мінімальних витратах, це забезпечило прибутковість 3,5–7,9 тис. грн/га на рік. Внесення NPK у стандартній нормі було економічно недоцільним через високу собівартість продукції.

Сорго цукрове виявилось економічно збитковим при ціні зеленої маси 350 грн/т, незалежно від застосування добрив. Витрати на вирощування (27,5–33 тис. грн/га) не компенсувалися валовою виручкою. Технологія вирощування цієї культури стає прибутковою лише за умови підвищення ціни до 500–550 грн/т або переорієнтації продукції на енергетичну переробку (пелети, силос, брикетування). Кукурудза продемонструвала найвищу рентабельність серед однорічних культур завдяки двосторонньому потоку продукції: виробництва зерна та побічної біомаси. За оцінки останньої як повноцінної енергетичної продукції (1000 грн/т), чистий прибуток становив 17–35 тис. грн/га у різних варіантах, при внесенні БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан спостерігалось найвище співвідношення доходів і витрат, а також перевищення 100 % рентабельності.

Міскантус гігантський мав максимальні значення коефіцієнта енергетичної ефективності (КЕЕ) – 34–39, яка пояснюється високим виходом сухої біомаси (до 51 т/га у найкращі роки) та низькими енергетичними витратами після закладки плантації. Комбіновані варіанти удобрення забезпечували найвищі енерговиходи (до 886 тис. МДж/га). Просо прутоподібне мало КЕЕ у межах 15–18. Високі значення цього показника на варіантах застосування мікродобрив засвідчують, що ця культура є енергетично доцільною за умов мінімальних витрат і стабільного рівня продуктивності. Сорго цукрове після корекції енерговиходів із урахуванням

фактичної вологості біомаси характеризувалося КЕЕ 9–11. Це значно нижче показників багаторічних культур, але відповідає рівню однорічних зеленомасових культур. Найвищі значення фіксувалися у варіантах із мікродобривами. Кукурудза формувала КЕЕ на рівні 11–13. Висока енерговіддача зумовлена поєднанням енергетично цінного зерна та побічної біомаси. Культура залишалася енергетично ефективною у всіх варіантах удобрення, причому мікродобрива забезпечували максимальну віддачу енергії на вкладену одиницю ресурсів.

Ключові слова: біоенергетичні культури, міскантус гігантський, просо прутноподібне, сорго цукрове, кукурудза, зерно, побічна продукція, дерново-підзолистий ґрунт, удобрення, позакореневе підживлення, біометричні показники, урожайність та продуктивність, економічна та енергетична ефективність, зміна клімату, Західний регіон України.

ABSTRACT

Sitnyk A.A. Features of Productivity Formation of Bioenergy Crops under Climate Change Conditions in the Western Region of Ukraine. Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 20 *Agricultural Sciences and Food*, specialty 201 *Agronomy*. Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2025.

The dissertation presents a theoretical generalization and proposes a scientific and practical solution to the problem of increasing biomass yields through identifying the patterns of productivity formation of bioenergy crops under different fertilization regimes. Based on experimental research, optimal options for the application of mineral fertilizers, growth biostimulants, and titanium-based micronutrient fertilizers in the cultivation technologies of perennial and annual crops on sod-podzolic soils of the Western region of Ukraine are substantiated.

The study is based on the results of two field experiments. The first experiment investigated the effects of plantation age and fertilization levels on the productivity of perennial bioenergy crops – giant miscanthus (*Miscanthus giganteus*) and switchgrass (*Panicum virgatum* L.). The second experiment focused on determining optimal fertilization regimes for annual bioenergy crops, namely sweet sorghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) and maize (*Zea mays* L.).

The structure of the dissertation follows the research logic and objectives and includes an introduction, six chapters, general conclusions, practical recommendations, a list of references, and appendices.

Meteorological conditions at the research site during 2022–2025, including air temperature, precipitation, and relative humidity, were characterized by interannual variability. Although these fluctuations did not reach critical levels, they had a significant effect on biomass yield formation in bioenergy crops.

Under the conditions of the Western region on sod-podzolic soils, the application of mineral fertilizers, growth biostimulants, and titanium-based micronutrient fertilizers positively influenced plant growth and productivity across all experimental treatments. The height of the main shoot of giant miscanthus was significantly affected by both the year of vegetation and the fertilization system. In the first year of cultivation, the lowest plant height was recorded in the unfertilized control (111 cm). Application of Intermag Titan increased plant height to 128 cm, while treatments with $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Black Jack KS and $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Intermag Titan resulted in heights of 136–140 cm. In the second year, plant height increased to 205 cm in the control and to 255–259 cm under mineral fertilization. The maximum values were observed in the third year of vegetation (282–289 cm). In the fourth year, a slight decrease in plant height (209–271 cm) was recorded; however, combined mineral and micronutrient fertilization consistently ensured higher values compared with the control.

Giant miscanthus cv. *Osinnii Zoretsvit* exhibited a high responsiveness to fertilization systems, with biomass yield increasing by 1,2–1,4 times compared with the control. Macronutrients played a dominant role in biomass formation, while micronutrients acted as catalysts of physiological and biochemical processes. Combined

application of mineral fertilizers (NPK) and micronutrients produced a synergistic nutritional effect, creating optimal conditions for plant growth and development. Over the entire research period, the highest productivity of giant miscanthus (36,87 t/ha) was recorded under the treatment N₃₀P₃₀K₃₀. + Black Jack KS.

Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cv. *Morozko*, as a perennial grass bioenergy crop, demonstrated a gradual increase in yield during sward establishment and a stable response to fertilization systems, resulting in yield increases of 14–34 % depending on the applied treatments. The highest average productivity (20,15–20,33 t/ha) was obtained under combined NPK and micronutrient fertilization. Yield increases were primarily driven by mineral fertilization, while micronutrients served as yield-enhancing factors. Treatments with complete mineral nutrition improved yield stability, indicating enhanced adaptability of the crop to variable weather conditions. Annual yield increases throughout the study period confirmed the high plasticity and substantial productive potential of switchgrass as a bioenergy crop.

Sweet sorghum cv. *Favorit* exhibited a high bioenergy potential, producing 51,7–70,5 t / ha of green biomass depending on the fertilization system. Mineral fertilization was the main factor contributing to yield increase, providing a 27 % gain over the control. Maize hybrid *Manticora* showed a high genetic yield potential, which was fully realized only under optimal mineral and micronutrient nutrition. Application of NPK resulted in the strongest effect, increasing yield by 54 % compared with the control (10,36 t / ha). Micronutrient fertilizers applied alone increased yield by 51 %, while their combination with NPK produced the highest and most stable yields ($\geq 10,63$ t / ha), identifying combined fertilization as the optimal strategy for intensive maize cultivation. It was determined that combined fertilization produced the highest and most stable yield, making it the optimal option for intensive cultivation technologies for the Manticore corn hybrid.

All studied crops responded positively to optimized nutrition, with giant miscanthus and sweet sorghum showing the greatest responsiveness. Combined application of N₉₀P₉₀K₉₀ with micronutrient fertilizers increased biofuel yield of miscanthus by 35 %, switchgrass by 20 %, maize by 10 %, and sweet sorghum biogas

and solid residue yields by 39 %. These results demonstrate that micronutrients enhance the effectiveness of macronutrients and ensure maximum energy productivity of bioenergy crop agrophytocenoses.

Fertilization significantly affected the chemical composition of maize grain. In the unfertilized control, starch content was 66,90 %, crude protein 8,31 %, and fat 4,03 %. Application of $N_{90}P_{90}K_{90}$ increased starch content by 1,2 %, protein by 0,9 %, and fat by 0,4 % compared with the control.

Foliar application of Black Jack KS and Intermag Titan positively influenced sugar accumulation in sweet sorghum plants; however, their effect was weaker than that of mineral fertilization. At the milk stage, total sugar content under separate application of these preparations reached 14,5–14,7 %, exceeding the control but remaining lower than in the $N_{30}P_{30}K_{30}$ treatment. The highest sugar accumulation was achieved under combined mineral fertilization and biostimulant application.

Micronutrient fertilizers significantly affected the elemental composition of maize plants. The highest phosphorus content was recorded under Intermag Titan application (184 mg/100 g in leaves and 114 mg /100 g in roots), whereas Black Jack KS resulted in the highest phosphorus concentration in stems (164 mg/100 g). The highest potassium content was observed under $N_{90}P_{90}K_{90}$ fertilization. Micronutrient application also increased the concentrations of Fe, Mn, Ti, Zn, and Ni, confirming their stimulatory effect on nutrient uptake and accumulation.

Economic analysis revealed substantial differences in production efficiency among the studied crops. Maize and giant miscanthus were the most profitable, switchgrass showed moderate profitability, and sweet sorghum was unprofitable at the current green biomass price. Giant miscanthus demonstrated the highest long-term profitability. Despite significant initial investments (~65,000 UAH/ha), the break-even point was reached in the third or fourth year of cultivation, after which the crop generated 20,000–35,000 UAH in net profit annually. Combined NPK and micronutrient fertilization ensured the highest cumulative profit over both 4- and 15-year periods.

Switchgrass profitability depended on the balance between yield response and fertilization costs. Microfertilizers increased yields at minimal cost, ensuring profitability

of 3,5–7,9 thousand UAH/ha per year. Applying NPK at the standard rate was economically unfeasible due to the high cost of production.

Sugar sorghum proved to be economically unprofitable at a green mass price of 350 UAH/t, regardless of fertilizer use. The costs of cultivation (27,5–33,0 thousand UAH/ha) were not offset by gross revenue. The technology for growing this crop becomes profitable only if the price increases to 500–550 UAH/t or the product is reoriented towards energy processing (pellets, silage, briquetting). Corn showed the highest profitability among annual crops due to the two-way flow of products: grain production and by-product biomass. When the latter was estimated as a full-fledged energy product (1,000 UAH/t), the net profit was 17–35 thousand UAH/ha in different variants. When BLACK JACK KS and Intermag Titan were applied, the highest ratio of income to expenses was observed, as well as a profitability exceeding 100 %.

Giant miscanthus showed the highest energy efficiency coefficient (EEC) of 34–39, attributed to high dry biomass yields and low energy inputs after plantation establishment. Switchgrass exhibited an EEC of 15–18, confirming its energy feasibility under low-input conditions. Sweet sorghum showed an EEC of 9–11 after moisture correction, while maize formed an EEC of 11–13. In all crops, micronutrient fertilization ensured the highest energy return per unit of input.

Keywords: bioenergy crops, giant miscanthus, switchgrass, sweet sorghum, corn, grain, by-products, sod-podzolic soil, fertilization, foliar feeding, biometric indicators, yield and productivity, economic and energy efficiency, climate change, Western region of Ukraine.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії Б:

1. Карбівська У.М., Сітник А.А. Продуктивність міскантусу залежно від елементів агротехнології на дерново-підзолистому ґрунті в умовах Прикарпаття. *Таврійський науковий вісник*. 2024. №137. С. 111–116.

DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.14>

URL: https://tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/137_2024/16.pdf

2. Сітник А.А. Особливості формування продуктивності сорго цукрового в умовах Західного регіону України. *Український журнал природничих наук*. 2025. №12. С. 232–239.

DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.23>

URL: <https://naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns/article/view/316>

3. Карбівська У.М., Сітник А.А. Оптимізація удобрення як чинник підвищення врожайності та якості рослин сорго цукрового і кукурудзи в Західному регіоні України. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2025. Вип. 78 (1). С. 69–78.

DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2025-\(78\)-1-6](https://doi.org/10.32636/01308521.2025-(78)-1-6)

URL: <https://journals.isgkr.science/index.php/phzt/article/view/404>

4. Сітник А.А., Карбівська У.М. Особливості формування продуктивності проса прутоподібного в умовах зміни клімату Західного регіону України. *Український журнал природничих наук*. 2025. №13. С. 310–317.

DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.29>

URL: <https://naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns/article/view/361>

Тези наукових доповідей

5. Сітник А.А. Продуктивність сорго цукрового залежно від елементів агротехнології в умовах Передкарпаття. *Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference, February 8–9, 2024*. FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, 2024. P. 188–190.

URL: [Conference-Proceedings-February-8-9-2024.pdf](https://www.fopmarenichenko.com.ua/Conference-Proceedings-February-8-9-2024.pdf)

6. Karbivska U.M., Hryhoriv Ya. Ya., **Sitnyk A.A.** Impact of fertilization on the productivity of sugar sorghum in the conditions of the Carpathian. *Topical aspects of modern scientific research: The 4th International Scientific and Practical Conference*, December 21–23, 2023. CPN Publishing Group, Tokyo, Japan, 2023. P. 15–19.

URL: <https://surl.li/hoxdtg>

7. **Сітник А.А.** Перспективи вирощування біоенергетичних культур в умовах Прикарпаття. *Історія освіти, науки і техніки в Україні: матеріали XX Всеукр. наук. конф. молодих учених та спец., присвяч. ювіл. датам від дня народж. видатних учених в галузі аграрних наук, зокрема: Георгія Миколайовича Висоцького (1865–1940); Левка (Лева) Платоновича Симиценка (1855–1920); Петра Івановича Прокоповича (1775–1850)*, Київ, 21–22 травня 2025 р. / НААН, ННСГБ, Ін-т історії аграр. науки, освіти та техніки; наук. ред. В.А. Вергунов. Вінниця: ТВОРИ, 2025. С. 168–170.

URL: file:///C:/Users/DELL/Desktop/zbirnik-konf-22_05_2025.pdf

8. Карбівська У.М., **Сітник А.А.** Особливості росту та розвитку багаторічних енергетичних культур в умовах Прикарпаття. *Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України: вчора, сьогодні, завтра: матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. конф., присвяченої ювілейним датам: 160-річчю Полтавського товариства сільського господарства, 105-річчю Полтавського державного аграрного університету, 90-річчю від дня народження Героя України С. С. Антонця (1935–2022)*, м. Київ, 17–18 вересня 2025 р. / НААН, ННСГБ і ін; наук. ред. В.А. Вергунов. Вінниця: ТВОРИ С. 322–324.

URL: konf_16_09_2025.pdf

9. **Сітник А.А.**, Карбівська У.М. Ефективність застосування добрив у вирощуванні міскантусу гігантського на дерново-підзолистих ґрунтах. *Інноваційні аспекти збереження і підвищення родючості ґрунтів у воєнний та повоєнний періоди: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 60-річчю тривалого стаціонарного дослідження Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН, м. Оброшине, 18 вересня 2025 р.* Оброшине, Львів, 2025. С. 210–212.

URL: https://drive.google.com/file/d/1m3u0JSXWSMdTa5iOFPiC53Fxb-7_H3j2/view

10. Карбівська У.М., Сітник А.А. Адаптивні стратегії формування врожайності проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L.) в умовах кліматичних змін Західного регіону України. *Актуальні питання розвитку сільського господарства: теорія і практика*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 9 жовтня 2025 р. / НААН, Інститут сільського господарства Карпатського регіону. Оброшине: Вид-во ІСГКР, 2025. С. 99–103.

URL: [ЗБІРНИК тез ПДСГДС 09.10.2025.pdf](#)

11. Баланюк С.І., Карбівська У.М., Сітник А.А. Перспективи вирощування енергетичних культур на низькопродуктивних ґрунтах Західного Лісостепу України. *Адаптація агровиробництва до змін клімату та грантової родючості*: матеріали міжнар. наук.-прак. конф., с. Полігон, Миколаївський район, Миколаївська область, 9 жовтня 2025 р. / ДУ “Миколаївська державна сільськогосподарська дослідна станція ІКОСГ НААН”. Полігон: Вид-во ІКОСГ, 2025. С. 15–17.

URL: <https://surl.li/lsrccto>

Методичні вказівки

12. Карбівська У.М., Сітник А.А. Методичні вказівки для самостійного вивчення дисципліни «Новітні біоенергетичні рослинні ресурси» для денної та заочної форм навчання здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти навчання зі спеціальності Н1 ”Агрономія”, ОНП ”Агрономія”. Івано-Франківськ. 2025. 30 с.

URL: <https://kag.cnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/27/2025/12/novitni-bioenerhetychni-roslynni-resursy-karbivska-sitnyk.pdf>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ		17
ВСТУП		18
РОЗДІЛ 1.	АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ(огляд літературних джерел)	23
1.1	Сучасний стан використання біоенергетичних культур в Україні та у світі	24
1.2	Агроекономічне та енергетичне значення біоенергетичних культур	31
1.3	Біолого-ботанічна характеристика біоенергетичних культур	36
1.4	Вплив добрив та біопрепаратів на продуктивність енергетичних культур	43
1.5	Вплив кліматичних змін на продуктивність енергетичних культур	47
РОЗДІЛ 2.	УМОВИ, ПРОГРАМА ТА МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
2.1	Оцінка ґрунтово-кліматичних умов території досліджень	51
2.2	Метеорологічні умови в роки досліджень	55
2.3	Схема і методика досліджень	61
РОЗДІЛ 3.	ОСОБЛИВОСТІ РОСТУ ТА РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР ЗАЛЕЖНО ВІД ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ	66
3.1	Динаміка висоти рослин залежно від досліджуваних факторів	66
3.2	Структура врожаю та густина стояння досліджуваних культур	75
РОЗДІЛ 4.	ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР ЗА РІЗНОГО УДОБРЕННЯ	84
4.1	Формування продуктивності багаторічних енергетичних культур під впливом років вегетації та удобрення	85
4.2	Урожайність однорічних енергетичних культур залежно від рівня мінерального живлення	91
4.3	Формування показників якості однорічних енергетичних культур	98
4.4	Розрахунковий вихід біопалива енергетичних культур під впливом досліджуваних факторів	106

РОЗДІЛ 5.	ЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД ОДНОРІЧНИХ РОСЛИН ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ	111
РОЗДІЛ 6.	ЕКОНОМІЧНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУР НА БІОЕНЕРГЕТИЧНІ ЦІЛІ	129
6.1	Економічна ефективність елементів технології вирощування	123
6.2	Енергетична ефективність вирощування біоенергетичних культур	144
ВИСНОВКИ		153
РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ		157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		158
ДОДАТКИ		193

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

% – відсоток;

°С – градус Цельсія;

N – азот, K – калій, P – фосфор;

ВВСН – міжнародна шкала росту та розвитку рослин;

га – гектар;

ГДж – гігаджоуль;

грн – гривня;

ГТК – гідротермічний коефіцієнт зволоження;

д. р. – діюча речовина;

ЄС – Європейський Союз;

IRENA – Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики;

ІБКіЦБ – Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків;

КЕЕ – коефіцієнт енергетичної ефективності;

МДж – мегаджоуль;

млн – мільйон;

НААН – Національна академія аграрних наук України;

НІР₀₅ – найменша істотна різниця;

р – рік;

СР – суха речовина;

т – тонна;

тис – тисяча;

тис. шт./га – тисяч штук на гектар;

шт – штук.

ВСТУП

Біоенергетика є важливою складовою відновлюваної енергетики, яка активно розвивається в усьому світі. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), у 2022 році виробництво електроенергії з біомаси досягло 697 ТВт·год, що становить близько 8 % від загального обсягу електроенергії, отриманої з відновлюваних джерел енергії. Лідерами за масштабами виробництва є Азія (51%), Європа (28 %) та Америка (19 %). В Україні біоенергетика перебуває на етапі активного розвитку. За даними Біоенергетичної асоціації України, станом на 2024 рік в нашій державі функціонують 83 біогазові установки, здатні замінити до 33 % споживання природного газу країною. Потенціал біогазового виробництва оцінюється в 15,4 млрд м³ біогазу на рік, що еквівалентно 8,8 млрд м³ біометану. У сфері виробництва біодизельного палива в Україні діє 14 великих промислових підприємств із сумарною проектною потужністю близько 300 тис. т на рік, а також орієнтовно 50 малих виробництв, річний запас яких становить до 25 тис. т біодизелю. Загалом, біоенергетика в нашій державі має значний потенціал для розвитку, однак для її реалізації необхідні інвестиції в інфраструктуру, державна підтримка та стабільна політика у сфері відновлюваної енергетики та припинення воєнних дій.

Актуальність теми дисертації. В умовах сучасних глобальних кліматичних змін, що проявляються підвищенням середньорічних температур, зміною режиму опадів, зростанням частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ, особливої актуальності набуває питання адаптації аграрного виробництва до нових природно-кліматичних реалій.

Паралельно з природними викликами перед Україною постає стратегічне завдання розвитку відновлюваної енергетики та зменшення залежності від викопних енергоресурсів. У цьому контексті біоенергетика розглядається як один із ключових напрямів забезпечення енергетичної безпеки держави. Важливою складовою біоенергетичного сектору є вирощування біоенергетичних культур,

здатних формувати високі та стабільні врожаї біомаси за різних ґрунтово-кліматичних умов і забезпечувати виробництво енергоємної рослинної сировини.

Багаторічні (міскантус гігантський, просо прутоподібне) та однорічні (сорго цукрове та кукурудза звичайна) енергетичні культури вирізняються значним потенціалом продуктивності, екологічною пластичністю та здатністю ефективно використовувати природні ресурси. Водночас, їх продуктивність значною мірою залежить від кліматичних чинників, які за умов змін клімату можуть як обмежувати, так і по-новому формувати процеси росту, розвитку та накопичення біомаси. Для Західного регіону України питання впливу кліматичних змін на формування продуктивності біоенергетичних культур залишається недостатньо вивченим, що стримує широке впровадження цих культур у виробництво.

Виняткової наукової та практичної значущості набувають дослідження, спрямовані на встановлення особливостей формування продуктивності біоенергетичних культур за умов змін температурного режиму, зволоження та тривалості вегетаційного періоду, а також на визначення їх адаптаційного потенціалу в умовах Західного регіону України. Реалізація результатів дисертаційної роботи сприятиме стабілізації виробництва біомаси, розвитку біоенергетичного сектору, розширенню використання відновлюваних джерел енергії та зміцненню енергетичної незалежності та екологічної безпеки України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові напрацювання, які узагальнені в дисертаційній роботі, входили до тематичного плану Карпатського національного університету імені Василя Стефаника та виконувалися в межах державної науково-технічної програми «Розробити системи заходів по запобіганню негативного впливу екстремальних екологічних ситуацій на природно-ресурсний потенціал Західного регіону України» (номер державної реєстрації 0113U006317) (2013–2027).

Мета та завдання досліджень. Мета дослідження полягала у встановленні особливостей росту, розвитку та продуктивності біоенергетичних культур залежно від удобрення в агроекологічних умовах змін клімату Західного регіону України.

Для досягнення мети були вирішені такі завдання:

✓ виявити закономірності росту і розвитку рослин багаторічних злакових культур (міскантусу гігантського і проса прутоподібного) та однорічних злакових та зернових (сорго цукрового та кукурудзи) залежно від удобрення;

✓ встановити продуктивність біоенергетичних культур залежно від впливу удобрення;

✓ виявити динаміку накопичення макро- і мікроелементів в рослинах біоенергетичних культур в залежності від удобрення;

✓ провести енергетичну та економічну оцінку технологій вирощування та переробки біомаси багаторічних злакових та однорічних культур.

Об'єкт досліджень – процес формування структурних елементів продуктивності та якості біомаси біоенергетичних культур залежно від їх біологічних особливостей і системи удобрення.

Предмет дослідження – вплив біологічних особливостей і удобрення на формування врожайності, біометричних, біохімічних та економіко-енергетичних показників біомаси біоенергетичних культур.

Методи дослідження. Упродовж досліджень застосовували загальнонаукові методи: метод гіпотез, аналізу та синтезу, моделювання експерименту, а також спеціальні: польовий – впродовж вегетаційного періоду спостереження за ростом та розвитком рослин, потенціал врожайності; лабораторний – диференціація посівних ознак насіння, склад загальних цукрів стебл рослини, рівень сухої речовини зеленої маси; математично-статистичний – кореляційний, дисперсійний, регресійний для достовірності даних експерименту; розрахунково–порівняльний – для визначення ефективності факторів досліду за економічно-енергетичними показниками.

Наукова новизна. *Вперше* в умовах змін клімату Західного регіону України вивчено особливості росту та розвитку рослин і формування врожайності міскантусу гігантського, проса прутоподібного, сорго цукрового та кукурудзи звичайної за вирощування на дерново-підзолистому ґрунті та застосуванням системи удобрення.

Удосконалено технологію вирощування біоенергетичних культур завдяки оптимізації елементів догляду за посівами, що позитивно позначилось на формуванні високоякісної біомаси – придатної для виробництва біопалива.

Набули подальшого розвитку питання встановлення закономірностей ростових процесів біоенергетичних культур, формування ними біометричних показників; методичні підходи до з'ясування енергетичної та економічної оцінки запропонованих агрозаходів.

Практичне значення результатів дослідження. Відповідно до результатів досліджень для Західного регіону України виробництву рекомендовано оптимальні складові технології вирощування різних видів біоенергетичних культур.

Методичні рекомендації результатів дослідження застосовуються у Карпатському національному університеті імені Василя Стефаника на кафедрі лісового і аграрного менеджменту на практичних заняттях з дисципліни «Новітні біоенергетичні рослинні ресурси».

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно написав і оформив дисертаційну роботу. Спільно з науковим керівником було розроблено програму та схему дослідження. Детально проаналізовано літературні джерела за тематикою дисертації, проведено польові та лабораторні дослідження, узальнено та проаналізовано отримані дані встановлено економічну та енергетичну ефективність технологій вирощування біоенергетичних культур, сформовано загальні висновки та запропоновано рекомендації виробництву.

Апробація результатів досліджень. Основні результати досліджень щорічно висвітлювалися в доповідях і обговорювалися на щорічних викладацько-аспіранських конференціях та наукових семінарах. Результати і висновки досліджень оприлюднено у виступах на міжнародних та всеукраїнських конференціях: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates» (Dnipro, Ukraine. February 8-9, 2024); The 4th International scientific and practical conference “Topical aspects of modern scientific research” (Tokyo, Japan, December 21-23, 2023); XX всеукр. наук. конф. молодих учених та спец., присвяч.

ювіл. датам від дня народж. видатних учених в галузі аграрних наук (м. Київ, 21–22 травня 2025 р.); міжнар. наук.-прак. конф. «Інноваційні аспекти збереження і підвищення родючості ґрунтів у воєнний та повоєнний періоди» (с. Оброшине, 2025); міжнар. наук.-прак. конф. «Актуальні питання розвитку сільського господарства: теорія і практика» (м. Івано-Франківськ, 2025 р.); міжнар. наук.-прак. конф. «Адаптація агровиробництва до змін клімату та ґрунтової родючості» (с-ще Полігон, Миколаївського району, Миколаївської області, 2025 р.).

Публікації. За підсумками виконаного дослідження опубліковано чотири наукові статті у фахових виданнях України категорії Б, одні методичні вказівки, а також сім тез доповідей у матеріалах науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Обсяг дисертаційної роботи викладено на 198 сторінках комп'ютерного набору, включає 29 таблиць, 25 рисунків. Складається робота із анотації, вступу, 6 розділів, висновків, рекомендацій виробництву, додатків. Список використаних джерел налічує 327 джерел, з них 125 латиницею.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ (огляд літературних джерел)

Останніми десятиліттями зростає зацікавленість до пошуку альтернативних джерел енергії, за рахунок використання відновлюваних ресурсів, поміж яких вагоме місце посідає переробка рослинної сировини. Такий підхід викликаний нестабільністю світових цін на звичні викопні енергоносії та небезпекою вичерпання їхніх резервів. За розрахунками частка біопалива у загальному обсязі пального найближчим часом може сягнути 10 %, з подальшою тенденцією до зростання. В той же час Україна має вагомий запас у галузі виробництва енергії з відновлюваних джерел. На сьогодні використання альтернативних і поновлюваних енергоресурсів є одним із найперспективніших напрямів рішення актуальних питань енергетичної безпеки [135; 151; 223; 284]. Визначальними перевагами такого підходу є присутність ресурсної бази, яка підлягає регенерації, а надто екологічна безпека цих джерел, які набирають виняткової ваги в умовах вичерпання резервів природного палива, а також збільшення рівня забруднення довкілля.

Одним із багатообіцяючих та недостатньо досліджених шляхів нинішнього аграрного виробництва є введення багаторічних та однорічних біоенергетичних культур, які здатні до швидкого відновлення. Через скорочення запасів традиційного палива, а також стрімкого зростанням його вартості, науковці всього світу завзято трудяться над створенням та впровадженням сучасних біоенергетичних технологій. В Україні через воєнні дії, ці питання наразі вивчені не достатньо, а це визначає попит в дослідженнях стосовно культивування культур, які можуть стати матеріалом для промислового виробництва енергії [203; 225; 315].

1.1. Сучасний стан використання біоенергетичних культур в Україні та у світі

Нині у світі зростає інтерес до широкого впровадження альтернативних джерел енергії через інтенсивне використання непоновлюваних енергетичних ресурсів. Відновлення енергетичного балансу може бути забезпечене залученням та ефективним використанням нетрадиційних джерел енергії [101; 104; 105]. Актуальним і головним напрямом у зазначеній галузі є пошук видів біоенергетичних культур, дослідження технологій їх культивування та впровадження у виробництво. Це сприятиме зростанню зайнятості населення та залученню додаткових фінансових ресурсів для соціально-економічного розвитку територіальних громад, розв'язанню вагомих проблем України, а також скороченню рівня енергетичної залежності. З метою вирішення даного вагомого питання практичне зацікавлення мають такі біоенергетичні культури як: міскантус гігантський, просо прутоподібне, сорго цукрове, кукурудза та інші. Серед цих фітоенергетичних культур міскантус гігантський та просо прутоподібне можуть формувати високу продуктивність за довголітнього циклу культивування на малопродуктивних землях. Такої позиції дотримується і М.В. Роїк із співавторами [279], підтверджуючи, що завдяки своїм властивостям енергокультури є перспективними та економічно доцільними для вирощування на цих землях.

На сьогодні війна негативно позначається не тільки на економіці України, навколишньому середовищі та добробуті громадян, а й посилює залежність від імпортованих енергоносіїв. В цих складних умовах наша держава змушена звертатись до альтернативних джерел енергії [151]. Одним із пріоритетних завдань науковців та аграрних виробників є розроблення і оптимізація особливостей технології вирощування культур із урахуванням ґрунтово-кліматичних умов, а також економічно-енергетичного обґрунтування відповідних технологічних процесів [311]. В сучасних умовах виробниче використання енергетичних культур в Україні знаходиться на етапі експериментальних досліджень, що зумовлює необхідність цілеспрямованої роботи щодо

впровадження енергетичних рослин у практику сільськогосподарського виробництва [281].

Дослідження практики культивування біоенергетичних культур та перспективних шляхів їх застосування набули актуальності в сучасних умовах. Рекомендації та перспективи розвитку біоенергетичних культур в нашій державі вивчали такі дослідники, як: Г.Г. Гелетуха [150], М.Я. Гументик [165], Т.А. Железна [186] та інші. На сьогодні актуальність зазначених задач та недостатня наукова обґрунтованість вирощування біоенергетичних культур в умовах зміни клімату Західного регіону України визначили доцільність проведення досліджень.

Упродовж попередніх 15–20 років у світі спостерігається дворазове зростання виробництва енергії з біоенергетичних культур та п'ятикратне – рідкого біопалива. Серед лідерів у виробництві біопалива вирізняють Північну Америку. Однак найвищі темпи розвитку виявлялись у країнах Євросоюзу, де протягом попереднього десятиріччя ці показники зросли у 23 рази. Біоенергетика енергійно розвивається та удосконалюється в країнах Азії, особливо в Індії та Китаї. Суттєвий ріст у цьому сегменті продемонструвала також і Бразилія [31; 136].

Визначальним поновним ресурсом є біомаса, яка становить 9,9% від валового виробництва первинної енергії, або 71,7% – енергії з відновлюваних джерел. Країни, що розвиваються виробляють вагому частину первинної енергії з біомаси (86,5%), зокрема Африка –28,1%, Китай –17,4%, Латинська Америка –9,1%, та інші країни Азії –30,4%. Лідером за площами енергоплантацій в Європі вважається Італія (57 тис. га), Польща, Швеція, Німеччина та Данія мають площу від 11 до 13 тис. га, тоді як в Україні вона становить тільки близько 6 тис. га. При цьому 48% загальної площі енергоплантацій розташовано у Волинській області, 41% зосереджено в Київській, Львівській, Івано-Франківській та Хмельницькій області, в інших регіонах України під них відводиться менше 100 тис. га [316].

Максимальна частина біомаси у виробництві енергії є властивою для Латвії – 26%, Фінляндії – 20%, Швеції – 19%, Данії – 13%, Португалії та Австрії по 12%. Тому відновлювані джерела енергії набувають вагоме значення для заміни традиційних викопних видів палива та зменшення викидів парникових газів [315].

На відміну від біопаливних енергетичних рослин першого покоління, енергетичні культури другого покоління потребують менше ресурсів, виробляють більше енергії на базі аграрної маси, знижуються викиди парникових газів і не конкурують за орні землі для виробництва продуктів харчування [7].

До повномасштабного вторгнення російської федерації в Україні діяло кілька підприємств, що займалися вирощуванням енергетичних культур на комерційній основі, низка інших хотіли найближчим часом до них приєднатися. Компанія «Phytofuels» культивувала в Полтавській області на площі понад 35 тис. га культури, такі як просо прутоподібне, міскантус, сорго цукрове та інші. Для консультування по наукових питаннях компанія співпрацює з Університетом Вагенінгена (Нідерланди) та Інститутом біомаси та сталого розвитку (м. Полтава). В Дніпропетровській області агрохолдингом «KSG Agro» на площі 33 га земель закладено маточні плантації міскантусу, а у 2014 р. висаджено ще 400 га міскантусу, а ще через рік площа під цією культурою досягнула більше 2000 га, одночасно тут удосконалювали індустріальну переробку біомаси міскантусу. У західному регіоні, а переусім у Волинській та Львівській областях розташовані плантації енергетичної верби компанія «SalicsEnergy» [202].

У 1995 році в ЄС площі культивування міскантусу гігантського були на рівні 170 га, а через три роки тільки в умовах Швеції в 1998 році площа зросла до 300 га. В 2011 році у Великобританії площа під цією культурою становила 11 тис. га, Франції 3 тис. га, Німеччині та Ірландії по 2 тис. га, Австрії 850 га, Швеції 450 га. Сьогодні у відповідності до вимог єдиної аграрної політики в ЄС усі сільгоспвиробники, які обробляють понад 15 га земель зобов'язані 5 % з цих площ використовувати для культивування багаторічних енергетичних культур. При цьому використання мінеральних добрив та ЗЗР повинно бути зведеним до мінімуму, або взагалі не застосовуватись. Міскантус гігантський як жодна інша культура підходить для новостворюваних біоенергетичних плантацій [315; 322].

В Україні міскантус гігантський вперше почали культивувати в Житомирській і Харківській областях протягом 2006-2007 років, а також у Тернопільській області в 2008 році. Починаючи з 2013 року промислові плантації

міскантусу гігантського вже були в більшості регіонів України: Дніпропетровська – 400 га, Вінницька – 200 га, Черкаська та Полтавська по 170 га, Житомирська – 35 га, Закарпатська – 30 га, Київська – 15 га, Львівська та Харківська по 10 га [188; 189; 214; 228; 279].

Просо прутоподібне було новою культурою для України ще десять років тому, хоча у Північній Америці, воно було відоме як трав'яна енергетична культура ще з кінця 80-х років [93]. Нині просо прутоподібне досліджується в різних ґрунтово-кліматичних регіонах України. Зокрема, експерименти проводяться у Національному ботанічному саду ім. М. М. Гришка [279], на Веселоподільській та Ялтушківській дослідних станціях [278], у Борщівському агротехнічному коледжі (Тернопільська область) [165], Львівській філії УкрНДІВП ім. Л. Погорілого [183], Полтавській державній аграрній академії [220] та в інших наукових установах.

Площі вирощування проса прутоподібного в Україні скоротилися з 88,1 тис. га у 2024 році до 76,3 тис. га у 2025-му, що становить зменшення на 13,4%. Миколаївська область лідирує за площами посівів проса, за нею йдуть Полтавська, Київська, Черкаська та Вінницька області.

Сорго сьогодні набуває все більшої популярності, а площі посіву під цією культурою зростають. За масштабами культивування воно посідає п'яте місце після кукурудзи, пшениці, ячменю та рису в світі. За останні п'ятидесятиріччя світові площі посіву сорго зросли до 61 %. Цю культуру культивують на площі >50 млн. га (16,6 % земель) у більше ніж 80 країн світу. З 2023 року провідними країнами з вирощування сорго стали Нігерія – 10,5 млн т, США – 10,0 млн т, Індія – 7,7 млн т, Мексика – 5,6 млн т, Судан – 4,3 млн т. До основних виробників також належали Китай із показником 2,4 млн т, Аргентина – 2,3 млн т, Австралія – 2,1 млн т та Бразилія – 1,8 млн т (рис. 1.1) [286].

Згідно з даними Міністерства аграрної політики та продовольства Україна входить до трійки світових лідерів по експорту сорго в світі. Основними імпортерами українського сорго виступають Китай, Іспанія та Італія. Крім того попередніми роками наша держава продавала його Ізраїлю та Туреччині.

Географічне положення України є більш сприятливим ніж у провідних виробників цієї культури, зокрема США, Індії, Мексики та Аргентини.

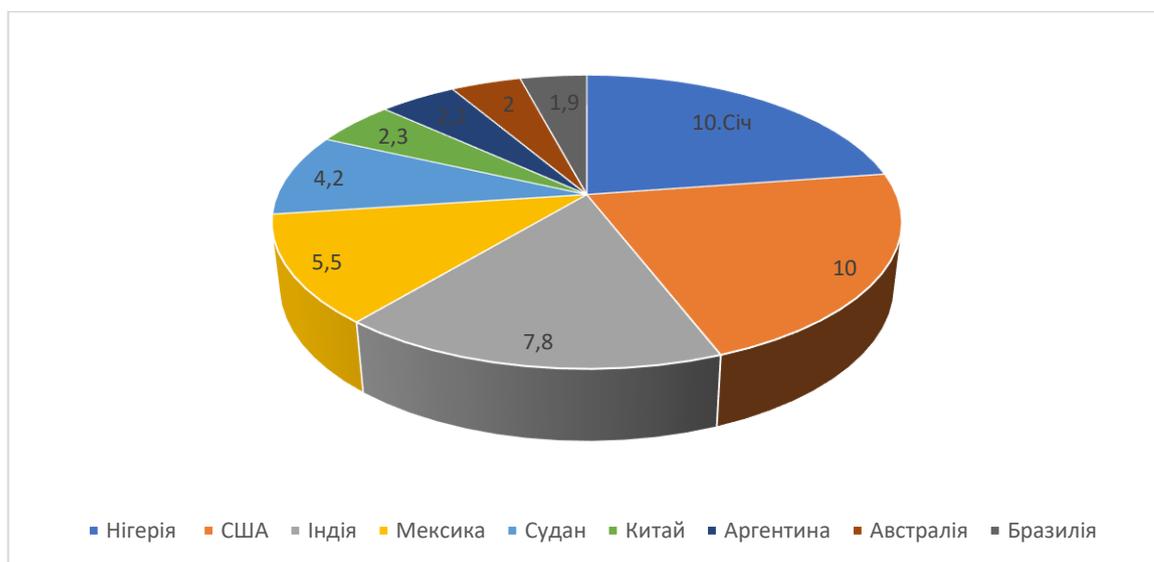


Рис. 1.1. Провідні виробники сорго в світі, млн т.

У 2022 році обсяги світового експорту зерна сорго становили 6,5 млн. т. Провідним експортером залишалися Сполучені Штати Америки, однак їхня частка у світовому експорті зменшилася порівняно з 2021 роком і склала 39% (табл. 1.1).

У Європі лідерами у виробництві сорго є кілька країн, серед яких Франція (52 %), Угорщина (33 %), Іспанія (10 %), Італія (5 %) загального виробництва [136]. Максимальні площі (136,9 тис. га.) зернового сорго в Україні спостерігались в 2012 році, але після того вони почали скорочуватися і на період 2018 – 2021 рр., площа посівів становила на рівні 41,7–47,2 тис. га. [128]. У 2022 році посівні площі під цією культурою склали 15,7 тис га, а це на 27,1 тис га менше порівняно з попереднім роком. Загальний збір по Україні – 40,31 тис т з середньою врожайністю 2,64 т/га, найбільші об'єми зосереджені в Кіровоградській області (8,17 тис т), Дніпропетровській (7,63 тис т) та Миколаївській (6,63 тис т) [302]. Близько 60 % світового виробництва кукурудзи з 600 млн. т припадає на США і Китай, а інші 40 % культивуються в країнах Європи, Африки, Латинської Америки та Південної Азії [47].

Таблиця 1.1

Світовий експорт-імпорт сорго за країнами у 2022 році [302]

Експорт			Імпорт		
Країна	Імпорт тис. т	Питома вага, %	Країна	Імпорт тис. т	Питома вага, %
США	2540	39	Китай	5000	80
Австралія	2300	35	Японія	250	4
Аргентина	1400	21	Мексика	200	3
Україна	70	1	Кенія	107	2
Індія	50	1	Судан	100	2
Інші країни	189	3	Інші країни	576	9

Джерело: <https://ipad.fas.usda.gov/cropeplorer/>

Наразі виробництво в країнах, які входять до ТОП-10 виробників кукурудзи оцінюється на такому рівні: США, Китай, Бразилія, ЄС, Аргентина, Індія, Україна, Мексика, ПАР та Канада (рис. 1.2).

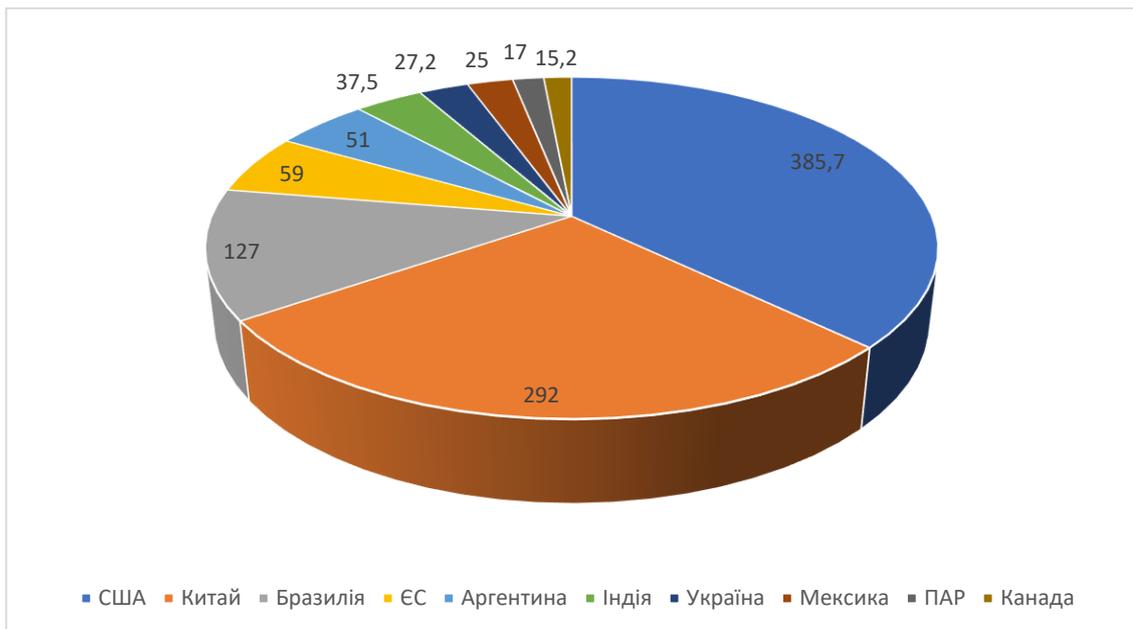


Рис. 1.2. ТОП-10 світових виробників кукурудзи, млн т

Площа культивування кукурудзи на зерно протягом 2020 року в Україні становила 5,39 млн. га [302]. Лідуючі позиції займали Полтавська – 541,8 тис. га, Кіровоградська – 368,3 тис. га та Черкаська області – 330,9 тис. га [90]. У 2022 році спостерігається зменшення посівних площ кукурудзи на 17 % до 4,267 млн га порівняно з 5,5 млн га у 2021 році, це пов'язане насамперед з військовою агресією росії, проблемами із ПММ, логістикою та ін. [110]. Посівні площі силосної кукурудзи в Україні є меншими порівняно з зерною. Так, у 2018 році вони становили 286 тис. га, у 2019 році – 258 тис. га, у 2020 році – 263 тис. га, а у 2021 році скоротилися до 214 тис. га [262; 302]. На сьогодні ключовими регіонами, де зосереджено вирощування кукурудзи, залишаються Вінницька, Черкаська, Полтавська, Кіровоградська та Тернопільська області (рис. 1.3) [154].

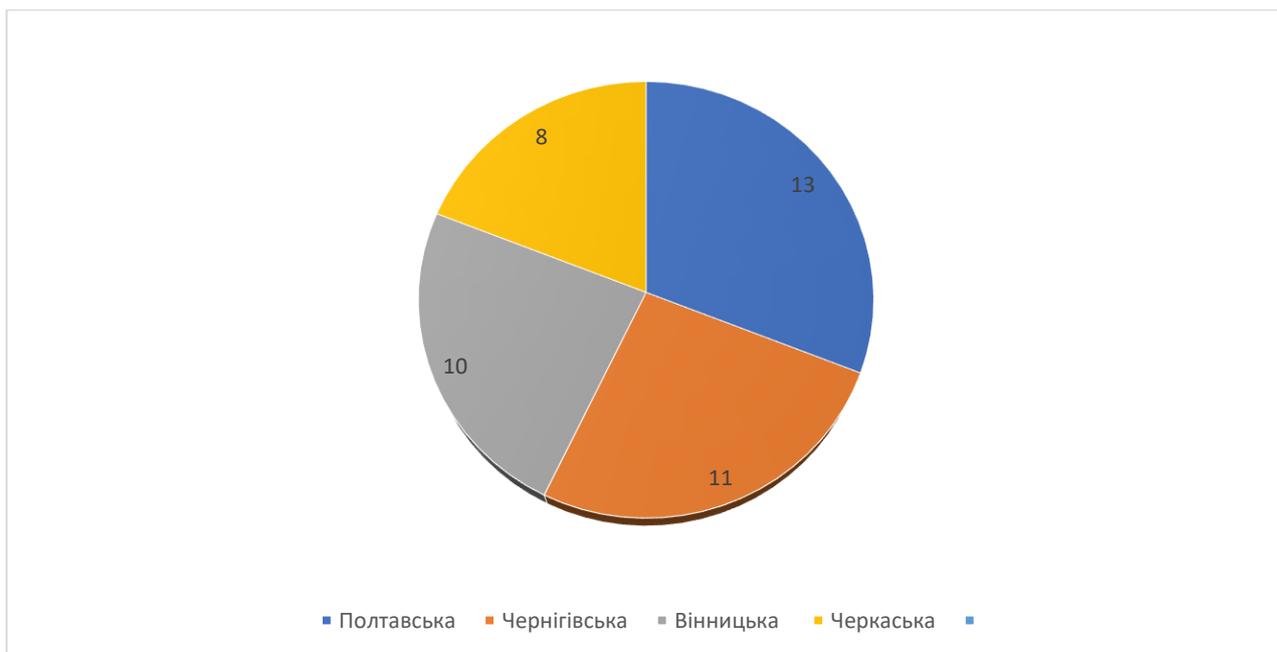


Рис. 1.3. Найбільші площі вирощування кукурудзи в Україні, тис. га

Упродовж останніх років в Україні площі під посівами кукурудзи зростають, зокрема в 2024 році вони становили більше 4,3 млн га, а загальний обсяг виробництва становить приблизно 28 млн тонн, з середньою врожайністю 6,5 т/га,

однак у регіонах із помірним або достатнім рівнем зволоження вона становила 10 – 12 т/га [159].

1.2. Агроекономічне та енергетичне значення біоенергетичних культур

Сьогодні енергетика як галузь виробництва розвивається дуже швидко, тому зниження антропогенного впливу її на навколишнє середовище є важливим [52; 137; 268]. З цієї причини використання поновлювальних джерел енергії на базі розвитку біоенергетики, яке ґрунтується на створенні електричної та теплової енергії з різних видів біопалива рослинного походження, має вагомі перспективи розвитку як в Україні так і регіонах. За дослідженнями М.І. Кулика процес виробництва та перетворення біомаси в різні форми енергії відбувається у три стадії: перший етап – вирощування і збирання біомаси енергетичних рослин, другий етап – трансформація біомаси в біопаливо, а на третьому етапі проходить виробництво енергії з подальшим постачанням споживачам [221]. Цю ідею підтримують Л.М. Пронько та Т.В. Колесник, підтверджуючи, що вагомим елементом біоенергетики є використання поновлювальних джерел енергії [274]. З огляду на це світова наукова спільнота розглядає застосування локальних альтернативних джерел енергії як один із перспективних напрямів подолання зростаючих проблем енергозабезпечення [273].

Згорання біопалива з біомаси енергетичних культур характеризується зниженими викидами вуглекислого газу, які є меншими за його поглинання під час фотосинтезу. При цьому кількість утвореного оксиду сірки зменшується у 20–30 разів, а кількість золи – у 3–4 рази порівняно з традиційним вугіллям. Побічним продуктом у процесі виробництва рідкого, газоподібного та при згоранні твердого біопалива утворюється біомаса, яку дозволено застосовувати в якості добрив [108]. Як зазначають С.М. Кухарець та Г.А. Голуб, застосування продуктів, отриманих із природних ресурсів, у виробничих та споживчих процесах супроводжується численними екологічними, економічними та соціальними наслідками [228].

Доведено, що вирощування енергетичних культур і їх застосування як сировини для виробництва біопалива в Україні становить сучасний і перспективний шлях розвитку підприємництва в галузі альтернативної енергетики. Зараз цей курс альтернативної енергетики у країні знаходиться на етапі розвитку. Більша частина регіонів нашої держави характеризуються сприятливими на кліматичні умови для культивування культур з високим ступенем акумуляції енергії біомаси при вегетації та можуть рости на малопродуктивних деградованих землях [15; 182; 244; 297].

Україна, за своїми природно-економічними факторами, відіграє важливу роль серед держав, що мають умови для забезпечення продовольчої й енергетичної безпеки. Вона володіє значним потенціалом виробництва стабільного ринку біоенергетичних рослин і використання їхньої сировини для біопаливної промисловості [227]. Приблизно 10 млн га земель аграрного призначення можна використовувати для культивування енергетичних рослин із наступною їх переробкою на біопаливо, заради енергетичної незалежності агропромислового комплексу нашої держави [157; 195].

Територіальне розподілення запасів енергетичних рослин в Україні є досить нерівномірним – від 9 тис. т у Закарпатській області до 736 тис. т у Житомирській. Найбільші потенційні запаси для вирощування та використання енергетичних культур (понад 400 тис. т) спостерігаються в Житомирській, Чернігівській, Київській, Одеській, Запорізькій та Херсонській областях [226].

Енергетичні культури являють собою трав'янисті рослини, чагарники та швидкоростучі дерева, біомаса яких придатна для виробництва різних видів біопалива – твердого, рідкого та газоподібного [33; 53; 220]. Рослини, які мають багаторічний ланцюг життя та можуть акумулювати вагому кількість біомаси впродовж періоду вегетації [201; 222; 267].

Серед біоенергетичних рослин на території України найбільш поширеними та дослідженими за ботаніко-біологічними властивостями та елементами технології культивування належать до родини Злакових, зокрема просо прутоподібне та міскантус гігантський, а також сорго та кукурудза [142; 221].

Міскантус – багаторічна високоврожайна культура, яка характеризується великою продуктивністю біомаси (до 30 т/га сухої речовини) та низькими вимогами до ґрунтово-кліматичних умов [21; 41]. Завдяки високій ефективності фотосинтезу та здатності зберігати вуглець у ґрунті, міскантус розглядається як одна з пріоритетних культур для виробництва твердого біопалива та етанолу в помірному кліматі [65]. Результати дослідження зарубіжних науковців [25; 92] довели важливість використання біомаси міскантуса та проса прутоподібного для виробництва енергії та волокна. Зокрема до їх переваг відносять: високий рівень виробництва чистої енергії з одиниці площі; низька собівартість та незначні потреби в поживних речовинах; невисокий вміст золи в сировині; ефективне використання вологи; широка географія розповсюдження; простота культивування; здатність адаптуватись до умов вирощування на малопродуктивних ґрунтах, а також властивість накопичення вуглецю в ґрунті [155; 313; 323].

Продукція міскантуса використовується у різних галузях народного господарства (біоенергетиці) в якості твердого палива, біоетанолу та пластмаси. Біомасу можна застосовувати в якості органічного добрива та сировину для виробництва целюлози й паперу [193; 314; 326]. Крім того, вона придатна для виготовлення будівельних і теплоізоляційних плит, легкого бетону, матеріалів для звукоізоляції, штукатурок, дверних і віконних рам та дахів [279]. Також надземна маса міскантуса гігантського, завдяки вологоутримуючій здатності, може використовуватись в якості підстилки для тварин і птиці [216; 327], як матеріал для лиття виробів під тиском з природних полімерів (горщики, нитки та волокна для автомобільних кузовних деталей), також декоративних цілей та озеленення ставків, клумб, садів), які за рахунок мікроорганізмів легко розкладаються в екосистемах [261; 279].

Міскантус характеризується важливою агротехнічною властивістю – здатністю стабілізувати важкі метали у прикореневій зоні ґрунту, при цьому рівень забруднення біомаси не перевищує гранично допустимих значень. Вкінці періоду вегетації в листках рослин спостерігався незначний вміст Со, проте його концентрація не перевищувала ГДК, а вже через три місяці, під час збирання

врожаю, біомаса цих домішок не містила [304]. Абсорбція окремих металів рослинами міскантусу залежала від природи металу та року вегетації [299]. Але, варто проводити перед садінням ризом підготовку ґрунту (внесення металостабілізаторів) для зменшення шансу акумулювання важких металів в біомасі культури та наступного їх викиду в довкілля при спалюванні [83]. Фітотехнологія з культивування міскантусу гігантського, біомаса якого може використовуватись для виробництва твердих видів біопалива (гранул або брикетів), є вагомою для очищення та покращення якості ґрунтів, які забруднені внаслідок військової діяльності [299; 304]. Також, рослини міскантусу гігантського мають здатність до біологічної фіксації азоту [95]. Міскантус також можна репрезентувати для фітореємедіації нафтозабруднених ґрунтів [149; 304].

Просо прутоподібне (свічграс) – багаторічна трав'яниста культура, що відзначається високою стійкістю до посухи та здатністю до природного поновлення, що знижує витрати на відновлення посівів [9; 74; 321]. Він ефективно використовується для виробництва біогазу та електроенергії через спалювання сухої біомаси або анаеробне зброджування [42; 317].

Структура біомаси культури посідає типову будову для біопаливної сировини, а це 50 % целюлози та 30 % лігніну та містить малий вміст золи (2–4 %). На відміну від соломи зернових рослин для біомаси свічграсу характерний невисокий вміст калію й натрію у поєднанні з підвищеною концентрацією кальцію і магнію, що забезпечує високу температуру згоряння та знижує ризик утворення шлаку під час спалювання в котлах. Собівартість культивування біомаси свічграсу в різних державах знаходиться у межах від 20 до 40 євро за тонну біомаси [23; 145].

Основним напрямом використання свічграсу є виробництво електроенергії через газифікацію, спільне спалювання на вугільних теплоелектростанціях, виробництво етанолу як палива та виготовлення паливних гранул [223]. На сьогодні свічграс вивчається як біопаливна сировина з вироблення теплової енергії, виробництво целюлози при створенні паперу, посилення волокном для пластмасових композитів та інших продуктів [57]. Ця культура має запас для акумулювання вуглецю [63]. Відновлення елементів живлення в ґрунті, очищення

забруднених водостоків та середовища та створення пасовищ [58; 97]. Порівняно з міскантусом гігантським просо прутоподібне є менш продуктивне, його перевагою є посухостійкість. Ця особливість ідеально підійде для культивування в умовах зміни клімату [91; 214]. Зелена маса свічграсу годиться для годівлі тварин, а також для збереження та відновлення ґрунтів [92; 248].

Сорго цукрове – однорічна культура з високим потенціалом біомаси та швидким ростом, яка може досягати продуктивності до 25–30 т/га [1; 3; 144; 147; 208]. Ця культура має високу адаптивність до різних ґрунтово-кліматичних умов, а також здатність акумулювати цукри та крохмаль у стеблах, що робить її ефективною для виробництва рідкого біопалива (біоетанолу). З 1 га цукрового сорго можна отримати до 100 т зеленої маси, з якої вийде 40–50 т соку (з концентрацією цукру 12–16 %) та 25–30 т сухої речовини (бегасу). Цей сік використовують для одержання екологічного палива (біоетанолу), питного соку в чистому виді або разом з фруктово-ягідними [40; 68; 82; 84; 317]. А також для виготовлення продуктового цукрового сиропу, оцту, лимонної кислоти, харчового спирту, парфумерії та медицини, кормових дріжджів, вітамінів, фарбників тощо. Віджату зелену масу використовують для виробництва комбікормів, брикетів паливно-енергетичних, паперу, картону, будівельних матеріалів (ДСП, ДВП) та туків. До того ж з 1 га посіву сорго цукрового за вегетацію засвоюється до 55 т вуглекислого газу, виділяючи в повітря приблизно 40 т кисню, в той час як хвойний ліс за рік виділяє з 1 га 30 т кисню, а широколистяний ліс близько 16 т [88; 325]. Сорго також вважають страховою культурою (через погану перезимівлю озимих або посуха), що сприяє збільшенню площі посівів [8; 89].

Кукурудза звичайна – традиційна сільськогосподарська культура, широко використовується як джерело цукристої біомаси для виробництва етанолу [141]. Основними перевагами кукурудзи є високий вихід сухої речовини та можливість подвійного використання: для харчових та енергетичних потреб. Одним із запасів енергонезалежності є виробництво із зерна кукурудзи біоетанолу, причому завдяки переробці 10 млн. т зерна кукурудзи можна отримувати близько 4 млн. т біопалива. За останні півстоліття площі під кукурудзою збільшились в 1,6 рази,

продуктивність – 3 рази, а валові збори – 4,8 рази [235; 259; 301]. Важливі властивості кукурудзи потребують високого попиту на ринку [160; 178; 320].

Зерно кукурудзи застосовується у продовольчих цілях на 20 %, у технічних – на 15–20 %, а для кормових потреб використовується 60–65 % виробленої продукції. Завдяки високому вмісту енергії – 1,34 кормових одиниць та 78 г перетравного протеїну на кілограм зерна кукурудзи переважає такі культури як овес, ячмінь та жито [2; 28].

Розвиток сучасних адаптивних технологій культивування та переробки кукурудзи на біопаливо на сьогодні вважається стратегічно необхідною складовою забезпечення енергонезалежності [10; 96; 98; 156; 157; 257; 260].

Використання біоенергетичних культур сприяє енергетичній незалежності держави, зменшуючи залежність від імпортного викопного палива та знижуючи викиди парникових газів. Більше того, розвиток виробництва біомаси стимулює локальну економіку, створює робочі місця у сільській місцевості та підвищує ефективність використання земельних ресурсів. Таким чином, систематичне вирощування міскантусу, свічграсу, сорго та кукурудзи дозволяє забезпечити стабільне виробництво біопалива та енергетичну безпеку на національному рівні.

1.3. Біолого-ботанічна характеристика біоенергетичних культур

Біоенергетичні культури походять з Японії, Південних Курильських островів, Маньчжурії, Таїланду, Кореї, Полінезії та східного узбережжя США. Вони зустрічаються як у природі так і культивуються в фермерських господарствах Південно-Східної Азії та Центральній частині Сполучених Штатів Америки. Найбільше поширеним є *Miscanthus giganteus* G., який характеризується швидким ростом, розвитком й високою якістю. В природньому середовищі ці рослини високорослі до 6 м, діаметр стебел до 6 см, а період вегетації близько 30 років [278].

Miscanthus відноситься до відділу покритонасінних (Angiospermae), класу однодольних (Monocotyledoneae), ряду Glumifloreae, родини злакових (Gramineae), роду *Miscanthus* Anderss, вид – *Miscanthus giganteus* Greef et Deu. Це одна з

небагатьох культур, що має механізм фотосинтезу C₄, і можна її культивувати в умовах клімату Європи Східної та Центральної [49; 165; 166; 311]. У біоенергетиці використовується *Miscanthus giganteus* G., це стерильний міжвидовий гібрид, який одержаний шляхом гібридизації *Miscanthus sinensis* та *Miscanthus sacchariflorus* [41]. Як і всі хліби другої групи є типовим представником рослин C₄ типу фотосинтезу [51; 279].

Міскантус гігантський – багаторічна трав'яниста рослина, в якій добре розвинена потужна коренева система, що сягає до 2,5 метра вглиб ґрунту. Перед появою сходів маса коренів становить близько 15–26 т/га сухої маси. Стебло – міцне, яке має волоски або без них, з вузлами, забарвлення однорідне, відзначається витривалістю до механічних пошкоджень, завдяки високому вмісту лігніну і целюлози [171; 311]. Рослини першого року досягають до 2 м, другого – 3,5 м, і в подальшому до 4,5 м. Листки подовжені, сплюсноті та ланцетоподібної форми, не мають поперечного жилкування, довжина їх становить 60–100 см, ширина 0,8–3,2 см. Вони розміщені поодинокі по всій довжині стебла і мають яскраво- або темно-зелене забарвлення. На рослині листя утримується довго протягом зимового періоду. Суцвіття представлене волоттю, або колосоподібною волоттю, слабо розвиненою, яка може тривалий час зберігатися на рослині. Велика кількість з них не квітне та не утворює насіння. Якщо внаслідок холодних зим рослини не вступають у стан спокою, то можуть цвісти в період вересень – листопад [278]. Вік продуктивного життя плантації досягає до 15–20 років. Він не потребує багато добрив, толерантний до ґрунтової ерозії та деградації, тому його можна вирощувати на малопродуктивних землях, піщаних і супіщаних ґрунтах, а також на схилах крутизною до 7° [22, 226; 281; 287]. Водночас міскантус погано переносить високий рівень ґрунтових вод, високу кислотність та вміст глини в ґрунті більше як 64 % [20; 85; 238].

Міскантус гігантський характеризується як холодовитривала та теплолюбива культура, її ріст проходить при температурі повітря 25 °С і більше. На другий та наступні роки вегетації рослини переносять морози до мінус 15–18 °С без снігу, а при сніговому покриві до мінус 25–0 °С, а також витримувати жару до +35 °С. В

умовах зміни клімату культура починає свій ріст з квітня, при температурі ґрунту 10...12 °С, а завершує вегетаційний період з настанням приморозків. Весняні приморозки можуть призводити до деяких втрат насаджень міскантусу, однак, завдяки високій регенераційній здатності, ці збитки менші [188; 189; 203; 281; 291].

У міскантуса гігантського вимоги до вологи вищі порівняно з іншими рослинами та вимагають приблизно 700 мм опадів, це спричинено формуванням великої кількості біомаси з одиниці площі. Рослинам міскантусу притаманна висока ефективність використання води, яка потрібна на формування біомаси, його коріння проникає глибоко в ґрунт і підтягує запаси вологи з нижніх горизонтів [188; 291; 315]. При нестачі вологи листки в'януть та відмирають, а це призводить до втрат біомаси [73; 279]. Дефіцит ґрунтової вологи з одночасним підвищенням температури повітря негативно позначається на продуктивності рослин [49; 256]. Культивування міскантусу у посушливих регіонах на ділянках більш 25 % від валового обсягу земель може привести до виснаження водного режиму ґрунту [115].

Міскантус гігантський відноситься до світлолюбивих рослин та в вегетаційний період потребує більше сонячної енергії відносно інших культур родини злакових. Інтенсивне сонячне випромінювання забезпечує утворення найкращої площі листкової поверхні, а також сприяє накопиченню великої кількості органічної речовини. При нестачі освітлення знижується інтенсивність фотосинтезу та кількість асимілянтів, молоді пагони рослин жовтіють і витягуються [174; 279; 291]. Надмірно розвинений листовий апарат заважає освітленню всіх ярусів листків, тому з кінця липня відбувається старіння та відмирання нижніх [124; 277]. Своєрідну чутливість до освітлення виявляють рослини в перший рік вегетації [291].

Для росту та розвитку міскантусу потрібні добре дреновані ґрунти з кислотністю рН 6,5 – 7,5, за рН нижче 5,5 потрібно проводити вапнування [279; 291]. За результатами досліджень О.В. Зінченка, з урожаєм міскантусу 20 т/га сухої маси виноситься близько 60 кг азоту, 16 кг фосфору та 80 кг калію [188]. На накопичення біомаси позитивно впливає внесення до 90 кг/га азоту [175; 277].

Деякі дослідники рекомендують щорічно весною проводити підживлення рослин міскантусу у нормі 50 кг/га азоту [50; 217]. На стадії активної вегетації основні елементи живлення зосереджуються в листках і стеблах рослини, пізніше вони переміщуються до кореневища та там накопичуються. На весні при відновленні процесу вегетації ці елементи можуть бути використані рослинами міскантусу [50; 290].

Просо прутувидне (*Panicum virgatum* L.) – багаторічна злакова культура, яка походить з Північної Америки, належить до родини Poaceae та інтродукована в Україні з 2000 року [31; 165; 239; 240; 278; 282]. Як і міскантус гігантський просо прутоподібне відноситься до культур С4-фотосинтетичного типу та дають високу врожайність як у помірних так і субтропічних умовах [74]. Має потужну кореневу систему до 2 м, яка накопичує вуглець в ґрунті та спроможна видержувати незначні затоплення та стійка до посухи. Висота сягає до 3,0 м, але змінюється в залежності від сорту, має гладке стебло та листки довжиною до 20 см і більше. На рослині має до 35 шт продуктивних пагонів на рослині, суцвіття – волоть розлогої форми та колосками, які розташовані на кінці гілок різного порядку. Плід – однонасінна дрібна зернівка, насіння має високу тривалість стану спокою від досягання та збирання до сівби та проростання насіння [182]. Через це насіння після збирання має низьку енергію проростання і схожість [177; 255], тому якість насіння неможливо виміряти сучасними методами, які ґрунтуються на швидкості проростання [37; 240]. Слід зауважити, що *Panicum virgatum* L. розмножується насінням та поділом куща (кореневищем) [217; 218]. Період вегетації становить від 120 до 150 днів. Просо прутувидне це базова культура для виготовлення целюлозного біоетанолу, завдяки високому вмісту целюлози та низькому лігніну [97; 251; 252].

Культура є досить вимогливою до вологи, тому кількість опадів суттєво впливає на її урожайність протягом усього періоду вегетації. Рослини світчграсу дуже економно витрачають воду та характеризуються високою посухостійкістю, коефіцієнт транспірації становить 250 [169]. Його можна вирощувати на деградованих та малопродуктивних землях, оскільки культура невибаглива до

грунтових умов і не створює конкуренції іншим культурам у сівозмінах. Просо прутувидне можна вирощувати на одному місці до 15 років з повільним, самостійним виродженням культури. Дослідженнями українських вчених [171; 217] встановлено, що світчграс придатний активно адсорбувати з ґрунту важкі метали та нагромаджувати їх в надземній і підземній частинах. Тому, плантації за вирощування проса прутувидного здатні покращити ґрунти органічною речовиною, а також брати участь у процесі фітореMediaції (найефективніший метод дезактивації).

Українські дослідники займаються вивченням ботаніко-біологічних властивостей світчграсу [219], а також розробляють елементи технології його вирощування та визначають послідовність отримання біопалива із фітомаси рослин [176; 215; 227; 239; 248; 265].

В Україні інтродукцію проса прутувидного розпочали за сівби сортів Картадж і Кейв-ін-рок, які мають американське походження [134; 325]. 2015 року Інститутом біоенергетичних культур і цукрових буряків створено сорт Морозко, а 2018 року сорт Лядовський. Дослідниками Національного ботанічного саду ім. М. М. Гришка НАН України виведено сорт Зоряне. Ці сорти занесені до Державного Реєстру сортів рослин України [72]. Щодо агротехніки культивування світчграсу в умовах України проводяться численні дослідження [72; 134].

Сорго цукрове (*Sorghum bicolor* var. *saccharatum*) відноситься до роду *Sorghum* (L.) Moench. родини тонконогових – Poaceae та має в стеблах до 20% розчинних цукрів [35; 179]. Специфічну властивість сорго має сік стебел, в вмісті якого є вуглеводи від 10 до 20%, які в свою чергу складаються із цукрози (60–80%), фруктози та глюкози (20–40% відповідно). Тому його можна використовувати як сировину для виробництва біоетанолу і харчового сиропу, а також після віджиму суху масу стебел – для переробки на біогаз або виготовлення твердих видів палива [43; 167]. Період вегетації у сорго цукрового триває близько 90–115 днів [153; 207].

Сорго – високоросла прямостояча рослина висотою до 3,0–4,0 метрів, яка має гладку поверхню стебла вкриту восковим нальотом бурштиново-зеленого кольору. Воно добре кущитьєся, тобто одна рослина має два-три стебла залежно від сорту,

умов навколишнього середовища та агротехніки вирощування [190; 283]. Головне стебло та всі бічні пагони вгорі закінчуються волоттю довжиною 40–45 см. Листки сорго зеленого забарвлення, довгі, середньої ширини, довголанцетної форми, довжиною 60–80 см і завширшки 3–5 см. На одній рослині їх формується від 18 до 26 штук. Насіння видовжене, коричневого та чорного забарвлення, складається з навколоплідника, сім'янки, ендосперму, зародка, який розташований між перикарпієм і ендоспермом [309]. Зернівка має округлу, сплюснуту форму. В зерні рослини присутній пігментований (чорний, червоний, жовтий, коричневий) та непігментований (білий) перикарпій [29; 30]. Має потужну кореневу систему, яка проникає на глибину від 2,0 до 2,5 метри, а в посушливих умовах може розвивати вторинне коріння та ефективно засвоювати вологу з глибших шарів ґрунту [86]. Окрім того, сорго характеризується високим потенціалом водозбереження завдяки здатності накопичувати воду в листках і стеблах [34; 128]. Рослина підходить для культивування на малородючих та засушливих землях. Важливою господарською властивістю сорго є його здатність до швидкого відростання після скошування, що забезпечує можливість отримання кількох урожаїв за сезон у південних регіонах [122]. Сорго є світлолюбною культурою короткого дня, що зумовлено його адаптацією до умов високого сонцестояння та потребою у значній кількості короткохвильової сонячної радіації [26; 242].

Сорго цукрове – це теплолюбна рослина, мінімальна температура для проростання насіння становить від 9 до 10 °С, при нижчій температурі ґрунту насіння не проростає, пліснявіє та гине [247; 253]. Також воно має ще одну унікальну особливість, це здатність в несприятливих умовах (посуха), «завмирати» та зупиняти ростові процеси, і навпаки «оживати» при їх покращенні [132; 191; 231; 232].

Сорго відзначається високою стійкістю до хвороб та шкідників, що зменшує його вразливість до кліматичних коливань і забезпечує стабільну продуктивність. Крім того, зерно сорго характеризується високою енергетичною цінністю, що дозволяє його використовувати як у кормовиробництві, так і для виробництва біопалива та інших промислових продуктів [306; 311].

Кукурудза звичайна (*Zea mays* L.) – однорічна злакова культура, яка відноситься до родини Тонконогові (Poaceae), має високу пластичність, продуктивність та швидкий ріст. Коренева система добре розвинена, потужне стебло, велике листя та складні суцвіття, а це забезпечує високу врожайність [185; 265]. Вона є джерелом корму, зерна і силосу, проте останнім часом завдяки високому рівню виходу біомаси та доступності технології переробки її на біогаз і біоетанол її розглядають як продуктивну енергетичну культуру [102; 229]. Завдяки швидкому акумулюванню біомаси кукурудза є однією з найбільш економічно вигідних сировинних культур для виробництва біоенергії в Україні [79]. За біологічними ознаками кукурудза різниться від розповсюджених зернових культур, так як належить до рослин C4 типу фотосинтезу, а це сприяє накопиченню біомаси [12].

Висота кукурудзи становить 1,5–3,5 метра в залежно від сорту та умов культивування. Стебло кукурудзи пряме, у ранньостиглих гібридів висота становить від 70 см, а у пізньостиглих гібридів до 4–5 метрів. На стеблі закладається 8–40 міжвузлів [189]. Стебло забезпечує механічну міцність та транспортування елементів живлення. Листки розташовані почергово, мають лінійно-ланцетну форму та виражену жилкувату структуру. Їх кількість становить 8–35 штук та залежить від сорту або гібриду. Листя виконують функцію фотосинтезу, випаровування вологи та регулювання газообміну [189]. Плід – зернівка, яка має оболонку, ендосперму та зародок. Вона має різне забарвлення: біле, кремове, жовте та червоне та визначається групою та гібридом. Качан формує від 200 до 1000 зерен, вміст в зерні крохмалю – 60–75 %, білка – 8–12 %, жиру – 3–6 % [107].

За морфологічною будовою та біологічними ознаками кукурудза різниться від інших культур родини Poaceae. Однією з відмін є те, що на одній рослині формуються окремо чоловічі суцвіття (волоті) та жіночі (качани), і потужний розвиток вегетативних органів (стебел, листків й кореневої системи) [265]. Коренева система добре розвинена (проникає на глибину до 2,0–2,5 м та в ширину – до 1 м), мичкувата і складається з головного, вузлових (опорних), бокових і

додаткових коренів. Опорні корені надають рослині стійкості завдяки тому, що формуються у верхніх міжвузлях [12]. Культура вимоглива до тепла, вологи та родючості ґрунту. Кукурудза – теплолюбна культура протягом періоду вегетації, їй необхідна сума активних температур (вище +10 °С) 1700 – 3120 °С, це залежить від гібриду та умов культивування, а за різкого похолодання виникають фізіологічні порушення, які негативно впливають на ріст і розвиток [160; 161].

Кукурудза це світлолюбна рослина короткого дня, добре реагує на інтенсивне освітлення, найбільше в перші періоди вегетації, коли рослини ростуть і формують вегетативну масу. Надмірно короткий або довгий світловий день може негативно впливати на ріст і розвиток рослин, а також час цвітіння [103]. Кукурудза є вимогливою до родючості ґрунту та поживних речовин, так як продуктивність залежить від макро- та мікроелементів. Культура генерує потужну біомасу та високу врожайність зерна, а це потребує вагомих запасів поживних речовин у ґрунті та внесення добрив.

1.4. Вплив добрив та біопрепаратів на продуктивність енергетичних культур

Мінеральні добрива – одні з головних складових живлення рослин та поживного режиму ґрунту. На них у виробництві аграрної продукції припадає близько 50 % загальної продуктивності [158]. Провідна роль поміж мінеральних добрив припадає на азотні, проте використання підвищених їх доз призводить до забруднення довкілля нітратами та нітритами, а також їх акумулювання у рослинницькій продукції. Тому за дослідженнями українсько-німецьких учених забруднення довкілля сільським господарством становить 20 % [300]. Відповідно розумне застосування добрив, а найбільше азотних, є дуже актуальним. Під енергетичні культури, рекомендовані оптимальні дози внесення добрив, які дають можливість отримувати чисту продукцію і виключають забруднення за збалансованого їх внесення [218]. Фосфор та азот це важливі елементи живлення коренів. Внесення фосфорних добрив позитивно впливають на ріст рослин,

допомагає їх дозріванню, пом'якшує дію засухи, а також збільшує стійкість до низьких температур та хвороб, врівноважує дію азотних добрив [312]. Найпоширенішими є комплексні мінеральні добрива [263].

На початку 21 століття застосування органічних добрив, зокрема гною, різко скоротилося через значне зменшення поголів'я великої рогатої худоби, яке практично зведене до мінімуму. З підвищенням цін на мінеральні добрива різко зменшилося їх внесення. У результаті чого в Західному регіоні України позначилися стійкі тенденції до зниження родючості дерново-підзолистого ґрунту, і як результат зменшення врожайності культур [72]. Зараз науковці досліджують та вдосконалюють технологію культивування енергетичних культур. Тому поряд з обґрунтованою технологією вирощування цих культур недостатньо вивченим питанням залишається екологічні аспекти вирощування енергетичних рослин на дерново-підзолистому ґрунті.

Розробці прийомів зростання виробництва біомаси міскантусу із використанням елементів біологізації технології культивування в Україні чимало уваги приділяли: М.В. Роїк, В.Л. Курило, Д.Б. Рахметов, В.А. Доронін, М.Я. Гументик, О.М. Ганженко та інші вчені [148; 168; 173; 227; 279; 315].

Істотними чинниками, які визначають продуктивність міскантусу гігантського, є біометричні показники рослин. Це підтверджується результатами досліджень М.Я. Гументика та інших науковців [168], в яких розкрито, що мінливість кількісних ознак пов'язана як із удобренням, так і кліматичними умовами періоду вегетації. Інші науковці визначили, про отримання урожайності біомаси міскантусу гігантського на рівні 12–16 т/га (до 25,0 т/га), однак при цьому варто додержуватися всіх вимог до технології вирощування [17]. В іншому колективному науковому дослідженні окреслено специфіку агротехнології вирощування, збирання та подальшої переробки біомаси міскантусу в умовах України [272].

Іноземними авторами означено вимоги рослин окремих генотипів світчґрасу в макроелементах для застосовування на біопаливо [93]. А.Ф. Turnhollow та інші науковці дослідили, що для вирощування біомаси світчґрасу потрібно вносити

50 кг/га азоту [111]. На територіях з кількістю опадів від 450 до 750 мм на рік потрібно вносити від 50 до 100 кг/га [119]. К. Vogel розрахував, що для укорінених посівів, норма внесення азотних добрив повинна бути еквівалентна коефіцієнту отримання врожаю, тобто від 6 до 10 кг/т сухої речовини для осіннього та 4–8 кг/т весняного врожаю [116]. Одночасно R.A. Samson встановив, що вирощування світчграсу на малородючих ґрунтах вимагає підвищення норми внесення азоту приблизно на 25 % [92]. Результати дослідження вітчизняних вчених по вивченню впливу агрозаходів на продуктивність світчграсу в Лісостепу України свідчать, що кращими варіантами є ті, де проводилось весняне підживлення дозою N 30–45 кг/га. Застосування зменшених або підвищених норм азоту не забезпечувало істотного зростання врожайності. Одночасно на варіантах ефект від застосування норм N₄₅ і N₆₀ не зафіксовано [218].

Добрива мають різну дію на рослини сорго цукрового залежно від ґрунтово-кліматичних умов, тому варто зважено підходити до вибору добрив, їх норми та термінів внесення, щоб не знизити врожайність культури і отримати якісний цукровмісний продукт з найбільшим виходом біопалива [62].

Більшість ґрунтів, де вирощують сорго цукрове, можуть забезпечувати тільки на половину поживними речовинами, тому решту потрібно поповнювати за рахунок добрив. За даними агрохімічного аналізу ґрунту та рівнем врожайності можна визначити загальну дозу добрив та їх поділ на основне удобрення і позакореневе підживлення [205; 318].

За неоднакових ґрунтових і кліматичних умов та залежно від сорту спостерігається неоднакова реакція на добрива сорго цукрового [87; 112]. Доведено, що азотні добрива сприяють зростанню вмісту сахарози, а також активізують ріст та розвиток сорго цукрового [109]. Застосування комплексних азотно-калійних добрив підвищує врожайність культури на 15–17% порівняно з окремим внесенням азотних та калійних добрив [81].

Дослідженнями іранських вчених встановлено, що внесення азотних добрив впливає на формування площі листової поверхні, накопичення сухої маси та їх

окремих органів, а також на елементи структури врожаю, на різних фазах розвитку сорго цукрового [5].

Дослідженнями О.О. Марчук доведено, що внесення мінеральних добрив у нормі $N_{160}P_{160}K_{160}$ сприяло інтенсивній акумуляції в рослинах сорго цукрового сухої речовини, а саме: у сорту Фаворит від 54,7 до 114,5 т/га, сорту Нектарний від 42,4 до 103,1 т/га та гібриду Медовий від 41,2 до 93,3 т/га. На цьому варіанті був отриманий найбільший показник розрахункового виходу біоетанолу та становив від 1,89 до 5,38 т/га у сорту Фаворит та від 1,53 до 4,83 т/га гібриду Медовий [242; 269].

Для росту й розвитку сорго цукрового, крім макроелементів (азот, фосфор та калій), необхідні також мікроелементи (мідь, залізо, молібден, цинк, магній, бор, сірка та інші). Вони активно залучені до всіх фізіологічних процесів рослин та підвищують активність ферментів у їхньому організмі та сприяють засвоєнню поживних речовин з ґрунту [279; 319].

За даними досліджень М.О. Бойка у Лісостеповій зоні України середня рекомендована норма внесення добрив становить $N_{60}P_{60}K_{60}$ [132]. Встановлено, що застосування азотно-фосфорних добрив позитивно впливає на проростання насіння, підвищуючи польову схожість на 10–12 % [45]. Добрива не тільки збільшують урожайність, але й покращують якісні показники (вміст протеїну, жиру, сухої речовини та кормових одиниць) культури [62]. Аналіз літературних джерел [112; 196] показує, що питання особливостей технології вирощування сорго цукрового залежно від поживних елементів і вплив добрив на вихід біогазу недостатньо вивчені.

Продуктивність кукурудзи в більшій мірі залежить від забезпечення макроелементами при проходженні вегетації рослин [204]. Кукурудза позитивно реагує на позакореневе підживлення на ранніх етапах росту і розвитку азотними та азотно-фосфорними добривами [19; 158]. В залежності від гідротермічних особливостей та рівня мінерального живлення рослин кукурудзи змінюється як тривалість окремих міжфазних періодів, так і тривалість періоду вегетації кукурудзи загалом [159; 241]. Використання добрив сприяє зростанню стійкості

рослин до низьких температур, додає частку качанів та збільшує вихід сухої речовини з площі посіву [158; 160; 161].

На сьогодні перед аграріями в Україні стоїть завдання підвищення продуктивності кукурудзи на зерно та силос для агропромислового комплексу та відновлювальної енергетики [194; 213]. Застосування у посівах кукурудзи мікроелементних препаратів сприяє регулюванню ростових процесів, підвищенню стійкості культури до несприятливих умов, а також забезпечує зростання рівня врожайності та покращення якості продукції [99; 245; 246; 308].

Зараз створено велику кількість препаратів на основі гуматів, що знайшли своє застосування в рослинництві [230; 324]. Гумінові (гумусові) речовини – це специфічна група органічних сполук, що утворюються внаслідок біохімічного розкладання рослинних решток за участю мікроорганізмів і тваринних організмів [16, 36; 69; 70; 71]. Матеріалом для виготовлення гумінових препаратів може бути торф, сапропель та буре вугілля [44; 210].

Так як у ході виробництва разом з гуміновими кислотами використовуються і фульвові, тому гуматами називають суміш солей гумінових та фульвових кислот [18, 210]. При використанні гуматів у рослинах завдяки зростанню пропускних можливостей мембран клітин прискорюється обмін речовин [75; 76; 113; 133]. Гумати, які в своїй основі мають натрій і калій, врівноважують дію на рослину важких металів та пестицидів [56], вони комплексно діють на рослину, збільшують ефективність у посушливих умовах, зміцнюють імунітет та збільшують урожайність [38; 39]. Вченими доведено, що гумати є господарсько продуктивними матеріалами через підвищення продуктивності культур без екологічних наслідків [64].

1.5. Вплив кліматичних змін на продуктивність енергетичних культур

Енергетичні культури займають важливе місце у системі альтернативної енергетики. В умовах глобальних кліматичних змін і необхідності зменшення енергетичної залежності від викопного палива в Україні, зокрема в Західному

регіоні, спостерігається активне впровадження біоенергетичних технологій. Кліматичні умови Передкарпаття, що характеризуються достатнім рівнем атмосферного зволоження, є сприятливими для вирощування як багаторічних, так і однорічних енергетичних культур. Водночас значні площі деградованих і малопродуктивних земель у передгірних районах можуть бути ефективно залучені під енергетичні насадження, що сприятиме покращенню агроекологічного стану ґрунтів та уповільненню процесів їх деградації [130; 293].

Традиційно аграрне виробництво Передкарпаття було зосереджене на вирощуванні харчових і технічних культур. Починаючи з 2000-х років, у регіоні розпочалося впровадження енергетичних культур у межах науково-дослідних та демонстраційних проєктів. Серед перших культур, що набули поширення, були енергетична верба (*Salix viminalis*) та міскантус (*Miscanthus giganteus*), що зумовлено їхньою високою продуктивністю та невибагливістю до умов вирощування, зокрема на дерново-підзолистих ґрунтах. Серед однорічних біоенергетичних культур перспективними вважаються сорго цукрове та кукурудза звичайна, які характеризуються відносно низькими вимогами до ґрунтово-кліматичних умов і можуть успішно вирощуватися на малопродуктивних землях. Тривале безперервне культивування таких культур сприяє поліпшенню агрофізичних властивостей ґрунту, а надходження до нього рослинних решток, зокрема листя та кореневої маси, позитивно впливає на підвищення його родючості [293].

Зміни клімату, зокрема підвищення середньорічної температури, нерівномірний розподіл опадів та частота екстремальних погодних явищ (посухи, сильні дощі, заморозки), суттєво впливають на продуктивність сільськогосподарських культур у Західному регіоні України. Біоенергетичні культури, які культивуються для отримання біомаси, мають різну адаптивність до цих змін, що визначає їх потенціал врожайності та енергетичну ефективність вирощування (рис.1.4). Аналіз даних свідчить, що найвищий енергетичний потенціал має міскантус гігантський – близько 370 ГДж/га, що зумовлено високою продуктивністю сухої біомаси та значною теплотворною здатністю. Друге місце за

цим показником займає просо трутоподібне, енергетичний потенціал якого становить приблизно 300 ГДж/га, що підтверджує його доцільність як перспективної багаторічної біоенергетичної культури для умов регіону.

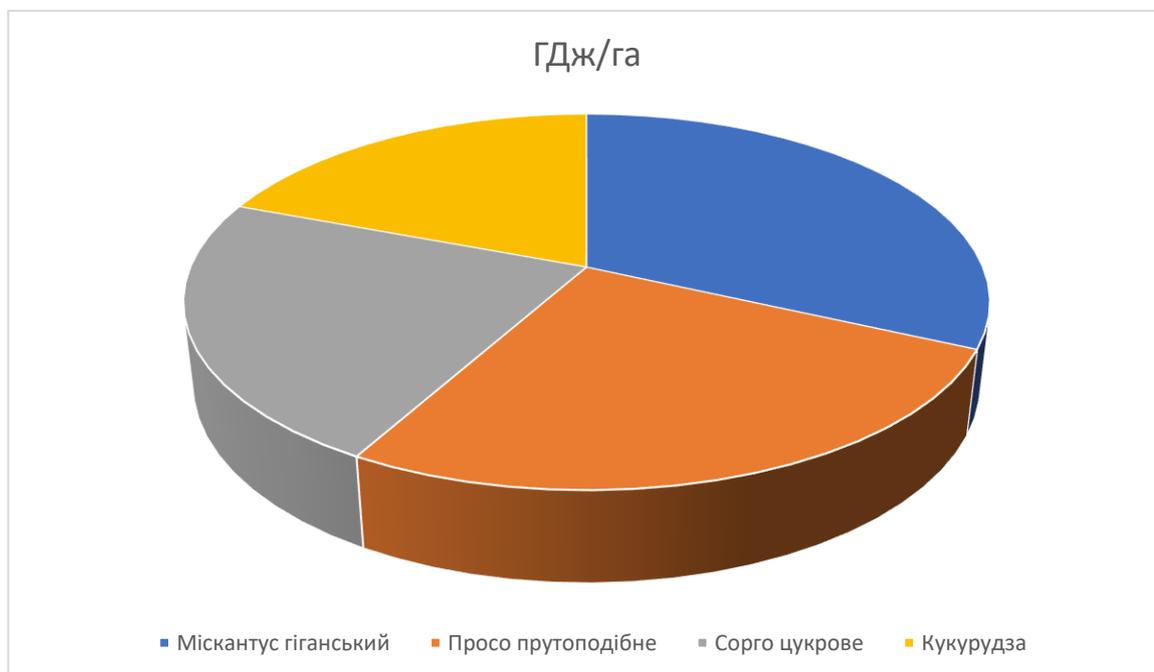


Рис. 1.4. Прогнозний енергетичний потенціал біоенергетичних культур

Дещо нижчі значення зафіксовано для сорго цукрового – близько 260 ГДж/га, що пояснюється його однорічним характером вирощування та залежністю продуктивності від гідротермічних умов. Найменший енергетичний потенціал серед досліджуваних культур має кукурудза звичайна – орієнтовно 220 ГДж/га, що пов'язано з використанням переважно зерна та обмеженим залученням побічної продукції до енергетичного балансу.

Сорго цукрове (*Sorghum bicolor* L. Moench) є культурою, добре пристосованою до посушливих умов, завдяки С4-фотосинтезу, який забезпечує ефективне використання води. Проте підвищення температури понад оптимальні значення у критичні фази розвитку (цвітіння, формування зерна) може призводити до зниження врожайності та вмісту цукру у стеблі [93; 94].

Кукурудза звичайна (*Zea mays* L.), як традиційна енергетична культура, найбільш чутлива до змін температури та опадів. Збільшення частоти літніх посух і високих температур під час фаз цвітіння та наливу зерна призводить до значних втрат урожаю [67]. Використання адаптивних гібридів та оптимізація удобрення є ключовими заходами для збереження продуктивності культури в умовах змін клімату.

Таким чином, різні біоенергетичні культури демонструють неоднаковий рівень чутливості до кліматичних змін. Вибір культури та технологія її вирощування повинні враховувати місцеві агрокліматичні умови для забезпечення стабільної продуктивності та високого енергетичного потенціалу.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ, ПРОГРАМА ТА МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Оцінка ґрунтово-кліматичних умов території досліджень

Для отримання високопродуктивних та врожайних сільськогосподарських культур вирішальне значення мають метеорологічні умови Західного регіону. Саме цей чинник може визначати доцільність вирощування біоенергетичних культур у даному регіоні. У зв'язку з цим особлива увага приділяється аналізу погодних умов упродовж періоду досліджень.

Івано-Франківська область, розташована в передгір'ї та гірській зоні Карпат, є особливо вразливою до змін клімату через складну орографію та значну кількість атмосферних опадів. Аналіз кліматичних змін у цьому регіоні має важливе значення для розвитку регіональних адаптаційних стратегій.

Середня температура повітря в області протягом останніх трьох десятиліть зросла на 1,6 °С, при цьому літо стало значно теплішим, а зимовий період – скоротився. Окрім того, середньорічна температура за 20 років підвищилася на 0,8 °С, а температура зимових місяців – на 1–2 °С. Ці зміни супроводжуються зростанням температурних аномалій і рекордів у теплі місяці: у 2024-му році зафіксовано 19 температурних рекордів, серед яких рекорд +36,3 °С у липні, що значно перевищує попередні максимуми.

Хоча загальна кількість опадів може й не змінюється суттєво, спостерігається послаблення зимового снігового покриву: сніг дедалі частіше заміщується дощем, що підвищує ризик ранніх паводків. У регіоні фіксується збільшення інтенсивних короткотривалих злив, що призводить до підтоплень і струменевих паводків.

Зростання температури та зміщення вегетаційного періоду можуть призвести до раннього цвітіння, вищої активності шкідників, а також зміщення зон природних угруповань. Івано-Франківська область демонструє очевидні кліматичні зрушення: потепління від 0,8 до 1,6 °С за останні десятиріччя, послаблення зими, подовження вегетаційного сезону та зростання екстремальних погодних явищ. Це створює

складні виклики для екосистем, гідрологічного режиму та агроекономіки. Незамінними є адаптаційні заходи, які вже прораховуються в рамках регіональних стратегій до 2030 року, але потребують активного імплементації в практику.

Дослідження виконували на базі ботанічного саду Карпатського національного університету імені Василя Стефаника, який розташований у місті Івано-Франківськ, у передгірній зоні Передкарпаття. Географічне положення саду визначає його належність до помірно континентального клімату з м'якою зимою та теплим вологим літом. Розташування поблизу Карпатських гір зумовлює підвищену кількість опадів та певну вертикальну зональність клімату.

Середня річна температура становить близько 8–9 °С, з максимумом у липні (+19,5 °С) та мінімумом у січні (–3,2 °С). Річна сума опадів коливається у межах 660–800 мм, при цьому найбільше опадів випадає в травні–липні (97–105 мм на місяць), що позитивно впливає на ріст і розвиток більшості культур, але потребує належної організації дренажу на ділянках із надмірним зволоженням.

Вегетаційний період триває в середньому 155–170 днів. Весна зазвичай волога й прохолодна, що сприяє активному відростанню багаторічних рослин. Літо тепле з частими зливами. Осінь характеризується поступовим зниженням температури та зменшенням кількості опадів. Зими м'які, з нестійким сніговим покривом і можливими відлигами.

Ґрунтово-кліматичні умови є одним із провідних чинників, що визначають ефективність вирощування сільськогосподарських культур. Поряд із кліматичними показниками, важливу роль відіграють агрохімічні та агрофізичні властивості ґрунту, які формують рівень його родючості та визначають реакцію культур на агротехнічні заходи. Тому характеристика ґрунту дослідної ділянки є необхідною для оцінки умов росту та розвитку рослин і правильного вибору системи удобрення.

Дослідження проводили на дерново-підзолистому середньосуглинковому ґрунті, типовому для умов Передкарпаття. Цей тип ґрунтів сформувався під впливом лісової та лучної рослинності в умовах надлишкового зволоження. Для них характерні невисокий вміст гумусу, кисла реакція середовища та підвищена

гідролітична кислотність, що зумовлює необхідність проведення заходів із підвищення родючості.

За механічним складом ґрунт належить до середніх суглинків із крупнопилуватою структурою. Він має добре сформований гумусовий горизонт потужністю близько 25 см (рис. 2.1).



$\frac{\text{Horh}}{0-5}$ – дернина, сіра, свіжа, повністю пронизана корінням рослин, перехід чіткий.

$\frac{\text{He}}{5-24}$ – гумусо-елювіальний горизонт, сірий, свіжий злегка ущільнений, прояви залізо-марганцевих бобовин, пористий, грудкувато-горіхуватої структури, перехід чіткий.

$\frac{\text{Ehgl}}{24-44}$ – елювіальний горизонт, оглеєний, сірувато-білястий, середньосуглинковий, ущільнений, слабо виражена плитчаста структура, залізо-марганцеві орштейнові конкреції, корені рослин, перехід поступовий.

$\frac{\text{Igl}}{44-107}$ – ілювіальний горизонт, оглеєний, неоднорідного бурого забарвлення з сизими плямами, щільний, середньосуглинковий, призматичної структури, залізо-марганцеві орштейнові конкреції, відклади колоїдів перехід поступовий.

$\frac{\text{Pgl}}{>110}$ – ґрунотвірна порода, бура, щільна, призмовидна, безкарбонатна.

Рис. 2.1. Опис ґрунтового профілю дерново-підзолистого середньосуглинкового глеюватого ґрунту

Щільність складення ґрунту становить $1,43 \text{ г/см}^3$, що є типовим для середньосуглинкових ґрунтів і характеризує помірне ущільнення орного шару, яке може обмежувати повітряний режим та водопроникність, особливо за надлишкового зволоження.

Агрохімічні характеристики наступні: рН – 4,8; вміст гумусу – 1,76 %; вміст легкогідролізованого азоту – 78,2 мг/кг, рухомого фосфору – 43,4 мг/кг, рухомого калію – 105,8 мг/кг (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Агрохімічна та агрофізична характеристика ґрунту дослідної ділянки

Показник	Значення
Тип ґрунту	Дерново-підзолистий поверхнево-оглеєний
Механічний склад	Середньосуглинковий з крупнопилуватою структурою
Потужність гумусового горизонту, см	25,0
Кислотність, рН	4,8
Вміст гумусу, %	1,76
Вміст азоту, мг/кг	78,2
Вміст фосфору, мг/кг	43,4
Вміст калію, мг/кг	105,8
Кислотність, гідролітична мг екв./100 г ґрунту	2,86
Сума ввібраних основ, мг-екв. на 100 г ґрунту	11,0
Рівень насичення основами, %	85,0
Щільність ґрунту, г/см^3	1,43

Реакція ґрунтового розчину кисла ($\text{pH} = 4,8$), що обмежує доступність поживних елементів, зокрема фосфору, кальцію та магнію. Такий показник свідчить про доцільність вапнування з метою нейтралізації кислотності та поліпшення агрохімічних властивостей ґрунту. Вміст гумусу становить 1,76 %, що характеризує ґрунт як малогумусний і вказує на необхідність систематичного внесення органічних добрив. За вмістом елементів живлення ґрунт має низьке забезпечення азотом (78,2 мг/кг), середнє – фосфором (43,4 мг/кг) і підвищене – калієм (105,8 мг/кг). Таким чином, система удобрення повинна бути спрямована на компенсацію нестачі азоту та фосфору для досягнення оптимального живлення рослин.

Гідролітична кислотність ґрунту становить 2,86 мг-екв/100 г, що свідчить про високий рівень кислотності в поглинальному комплексі. Вміст ввібраних основ дорівнює 11 мг-екв/100 г, а ступінь насиченості основами – лише 85 %, що вказує на переважання кислих катіонів (H^+ , Al^{3+}) і на відносно низький рівень родючості ґрунту.

Отже, ґрунтові умови дослідної ділянки можна охарактеризувати як малородючі, кислі, із низьким вмістом гумусу та азоту, але з відносно високим запасом калію. Для підвищення їх продуктивності доцільним є проведення вапнування, внесення органічних добрив і збалансоване застосування мінеральних добрив, що сприятиме покращенню агрохімічних і агрофізичних властивостей ґрунту, а також створенню оптимальних умов для росту та розвитку енергетичних культур.

2.2. Метеорологічні умови в роки досліджень

Результати сучасних наукових досліджень засвідчують вагомі зміни клімату [106], а також підтверджують їх вплив на біоенергетичні культури [4]. Головні тенденції змін клімату в Європі підтверджують підвищення температури влітку та взимку, а також зростання опадів зимою у більшості регіонів та частих екстремальних природно-кліматичних умов [46]. Від послідовних змін погодних

показників, частоти та потужності кліматичних явищ будуть мінятись і особливості вирощування біоенергетичних культур [48; 78; 126].

За даними Івано-Франківської метеостанції, у період проведення досліджень (2022–2025 рр.) природні умови загалом були сприятливими для вирощування біоенергетичних культур, за винятком окремих місяців вегетаційних періодів деяких років. (Додаток Б). Характеризуючи погодні умови вегетаційного періоду 2022 року слід відзначити, що в період з квітня по жовтень середньодобова температура повітря перевищувала норму на $+7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.2). При середньобагаторічній кількості опадів за вегетацію 534,0 мм випало 449,0 мм, тобто на 85,0 мм менше норми. Крім того варто зауважити, що в період вегетації спостерігалися сприятливі температурні умови протягом місяців, що сприяло росту та розвитку енергетичних культур.

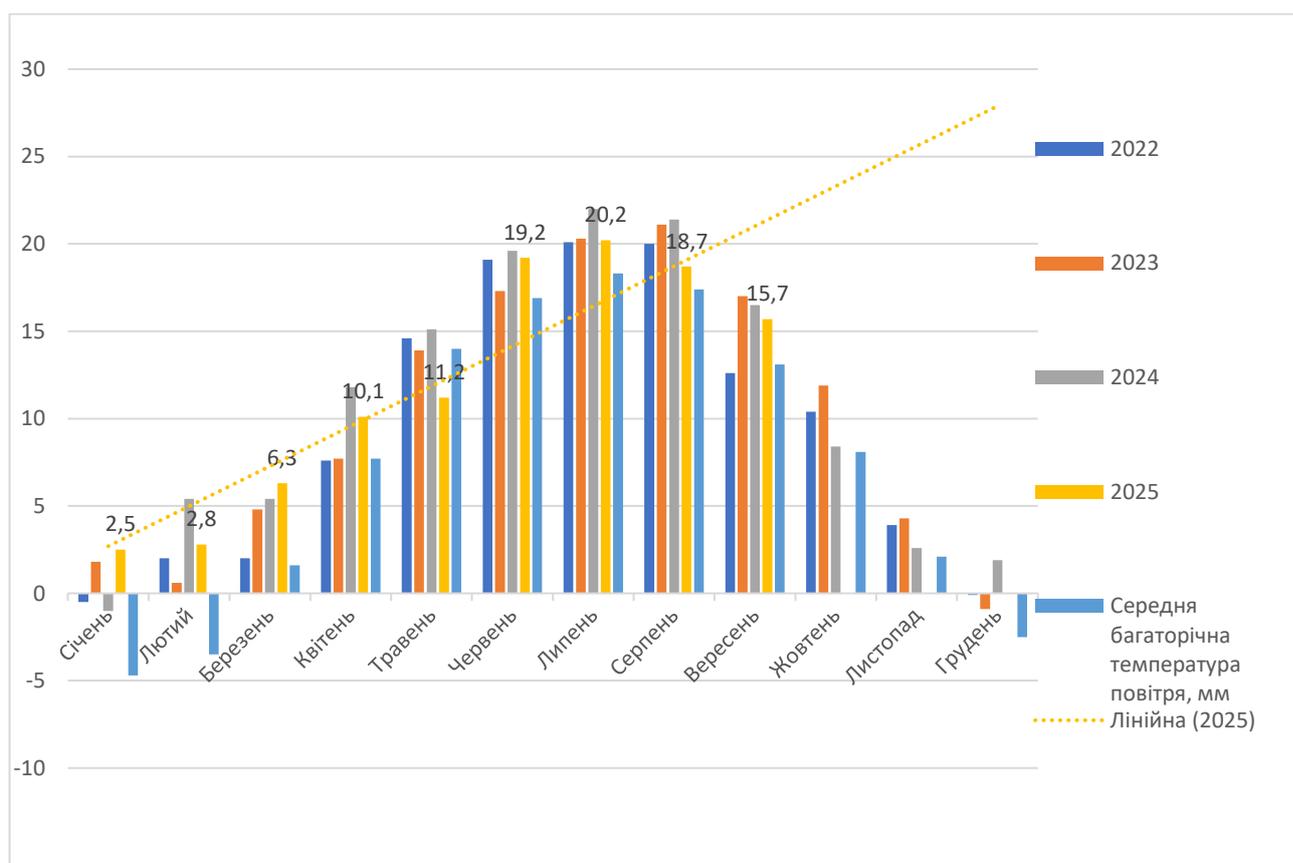


Рис. 2.2. Середньомісячна температура повітря ($^{\circ}\text{C}$) за роки проведення досліджень (за даними Івано-Франківської метеостанції)

Аналізуючи погодні умови по місяцях, слід відзначити, що в квітні склалися сприятливі умови для посіву енергетичних культур. Хоча опадів випало 29,0 мм при нормі 49,0 мм, вологи в ґрунті було достатньо завдяки попереднім опадам: у січні при середньобагаторічній нормі 34,0 мм випало 24,2 мм; а в лютому – при нормі 41,0 мм випало всього 13,4 мм. У травні опадів випало 17,3 мм при нормі 85,0 мм, тоді як середньодобова температура повітря відповідала середньобагаторічній нормі. В цей період було завершено посів та посадку біоенергетичних культур. Відсоток приживання міскантусу становив 86 %.

Літній період характеризувався посушливим кліматом. У червні випало 89,1 мм, що на 14,9 мм менше від норми, а в липні дефіцит опадів становив 61,0 мм. У ці місяці середньодобова температура значно перевищувала середньобагаторічну норму. Опади розподілялися по декадах наступним чином: I декада – 45,7 мм, II декада – 135,4,0 мм і III декада – 286,6 мм, при цьому температура повітря перевищувала норму на 2,7 °С. Такі погодні умови сприяли інтенсивному росту біоенергетичних культур. Найбільша кількість опадів випала у вересні – 181,0 мм, що на 30 % перевищує норму. У вересні при нормі опадів 49,0 мм випало лише 25,0 мм, після чого було розпочато роботи зі збирання врожаю (рис. 2.3).

Природно-кліматичні умови вегетаційного періоду 2023 року були сприятливими у деяких місяцях. Кількість опадів упродовж вегетації (квітень-жовтень) становила 581,7 мм, а за рік – 844,0 мм, що на 112,0 мм більше норми. Дефіцит опадів спостерігався лише в березні (-3,8 мм) та травні (-51,3 мм), тоді як перевищення середньобагаторічного показника спостерігалось у січні (+12,7 мм), квітні (+67,9 мм), червні (+70,2 мм) та липні (+56,2 мм). Вересень був посушливим, і кількість опадів становила лише 68,5 % від норми.

Розподіл опадів за декадами: I декада – 133,7 мм, II декада – 324,8 мм і III декада – 256,9 мм. Температурний режим упродовж вегетаційного періоду перевищував середньобагаторічну норму на 1,6 °С, а за 2023 рік цей показник становив 3,5 °С. Середня температура повітря за вегетаційний період була 16,1 °С, а за господарський рік – 10,6 °С. Такі природно-кліматичні умови сприяли росту та розвитку біоенергетичних культур.

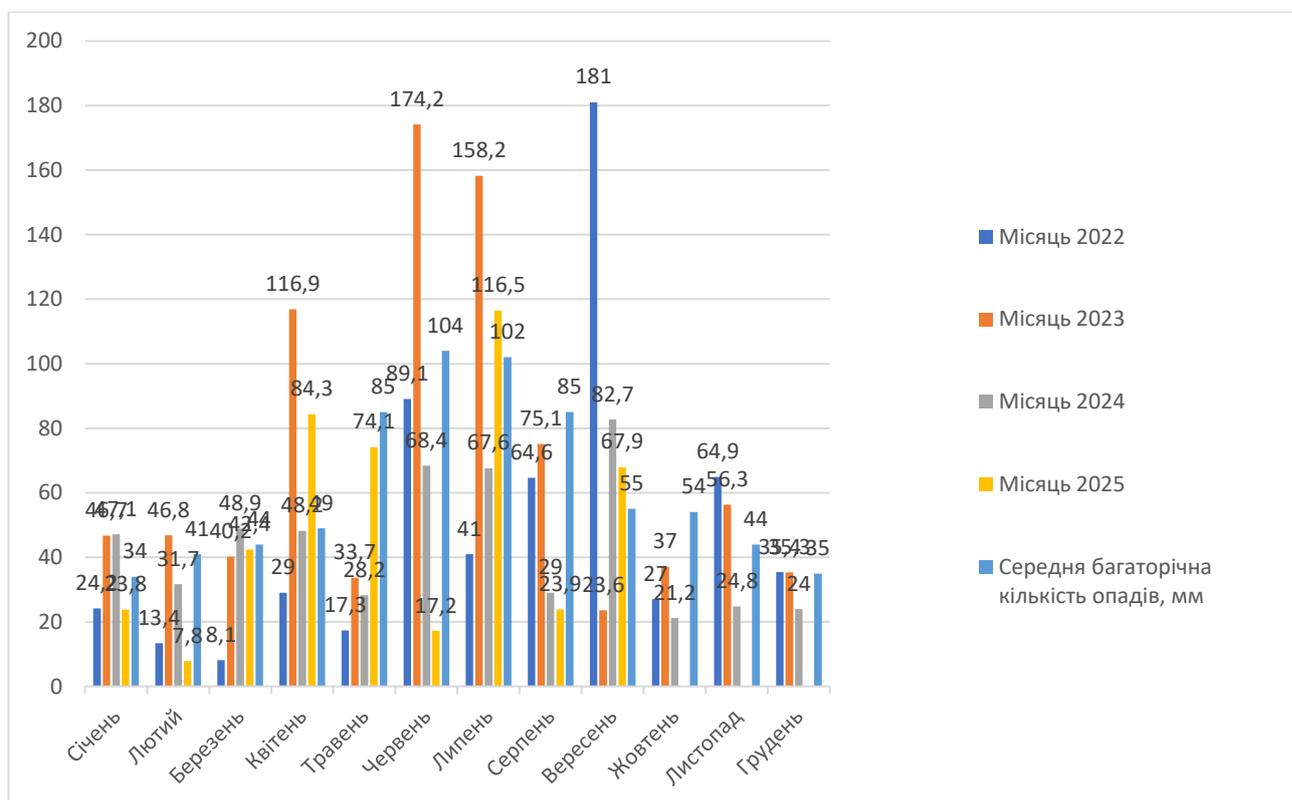


Рис. 2.3. Кількість опадів за роки проведення досліджень (за даними Івано-Франківської метеостанції)

Кліматичні умови 2024 року були несприятливими, оскільки вегетаційний період характеризувався посушливістю, а середньомісячна температура повітря перевищувала норму на 3,1 °С. Відносно холодно було в січні та грудні, коли середня місячна температура була на 0,6–3,7°С меншою за норму. Найтепліше було в квітні та липні, коли температура переважала середньобагаторічні показники на 3,7–4,1°С. Середня річна температура повітря перевищила норму на 4,1°С. Річна кількість опадів становила 521,8 мм, що на 210,2 мм менше середньобагаторічної, а за вегетаційний період – 324,1 мм. Значно більше опадів, ніж норма, випало у травні та серпні, а менше середньобагаторічного показника спостерігалось у грудні–січні. Розподіл опадів по декадах був таким: I декада – 127,7 мм, II декада – 144,8 мм і III декада – 179,3 мм.

Природно-кліматичні умови вегетаційного періоду 2025 року були несприятливими у деяких місяцях. Кількість опадів за вегетаційний період

(квітень-вересень) становила 383,9 мм, що на 96,1 мм менше від норми. Дефіцит опадів спостерігався в травні (10,9 мм), червні (86,8 мм), серпні (61,1 мм), тоді як надлишок позначався у липні (14,5 мм). Оподи розподілялись таким чином: I декада – 74,0 мм, II декада – 175,6 мм і III декада – 208,3 мм. Температурний режим упродовж вегетаційного періоду перевищував середньорічну норму на 1,3°C і становив 15,9°C.

Для аналізу волого- та теплозабезпеченості визначали гідротермічний коефіцієнт зволоження (ГТК) за Г.Т. Селяниновим, показник, який характеризує забезпеченість вологою вегетаційного періоду енергетичних рослин залежно від кількості опадів і температурного режиму. За даними розрахунків ГТК, упродовж вегетаційного періоду (квітень – вересень) 2022–2025 рр. спостерігалися значні коливання показників зволоження, що свідчить про мінливість погодних умов Передкарпаття (рис. 2.4).

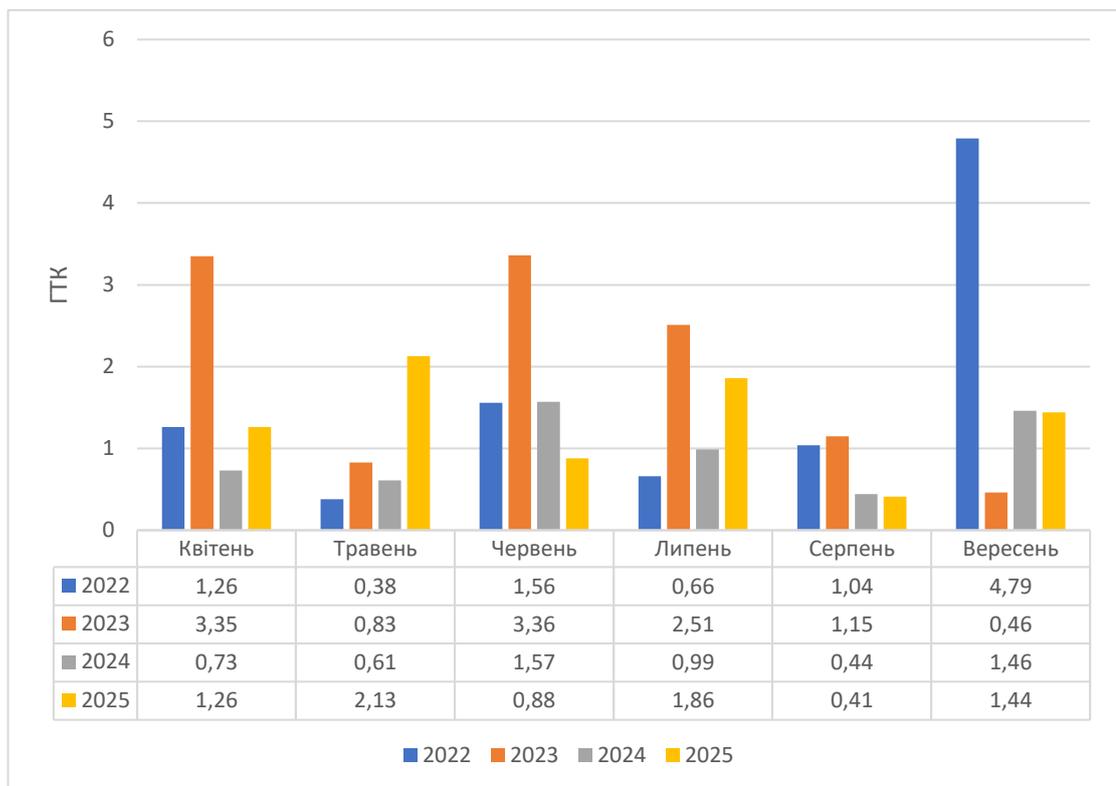


Рис. 2.4. Динаміка гідротермічного коефіцієнта (ГТК) упродовж 2022–2025 років

Розраховано, що ГТК у період вегетації 2022 року становив 1,89; у 2023 р. – 2,40; у 2024 р. – 1,20; у 2025 р. – 1,42. Згідно з прийнятою шкалою оцінки зволоження, при ГТК від 1,0 до 1,5 забезпеченість території дослідження вологою є достатньою, тоді як за значень понад 1,5 територія характеризується надмірним зволоженням.

У 2022 р. умови зволоження були помірно достатніми, оскільки значення ГТК у більшості місяців перевищували 1,0 (квітень – 1,26; червень – 1,56; серпень – 1,04; вересень – 4,79), що свідчить про загалом оптимальні умови для росту та розвитку рослин. Виняток становив травень (ГТК – 0,38) – дуже посушливий місяць, тоді як у вересні (ГТК – 4,79) спостерігався надлишок вологи.

2023 рік характеризувався надмірним зволоженням, особливо у квітні (ГТК – 3,35), червні (3,36) та липні (2,51), що свідчить про значну кількість опадів у поєднанні з помірними температурами. Такі умови сприяли розвитку вегетативної маси культур, проте за надлишку вологи виникали проблеми з повітряним режимом ґрунту та розвитком корневих гнилей. Лише травень (0,83) та вересень (0,46) були посушливими або недостатньо вологими.

У 2024 році умови зволоження були більш збалансованими, а значення ГТК коливалися в межах 0,44–1,57, що свідчить про чергування посушливих (серпень – 0,44; травень – 0,61; липень – 0,99) та відносно сприятливих умов зволоження (червень – 1,57; вересень – 1,46). Найбільш посушливим місяцем був серпень (ГТК – 0,44).

2025 рік відзначився контрастністю погодних умов: у квітні і травні спостерігалось недостатнє зволоження (ГТК – 0,61 і 0,73 відповідно), тоді як червень характеризувався дуже посушливими умовами. У липні (ГТК – 0,99) відмічалось близьке до оптимального зволоження, серпень був сухим (ГТК – 0,44), тоді як у вересні виявлено вологі умови (ГТК – 1,44).

На основі побудованої діаграми видно, що гідротермічні умови вегетаційного періоду суттєво варіювали за роками. Найбільш вологими виявилися 2023 і частково 2025 роки, де значення ГТК перевищували 2,0 в окремих місяцях, що свідчить про надлишок опадів. У 2022 та 2024 роках спостерігалися періоди посухи

(ГТК < 0,7), особливо в травні 2022 р. і серпні 2024 р., що знижувало урожайність культур.

У цілому, за аналізований період гідротермічні умови Передкарпаття характеризувалися значною річною та сезонною мінливістю вологості, з тенденцією до чергування вологих і посушливих місяців. Це підтверджує необхідність адаптації технологій вирощування культур – зокрема вибору сортів, стійких до коливань вологозабезпечення, та оптимізації системи удобрення й обробітку ґрунту для збереження вологи.

2.3. Схема і методика досліджень

Дослідження проводили протягом 2022–2025 рр. із багаторічними енергетичними культурами та 2023–2025 рр. – із однорічними енергокультурами на дослідному полігоні кафедри лісового і аграрного менеджменту Карпатського національного університету імені Василя Стефаника.

У дослідах вивчали шість варіантів удобрення: контроль (без добрив, обробка водою), $N_{30}P_{30}K_{30}$ (міскантус, просо, сорго) та $N_{90}P_{90}K_{90}$ (кукурудза), БЛЕК ДЖЕК КС, Інтермаг Титан, $N_{30}P_{30}K_{30}$ та $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС, $N_{30}P_{30}K_{30}$ та $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан (табл. 2.2–2.3).

Посівна ділянка – 50 м², облікова – 30 м², повторність – чотириразова, розміщення варіантів рандомізоване. Сівбу сорго цукрового та кукурудзи проводили у травні (глибина 4–6 см, міжряддя 45 см). Садіння міскантусу проводили у 16 квітня 2022 року на глибину 8–10 см з густотою стояння рослин 16 тис.806 шт./га. (70 x 85 см), та масою ризомів (кореневищ) 10–20 г. Просо прутоподібне висаджували на глибину 5–7 см в першій декаді травня. Вирощували міскантус гігантський сорт Осінній зорецвіт, просо прутоподібне сорт Морозко, сорго цукрове сорт Фаворит та гібрид кукурудзи Мантікора. Мінеральні добрива вносили у вигляді нітроамофоски.

Таблиця 2.2

Дослід 1. Формування продуктивності багаторічних енергетичних культур
за різних рівнів удобрення

Фактор А Види	Фактор Б Рік вегетації	Фактор В Фон- живлення	
Міскантус гігантський Просо прутоподібне	Перший	Контроль (без добрив, обробка водою)	
	Другий		
	Третій		
	Четвертий		
			N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀
			БЛЕК ДЖЕК КС
		Інтермаг Титан	
		N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	
		N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	

Таблиця 2.3

Дослід №2. Вплив застосування удобрення на продуктивність однорічних
енергетичних культур

Фактор А Види	Фактор Б Фон- живлення
Сорго цукрове	Контроль (без добрив, обробка водою)
	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀
	БЛЕК ДЖЕК КС
	Інтермаг Титан
	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС
	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан
Кукурудза звичайна	Контроль (без добрив, обробка водою)
	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀
	БЛЕК ДЖЕК КС
	Інтермаг Титан
	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + БЛЕК ДЖЕК КС
	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + Інтермаг Титан

Міскантус гігантський сорт Осінній зорецвіт. Оригінатор Інститут біоенергетичних культур та цукрових буряків НААН України. Державна реєстрація – 2015 рік. Рослина пряма та висока, волоть веретеноподібної форми, помірної щільності. Висота більше 250 см, валова кущистість сильна, початок вегетації квітень. Урожайність сирової біомаси – 26 т/га, вихід сухої речовини – 20 т/га, а вихід енергії – 360 ГДж/га. Енергетичні затрати на виробництво 20 ГДж/га. Теплоємність пального 18 МДж/кг. Зольність пального становить від 0,5 до 1,5 %. Період експлуатації плантації міскантусу становить близько 25 років. Рекомендовано використовувати у зоні Лісостепу [279; 288].

Просо прутноподібне сорт Морозко. У 2015 році занесений до Державного реєстру. Тип сорту – тетраплоїд. Висота рослини більше 160 см, початок цвітіння – середній (серпень). Урожайність сирової біомаси становить 23 т/га, вихід сухої речовини – 17 т/га та насіння – 0,2 т/га. Термін експлуатації плантації 15 років. Вихід енергії становить 255 ГДж/га, а енергетичні затрати на виробництво в рік є 19 ГДж/га. Теплоємність пального – 17 ГДж/кг. Зольність пального – 0,5–2,0 %.

Сорго цукрове сорту Фаворит – пізньостиглий, розроблений Іванівською селекційною станцією і зареєстрований в 2003 році. Вегетаційний період у межах 125 днів. Висота становить 180 – 250 см, трохи мають нахилену волоть та округле насіння з густими лусками. Урожайність сухої речовини становить 93,9 т/га, а насіння – 32,8 т/га, в ньому міститься 10,1 % білка, 28,2 % клітковини та 5,9–6,1 % протеїну, а в соку стебла – приблизно 14 % цукру, що свідчить про значущість сорту для стійкості до посухи – 8,2 бали, вилягання – 8,6 балів, осипання – 9,0 балів. Дозрівання для сухої речовини становить 78 днів, а насіння – 124 дні.

Кукурудза гібрид Мантікора – середньостиглий гібрид (ФАО 320) української селекції ВНІС. Його використовують для вирощування на зерно, силос та виробництві біогазу. Врожайність становить близько 21 т/га адаптується до різних природно-кліматичних умов. Висота до 230 см, а це забезпечує великий обсяг зеленої маси для використання в енергетичних цілях. Завдяки своїм властивостям та стійкості до стресових умов забезпечує стабільну урожайність та високу продуктивність.

Для дослідів використовували такі добрива:

Нітроамофоска ($NH_4H_2PO_4 + NH_4NO_3 + KCl$) – комплексне добриво, що забезпечує життєдіяльність рослин і може вноситись на будь-якому етапі їхнього розвитку. Воно складається з трьох основних компонентів, необхідних рослині впродовж вегетації – азот, фосфор та калій (NPK). Випускається добриво у формі гранул та використовується для основного та передпосівного внесення, а в рідкому вигляді для позакореневого підживлення культур.

БЛЕК ДЖЕК КС – високоефективний природний органічний біостимулятор. Ульмінові кислоти та гумін, що входять до складу препарату, виступають як активатори росту рослин, сприяючи інтенсивному обміну речовин, гормональній та ферментативній активності. Завдяки наявності повного спектру гумусових компонентів препарат демонструє високу ефективність та користь для рослин при листовому внесенні, що відрізняє його від звичайних гуматів. Склад: гумінові кислоти 18–21 %, фульвокислоти 3–6 %, загальна органічна речовина (в т.ч. ульмінові кислоти та гумін) 27–30 %, рН 3,5–5,0.

Інтермаг Титан – рідке добриво (має рістактивуючі властивості), до складу якого входить титан у вигляді добре розчинної хімічної сполуки з органічною кислотою. Він якісно активізує життєві процеси рослини, забезпечує транспортну функцію, посилює перенесення діючих речовин (добрив, ЗЗР) у тканинах та позитивно впливає на якісні й кількісні показники врожаю. Склад добрива: Ti – 0,8 (8,7 г/л); N – 3 (32,7 г/л).

Спостереження за фазами росту та розвитку біоенергетичних культур проводили візуально, фіксуючи дату початку кожної фази (на ділянці у 10 % та масова їх поява у 75 % рослин): поодиноких та повних сходів, поява третього листка, початок утворення кущів, виходу в трубку, поява волоті й початок цвітіння [163; 188; 189; 310]. Пізніше, на стадії кущіння, фіксували повне з'явлення сходів, а за 5 днів до збирання врожаю визначали густоту насаджень шляхом постійного підрахунку рослин на дослідних ділянках. Біометричні показники визначали періодично на всіх повтореннях за такими критеріями:

а) висоту головного пагона рослин – вимірюванням мірною рейкою від поверхні ґрунту до верхівки найдовшого листка. У фазі цвітіння волотей квантифікація проводилась від поверхні ґрунту до вершини волоті;

б) висоту куща вимірювали мірною рейкою від поверхні ґрунту до верхівки куща;

в) кількість листків на головному пагоні – розраховуючи послідовну появу листків;

г) кількість пагонів у кущі фіксували рахуючи всі пагони.

Визначення переміщення, акумулювання вологості та вмісту сухих речовин проводили за допомогою термогравіметричного методу [227]. Щодо перезимівлі рослин, то її встановлювали загальним підрахунком рослин, які перебували у стані зимівлі та після перезимівлі (у польових умовах) [267]. Експериментальні дані обробляли за допомогою статистичних методів: дисперсійного, кореляційного, регресійного аналізів [140; 270; 271] за допомогою програм Excel і “Statistica 6.0” на персональному комп’ютері [184].

Оцінку економічних показників проводили відповідно до методики «Визначення економічної ефективності використання в сільському господарстві результатів науково дослідних і дослідно-конструкторських робіт, нової техніки, винаходів і раціоналізаторських пропозицій» [164]. Енергетичну оцінку заходів визначали за відповідними методичними рекомендаціями [243] та методикою О. К. Медведовського, П.І. Іваненка [180]. Витрати на вирощування енергетичних культур для виробництва біопалива визначали шляхом складання технологічних карт [285]. Норми виробітку і витрати пального були використані довідникові [139]. Таким чином, погодні умови території досліджень типові як для Передкарпаття, так і Західного регіону України. Схема досліду й методика досліджень відповідає робочій гіпотезі. Програмою передбачена достатня кількість польових дослідів та обліків, спостережень і аналізів, проведених у процесі їх виконання, які дозволять комплексно й ґрунтовно визначити зміст досліджень, цілеспрямованих на вирішення питання зростання створення та підвищення продуктивності біомаси енергетичних культур.

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ РОСТУ ТА РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР ЗАЛЕЖНО ВІД ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ

3.1. Динаміка висоти рослин залежно від досліджуваних факторів

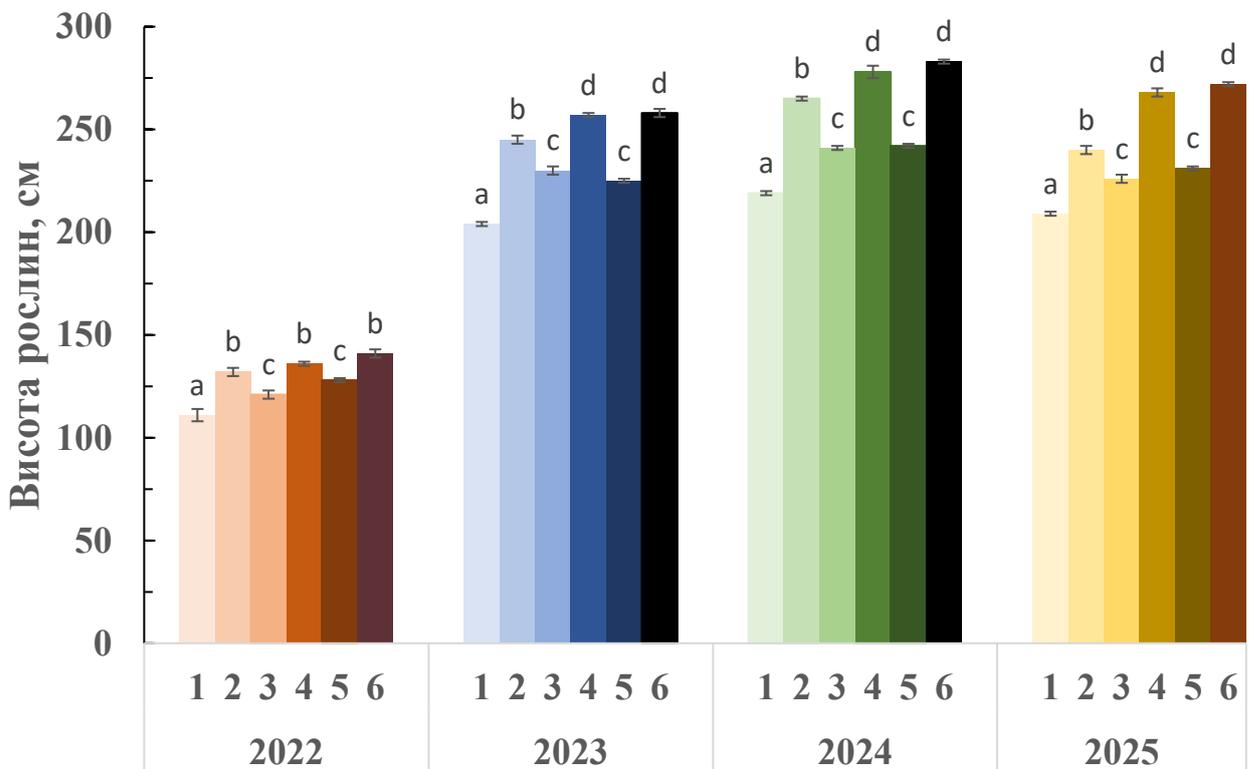
Забезпечення економічно вигідної продуктивності сільськогосподарських культур можливе лише через оптимізацію технології вирощування рослин за допомогою раціонального використання всіх можливих факторів. Темпи росту і розвитку рослин міскантусу за період вегетації дозволяють вчасно впливати на процес утворення високої продуктивності культури. Висота, як зазначає Ф.М. Куперман, є однією з основних ознак, яка визначає ріст і розвиток рослин [277].

Формування надземної маси міскантусу, включаючи висоту, залежить від морфологічних особливостей сорту, гідротермічних та агротехнічних заходів, включаючи добрива. У результаті досліджень встановлено, що висота куща істотно змінювалася залежно від року дослідження та удобрення. Зростання цих показників було зумовлене рівнем забезпеченості рослин елементами живлення, погодними умовами року та ефективністю застосованих мікродобрив.

Аналізуючи висоту основного пагона міскантусу в різні періоди вегетації рослини встановлено, що на контролі вона була найменшою протягом усього вегетаційного періоду чотирьох років вирощування. Наприкінці вегетаційного періоду другого року на контрольному варіанті рослини в середньому по трьох повтореннях мали висоту 204 см, кількість пагонів на одній рослині 33 штуки [200; 295].

На контролі спостерігалася найменша висота кущів, а саме: 111 см у 2022 році, 205 см – у 2023 році, 218 см – у 2024 році і 209 см – у 2025 році (табл. 3.1). Такі результати свідчать про обмежене надходження елементів живлення у природних умовах, що зумовило слабший розвиток вегетативної маси. Наприкінці вегетаційного періоду другого року досліджень у контрольному варіанті рослини

міскантусу досягали висоти 205 см. У варіанті із застосуванням мінеральних добрив у дозі нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ висота рослин зросла до 243 см, це на 38 см перевищувало контроль. Застосування гуматного добрива БЛЕК ДЖЕК КС сприяло збільшенню висоти рослин на 25 см порівняно з контролем. Максимальна висота (259 см) спостерігалася у варіанті з поєднанням мінеральних добрив $N_{30}P_{30}K_{30}$ та титанового препарату Інтермаг Титан.



Примітка: вар. 1 - контроль, вар.2 - $N_{30}P_{30}K_{30}$, вар. 3 - БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 4 - Інтермаг Титан, вар. 5 - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 6. - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан Дані подані як середнє арифметичне (M) ± стандартне відхилення (SD).

Рис. 3.1. Вплив удобрення на розвиток рослин міскантусу гігантського, 2022–2025 рр.

Внесення мінерального удобрення у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ позитивно вплинуло на висоту кущів, яка підвищилася до 131 см – у 2022 році, 243 см – у 2023 році, 264 см

році – у 2024 році та 238 см – у 2025 році. Це свідчить про покращення живлення азотом, фосфором і калієм, що сприяло активнішому росту і підвищенню біометричних параметрів.

Позакореневе підживлення препаратами БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан забезпечувало подальше покращення ростових характеристик порівняно з контролем. У варіанті БЛЕК ДЖЕК КС висота кущів у середньому становила – 122 см – у 2022 році, 231 см – у 2023 році, 240 см – у 2024 році, 225 см – у 2025 році. Застосування Інтермаг Титан дало схожий результат (128 см – у 2022 році, 224 см – у 2023 році, 242 см – у 2024 році, 229 см – у 2025 році відповідно). Обидва мікродобрива проявили стимулюючий ефект на ріст, що пов'язано з покращенням фотосинтетичної активності та посиленням метаболічних процесів у рослинах.

Найвищі показники отримано при комплексному застосуванні $N_{30}P_{30}K_{30}$ із позакореневими підживленнями. У варіанті $N_{30}P_{30}K_{30}+$ БЛЕК ДЖЕК КС висота кущів досягала 136 см – у 2022 році, 255 см – у 2023 році, 289 см – у 2024 році, 268 см – у 2025 році., що перевищувало контроль відповідно на 66–74 %. Аналогічно, у варіанті $N_{30}P_{30}K_{30} +$ Інтермаг Титан висота кущів становила – 140; 259; 282; 271 см.

Загалом, результати досліджень засвідчили, що інтенсивність росту значною мірою визначається рівнем мінерального живлення і застосуванням мікроелементів. Комплексне використання основного удобрення з позакореневими препаратами сприяло збалансованому розвитку рослин, активізації процесів фотосинтезу й підвищенню адаптивного потенціалу.

Важливою агротехнологічною особливістю першого року вегетації проса прутоподібного (*Panicum virgatum L.*) є його висока чутливість до температурного режиму та вологості ґрунту на початкових етапах росту і розвитку. Саме ці фактори визначають рівномірність і своєчасність появи сходів, що, своєю чергою, істотно впливає на ефективність подальшого механізованого догляду за посівами. Основні елементи технології вирощування суттєво впливають на рівень урожайності, створюючи сприятливі умови для вегетації, це позитивно позначається на фізіологічному стані рослин і їхніх морфометричних показниках. Одним із

важливих індикаторів реакції культури на умови вирощування є висота рослин, яка тісно корелює з рівнем мінерального живлення і свідчить про ступінь адаптивної здатності проса до впливу факторів зовнішнього середовища [197; 199; 296].

Результати спостережень за ростом і розвитком рослин проса прутоподібного засвідчили неоднакову динаміку формування рослин залежно від удобрення. У перший рік вегетації з'явилися сходи, які розвивалися повільно. Упродовж вегетаційного періоду тривалістю 165 днів сформувалися рослини заввишки 30–40 см, які не становили господарської цінності для збирання. На другий рік вегетації рослини свічграсу сформували урожай, який можна використовувати як альтернативне джерело енергії [197; 296].

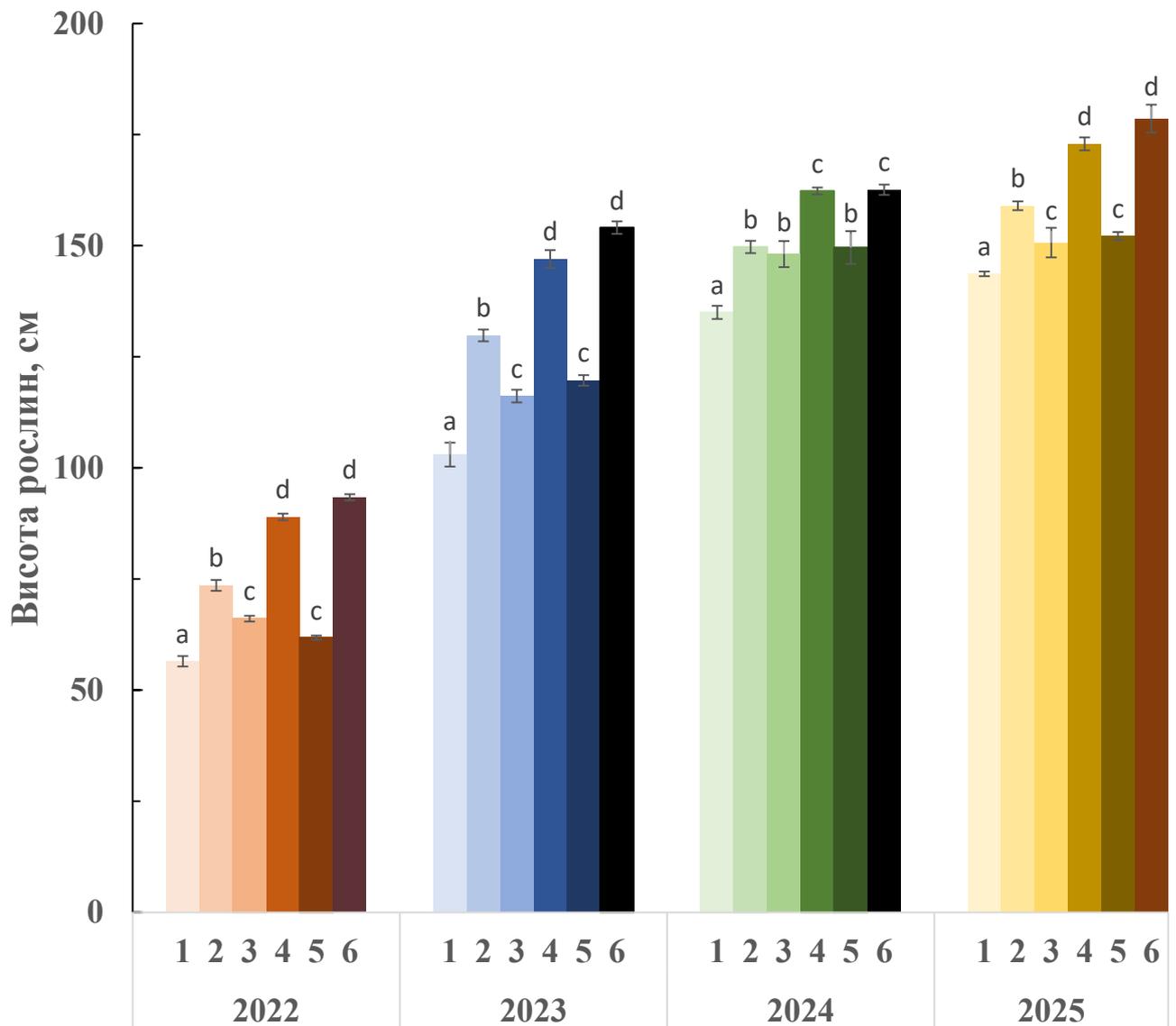
Структура врожаю проса прутоподібного залежно від удобрення наведена в таблиці 3.2 свідчить про позитивний вплив добрив на ріст культури протягом всіх років дослідження. На контрольному варіанті, де проводилось лише обприскування водою, рослини досягали висоти 57 см – у 2022 році, 104 см – у 2023 році, 135 см – 2024 році, 141 см – у 2025 році та 109,3 см в середньому за чотири роки (рис.3.2).

Внесення мінерального добрива у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ забезпечило збільшення висоти від 16 до 24 см, найбільш істотна різниця спостерігалась у 2023 та 2025 роках. Застосування біостимулятора БЛЕК ДЖЕК КС окремо сприяло зростанню висоти до 119,3 см в середньому за чотири роки. Аналогічні показники були зафіксовані при застосуванні препарату Інтермаг Титан, однак висота рослин у цьому варіанті була вищою на 1,2 см. Найкращі результати отримано при комбінованому внесенні добрив: варіанти з поєднанням $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан сприяли максимальному росту рослин – 142,3 см та 147,0 см відповідно в середньому за чотири роки.

Таким чином, використання мінерального удобрення в поєднанні з мікроелементами істотно покращує морфометричні показники проса прутоподібного, зокрема висоту рослин, що може позитивно впливати на загальну біомасу та потенціал урожайності даної культури.

Технологія вирощування сорго цукрового ґрунтується на поєднанні взаємопов'язаних агротехнічних заходів, кожен з яких має істотне значення для

інтенсифікації ростових процесів, формування рослин та досягнення високого рівня їх продуктивності.



Примітка: вар. 1 - контроль, вар.2 – N₃₀P₃₀K₃₀, вар. 3 - БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 4 - Інтермаг Титан, вар. 5 – N₃₀P₃₀K₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 6. – N₃₀P₃₀K₃₀ + Інтермаг Титан. Дані подані як середнє арифметичне (M) ± стандартне відхилення (SD).

Рис. 3.2. Зміна висоти рослин проса прутоподібного залежно від удобрення, 2022–2025 рр.

Окремі елементи технології вирощування по-різному впливають на врожайність культури, забезпечуючи оптимальні умови для росту і розвитку, що

позитивно відображається на фізіологічному стані рослин та їхніх біометричних показниках [198; 292; 294].

Сорго цукрове вимагає виконання комплексу агротехнічних заходів, кожен з яких відіграє важливу роль у стимулюванні ростових процесів, розвитку рослин і забезпеченні їх високої продуктивності. Різні елементи технології вирощування впливають на врожайність, створюючи оптимальні умови для росту, що позитивно позначається на фізіологічному стані рослин та їхніх біометричних характеристиках.

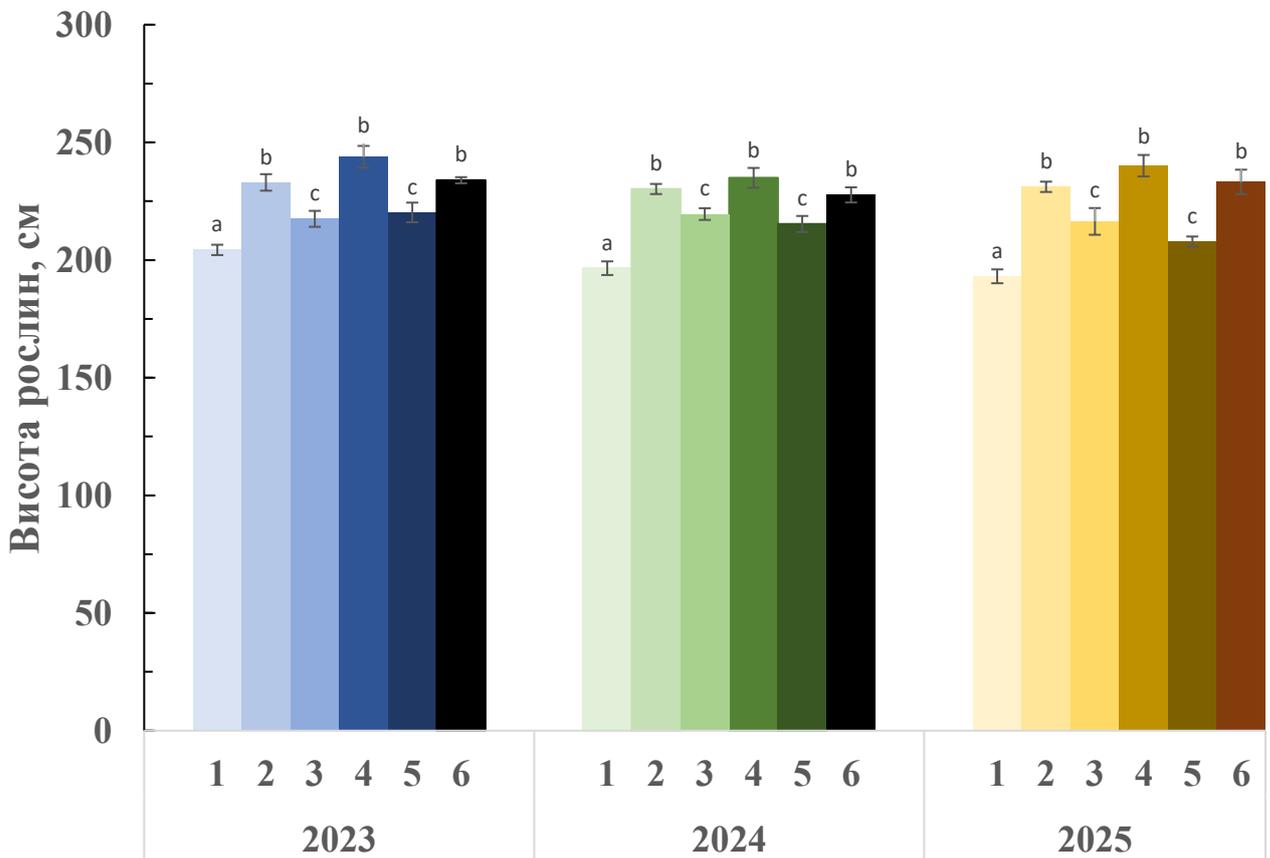
Одним із важливих показників є висота рослин, яка тісно пов'язана із рівнем удобрення і слугує важливим індикатором адаптації сорго до умов вирощування. Залежно від мети використання культури – для сінажу, силосу чи зеленого корму – рекомендується проводити збирання сорго на різних етапах його розвитку.

Висота рослин сорго цукрового є не лише показником їх лінійного розвитку, а й чинником, що значно впливає на потенційну врожайність культури. Зокрема, добуток висоти рослин на діаметр стебла часто використовується як інтегральний показник продуктивності вегетативної маси. Дослідження показали, що в фазі воскової стиглості висота рослин сорго цукрового сорту Фаворит варіювала у межах 205,3–241,5 см, при цьому найвищі рослини зафіксовано у варіанті з використанням $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС (рис. 3.3).

Найсприятливіші погодні умови спостерігалися у 2023 році, що допомагало досягненню максимальної висоти рослин сорго цукрового сорту Фаворит. 2024 – 2025 роки характеризувалися несприятливими погодними умовами на період сівби, тому висота рослин сорго на контролі була на 6,8 та 13,2 см меншою та становила 198,5 і 192,1 см.

Застосування мінерального удобрення у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ забезпечило суттєве підвищення ростових показників: висота рослин зросла на 31 см в середньому за три роки. Це свідчить про активне формування вегетативної маси під впливом оптимального мінерального живлення. Позакореневе підживлення стимулювало подальше зростання показників висоти рослин сорго цукрового. Обробка препаратом БЛЕК ДЖЕК КС сприяла підвищенню висоти рослин до 220,7 см у

2023 році, що на 15,4 см більше, ніж на контролі. Подібну тенденцію спостерігали і при застосуванні мікродобрива Інтермаг Титан, де максимальна висота рослин становила 219,6 см, що на 14,3 см більше ніж на контролі.



Примітка: вар. 1 - контроль, вар.2 - $N_{30}P_{30}K_{30}$, вар. 3 - БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 4 - Інтермаг Титан, вар. 5 - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 6. - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан. Дані подані як середнє арифметичне (M) \pm стандартне відхилення (SD).

Рис. 3.3. Висота рослин сорго цукрового залежно від удобрення у фазі закінчення вегетації, 2022–2025 рр.

На варіанті $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС висота рослин досягла 238,0 см, що на 39,4 см перевищує контроль. Подібний результат спостерігали і за сумісного використання $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан – 232,4 см.

За дослідженнями Паларамчук та інших, до ключових морфологічних ознак, що мають важливе значення для удосконалення агротехніки вирощування

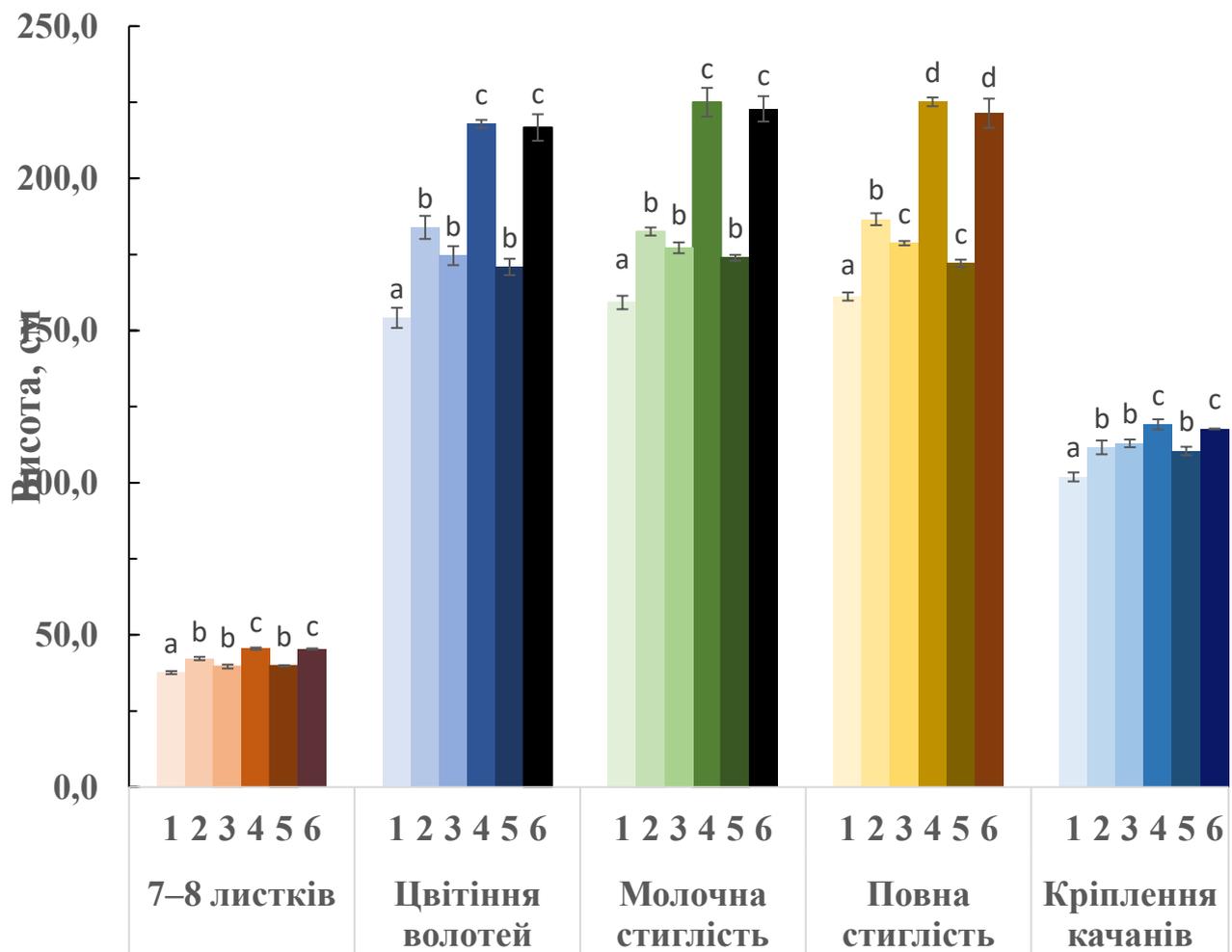
кукурудзи належать висота рослин і рівень прикріплення качанів, оскільки вони істотно впливають на тривалість, ефективність та втрати під час збирання врожаю. Крім того, параметри висоти рослин і розташування качанів визначають можливість широкого застосування механізованих технологій у процесах вирощування та збирання [234; 258; 303].

Варто зазначити, що висота рослин є інформативним показником, який відображає реакцію гібридів кукурудзи на умови вирощування, зокрема рівень освітлення, вологість повітря та ґрунту, температурний режим, а також забезпеченість елементами живлення і застосування агротехнічних заходів [246; 258]. Цей показник відображає біологічну закономірність, пов'язану з тривалістю вегетаційного періоду, і тісно корелює з рівнем урожайності культури [160; 258]. Доведено, що низькорослі гібриди кукурудзи за однакової тривалості вегетації та кількості листків, як правило, поступаються високорослим за врожайністю, що підтверджує залежність між ростом рослин та продуктивністю [143].

У ході проведених польових досліджень встановлено, що висота рослин кукурудзи сорту Мантікора та рівень кріплення качанів істотно залежали від фази розвитку культури та удобрення. Упродовж періоду вегетації спостерігалася тенденція до поступового наростання лінійних параметрів рослин, з максимальними значеннями у фазі повної стиглості зерна. В середньому за три роки дослідження на контролі висота рослин у фазах 7–8 листків кукурудзи становила 37,5 см, цвітіння волотей – 152,9 см, молочної стиглості зерна – 157,9 см та повної стиглості зерна – 158,1 см (табл. 3.4).

Висота кріплення качанів при цьому дорівнювала 102,6 см, що свідчить про відносно помірний розвиток рослин за умов відсутності елементів живлення. У варіанті з внесенням мінеральних добрив у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ показники збільшились до 42,1 см у фазі 7–8 листків та до 186,5 см у фазі повної стиглості. Висота кріплення качанів у цьому варіанті становила 112,8 см, що на 10,2 см більше порівняно з контролем. Це свідчить про активне формування вегетативної маси під впливом оптимального мінерального живлення.

Позакореневе підживлення стимулювало подальше зростання показників висоти рослин. Обробка препаратом БЛЕК ДЖЕК КС сприяла збільшенню висоти рослин до 180,3 см у фазі повної стиглості зерна, що на 22,2 см більше порівняно з контролем. Подібну тенденцію спостерігали і при застосуванні мікродобрива Інтермаг Титан, де максимальна висота рослин становила 173,6 см, а висота кріплення качанів – 111,1 см.



Примітка: вар. 1 - контроль, вар.2 - $N_{90}P_{90}K_{90}$, вар. 3 - БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 4 - Інтермаг Титан, вар. 5 - $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 6. - $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан. Дані подані як середнє арифметичне (M) \pm стандартне відхилення (SD).

Рис. 3.4. Висота рослин та кріплення качанів у кукурудзи залежно від фази розвитку та удобрення, середнє за 2023–2025 рр.

Найвищі показники спостерігались на варіанті з комбінованим внесенням $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС і становили 46,4 см у фазі «7–8 листків», 220,3 см у фазі «цвітіння волотей», 224,8 см у фазі «молочна стиглість», 225,1 см у фазі «повна стиглість». Збільшення висоти рослин істотно залежала від удобрення. У варіанті $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС висота рослин досягла 225,1 см, а висота кріплення качанів – 119,8 см, що на 42,4 та 16,8 % перевищує контроль. Подібний результат відмічено і за сумісного використання $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан – 221,4 см і 119,5 см відповідно.

Загалом, за роки досліджень виявлено, що інтенсивність росту кукурудзи найбільшою мірою залежала від рівня забезпечення рослин макро- та мікроелементами. Найвищі показники висоти рослин і кріплення качанів відзначено у варіантах із комплексним застосуванням мінеральних добрив і позакоренових стимуляторів, що підтверджує позитивний вплив збалансованого живлення на морфогенез і біометричні параметри культури.

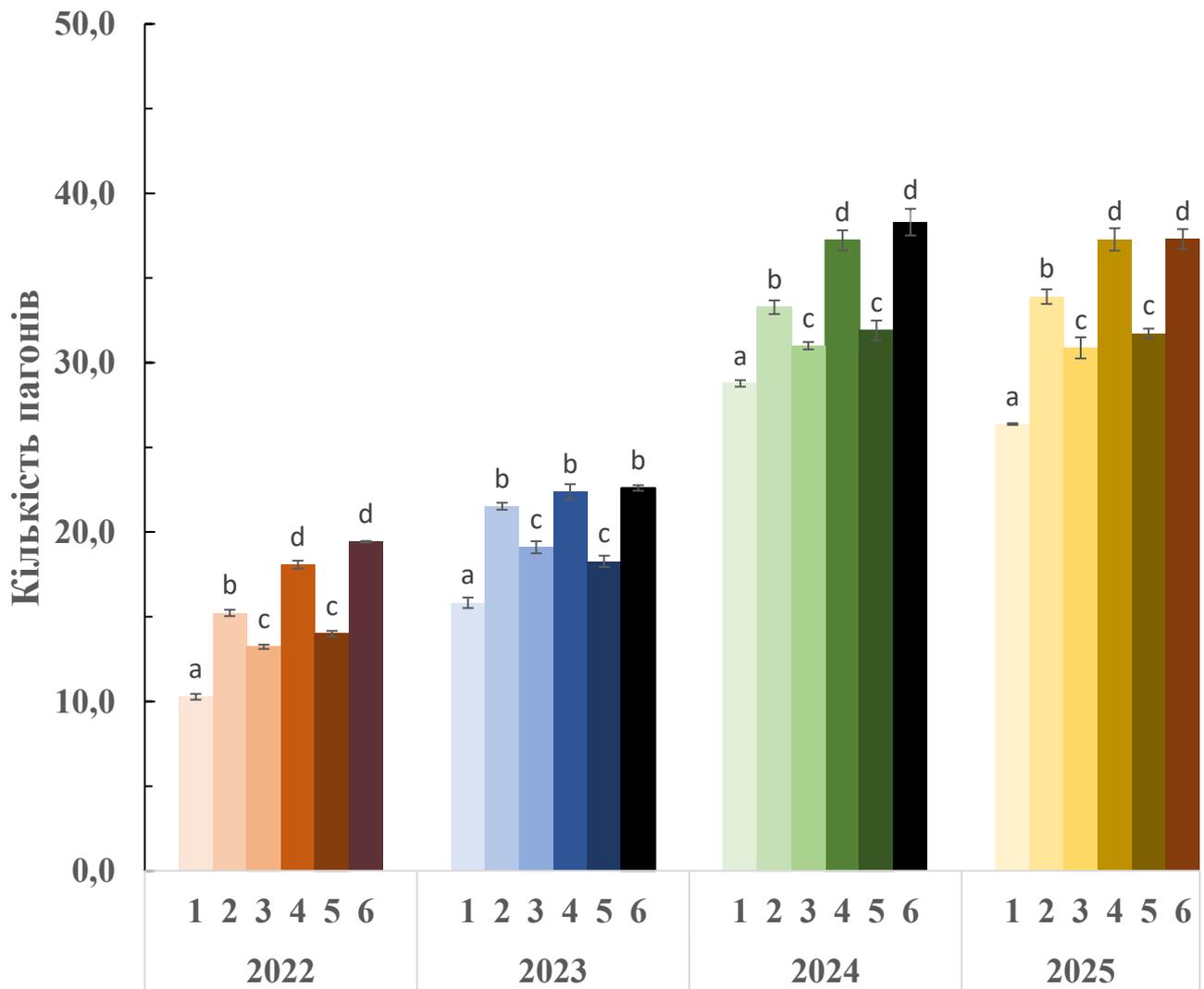
Таким чином, внесення мінеральних добрив у поєднанні з позакореновими препаратами забезпечує інтенсивніший ріст рослин сорго цукрового та кукурудзи на всіх етапах онтогенезу, сприяє кращому формуванню генеративних органів і підвищенню потенціалу урожайності.

3.2. Структура врожаю та густина стояння досліджуваних культур

Структурні показники врожаю є важливою складовою формування продуктивності посівів усіх сільськогосподарських культур, у тому числі і енергетичних рослин. Дія будь-якого агротехнічного прийому на рівень продуктивності та якісні характеристики продукції відображається через зміну цих елементів. При цьому окремі складові структури врожаю є більш чутливими до впливу технологічних заходів, тоді як інші характеризуються відносно меншою варіабельністю [191].

У результаті досліджень встановлено, що кількість пагонів на рослині міскантусу гігантського істотно змінювалась залежно від року дослідження та

удобрення. Зростання цих показників було зумовлене рівнем забезпеченості рослин елементами живлення, погодними умовами року та ефективністю застосованих мікродобрив. На контролі спостерігалася найменша кількість пагонів – 10,3 шт./росл. – у 2022 році, 15,8 шт./росл. – у 2023 році; 28,8 шт./росл. – у 2024 році; 26,1 шт./росл. – у 2025 рр. відповідно (рис. 3.5).



Примітка: вар. 1 - контроль, вар. 2 - $N_{30}P_{30}K_{30}$, вар. 3 - БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 4 - Інтермаг Титан, вар. 5 - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 6 - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан. Дані подані як середнє арифметичне (M) ± стандартне відхилення (SD).

Рис. 3.5. Вплив удобрення на кількість пагонів міскантусу, 2022–2025 рр.

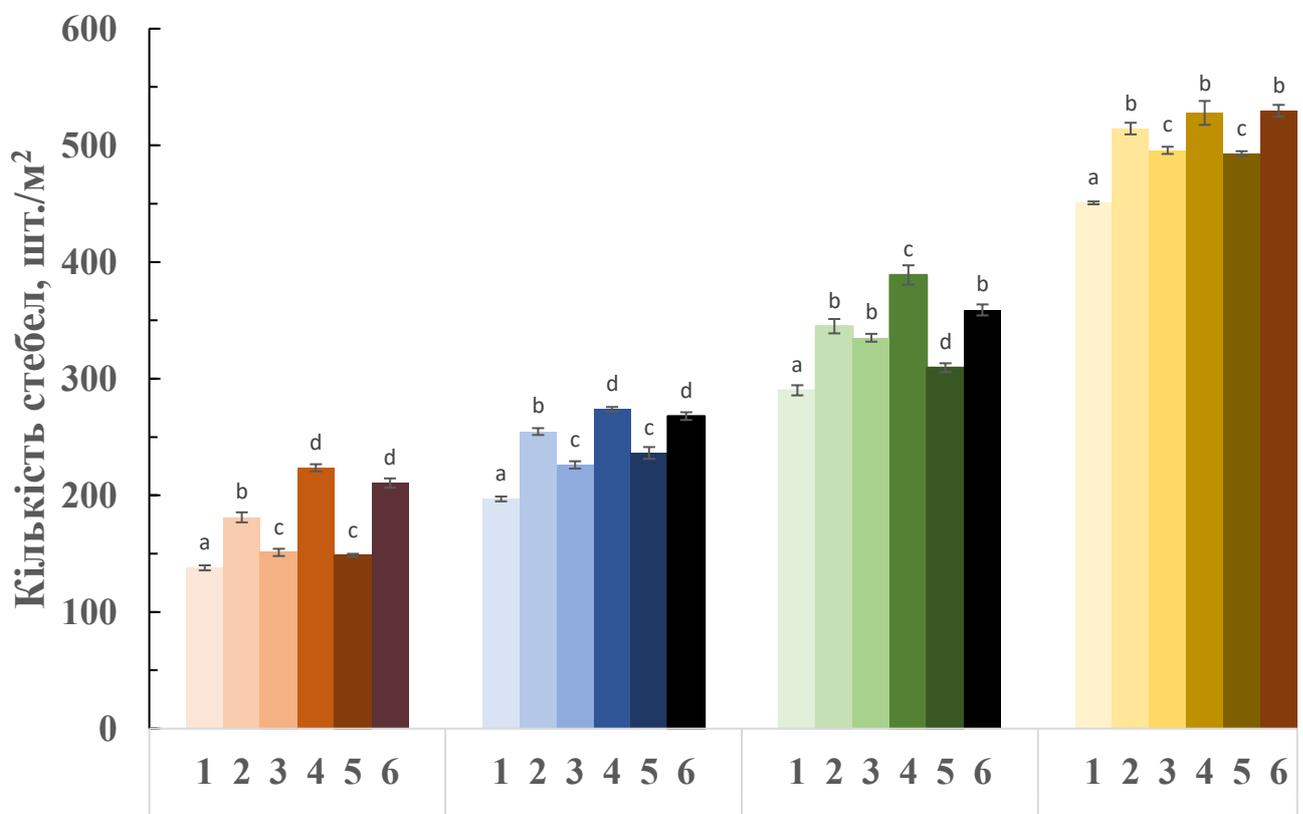
Такі результати свідчать про обмежене надходження елементів живлення у природних умовах, що зумовило слабший розвиток вегетативної маси. Наприкінці вегетації другого року на контролі рослини міскантусу мали кількість пагонів на одній рослині 15,8 штуки. Застосування гуматного добрива БЛЕК ДЖЕК КС сприяло збільшенню показника кількості пагонів міскантусу порівняно з контролем. Максимальну кількість пагонів спостерігалось на варіанті за комбінованого внесення титанового добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан (29,4 шт./рослині). Внесення мінерального удобрення у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ позитивно вплинуло на формування пагонів – їх кількість зростає до 15,5 шт./роsl. – у 2022 році, 21,3 шт./роsl. – у 2023 році; 33,0 шт./роsl. – у 2024 році; 34,0 шт./роsl. – у 2025 рр. відповідно Це свідчить про покращення живлення азотом, фосфором і калієм, що сприяло підвищенню біометричних параметрів.

Позакореневе підживлення за допомогою препаратів БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан забезпечило подальше покращення показників порівняно з контролем. У варіанті БЛЕК ДЖЕК КС кількість пагонів у середньому становила 13,2 шт./роsl. – у 2022 році, 19,0 шт./роsl. – у 2023 році; 31,7 шт./роsl. – у 2024 році; 30,8 шт./роsl. – у 2025 рр. відповідно. Застосування Інтермаг Титан дало схожий результат (14,1–18,2–31,9–31,4 шт./роsl. відповідно). Обидва мікродобрива проявили стимулюючий ефект на кушіння, що пов'язано з покращенням фотосинтетичної активності та посиленням метаболічних процесів у рослинах.

Найвищі показники отримано при комбінованому застосуванні $N_{30}P_{30}K_{30}$ із позакореневими підживленнями. У варіанті $N_{30}P_{30}K_{30}+$ БЛЕК ДЖЕК КС кількість пагонів становила 18,3 шт./роsl. – у 2022 році, 22,3 шт./роsl. – у 2023 році; 37,5 шт./роsl. – у 2024 році; 37,5 шт./роsl. – у 2025 рр., що перевищувало контроль на 60 %.

На контрольному варіанті, де обробку проводили лише водою, показники стеблостою проса прутоподібного були найнижчими упродовж усіх років дослідження: 138,3 шт/м² у 2022 році, 198,1 – у 2023 та 293,3 – у 2024 році та 457,1 (рис. 3.6). У процесі дослідження вивчено вплив різних варіантів мінерального та позакореневого удобрення на кількість стебел проса прутоподібного сорту

Морозко. Згідно із результатами кількість стебел значною мірою залежала від рівня агрохімічного забезпечення рослин. Внесення мінерального добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ позитивно вплинуло на розвиток культури – кількість стебел зросла в середньому на 10–12 % порівняно з контролем. Застосування регулятора росту БЛЕК ДЖЕК КС і мікродобрива Інтермаг Титан дало схожі результати: у 2023 році ці варіанти забезпечили формування 170 та 165 стебел/пог.м відповідно, що свідчить про їхню ефективну дію на стимулювання кущіння. 2024 року ці показники зросли до 240 і 246 стебел/пог.м, що вірогідно пов'язано як із погодними умовами року, так і з накопичувальним ефектом агрохімікатів.



Примітка: вар. 1 - контроль, вар.2 - $N_{30}P_{30}K_{30}$, вар. 3 - БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 4 - Інтермаг Титан, вар. 5 - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 6 - $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан. Дані подані як середнє арифметичне (M) \pm стандартне відхилення (SD).

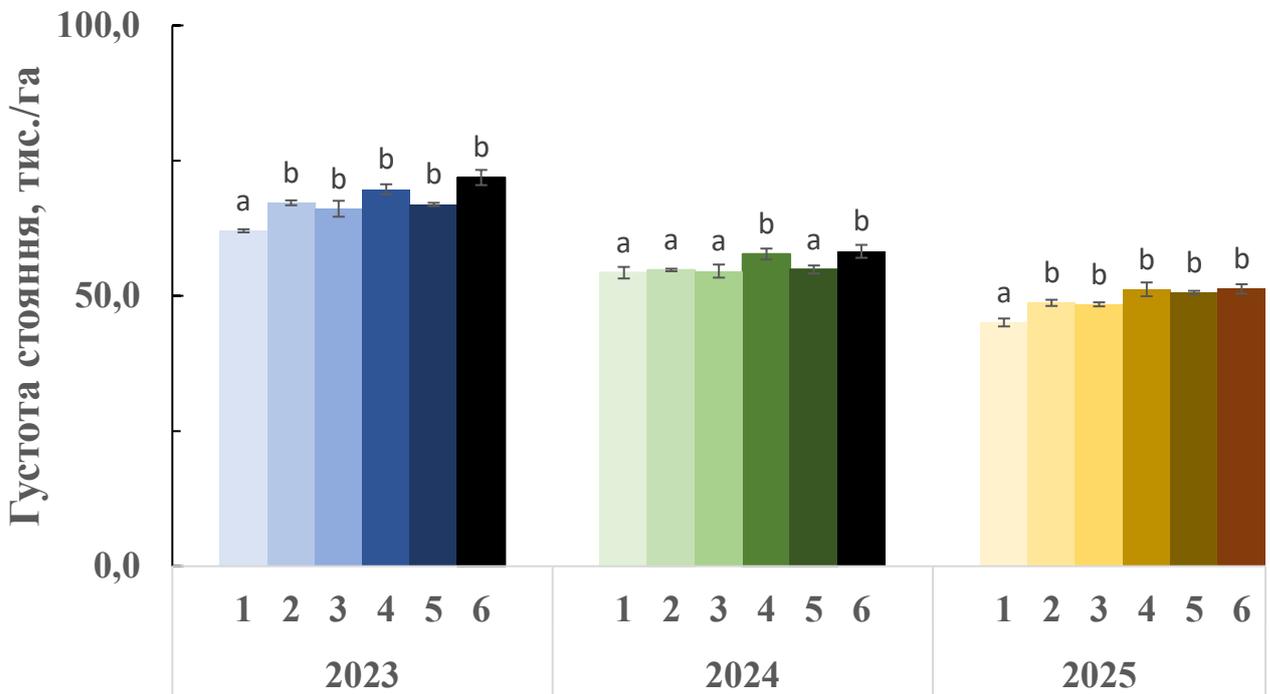
Рис. 3.6. Кількість стебел проса прутоподібного залежно від удобрення, (шт./м²), 2022–2025 рр.

Найвищі результати отримані за поєднання мінерального добрива з позакореневими препаратами. Зокрема, варіант із внесенням $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС у 2024 році забезпечив формування 248 стебел/пог.м, а варіант $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан – 243 стебел/пог.м. Це свідчить про синергетичну дію мінерального живлення та біологічно активних речовин на інтенсивність формування вегетативної маси. Таким чином, застосування комплексних варіантів удобрення сприяло істотному підвищенню кількості стебел проса прутоподібного, що є передумовою для формування високої врожайності зеленої маси.

Показники густоти стояння рослин сорго цукрового варіювали залежно від року проведення досліджень. Найвищу густоту було зафіксовано у 2023 році, що зумовлено сприятливими погодними умовами. Натомість у 2025 році густота стояння була найнижчою через недостатню кількість опадів під час сівби та підвищену суму температур порівняно з попереднім роком дослідження. На контролі спостерігалось поступове зниження показника від 63,3 у 2023 році до 45,1 тис./га у 2025 році, що свідчить про вплив природних умов та відсутність добрив на продуктивність рослин, середнє значення за три роки склало 54,1 тис./га (рис. 3.7).

Застосування мінеральних добрив у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ забезпечило незначне підвищення густоти стеблостою сорго цукрового порівно з контролем: середнє значення за три роки становило 56,6 тис. шт. рослин/га. Це вказує на позитивний ефект мінерального живлення на ріст та розвиток кукурудзи. Використання БЛЕК ДЖЕК КС і Інтермаг Титан окремо призвело до схожого ефекту, із середнім значенням 56,8–57,2 тис. шт. рослин/га., що демонструє стимулюючий вплив на морфологічні показники. Комбіноване внесення мінеральних добрив з біопрепаратами ($N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан) забезпечило максимальні значення показників у всі роки спостереження, зростання яких від 70,4 до 72,3 тис. шт. рослин/га. у 2023 році до 50,8–51,3 тис. шт. рослин/га. у 2025 році, а середнє за три роки становило 59,4–60,7 тис. шт. рослин/га. Це свідчить про синергічний ефект поєднання мінерального живлення та

біопрепаратів, що сприяє стабільнішому росту та підвищенню продуктивності кукурудзи.



Примітка: вар. 1 - контроль, вар.2 – N₃₀P₃₀K₃₀, вар. 3 - БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 4 - Інтермаг Титан, вар. 5 – N₃₀P₃₀K₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС, вар. 6. – N₃₀P₃₀K₃₀ + Інтермаг Титан. Дані подані як середнє арифметичне (M) ± стандартне відхилення (SD).

Рис. 3.7. Густота стояння рослин сорго цукрового у фазу повної стиглості залежно від удобрення (тис. шт. рослин/га), 2023–2025 рр.

Упродовж 2023–2025 років спостерігалися значні відхилення кількості опадів від середньобагаторічних норм, що суттєво вплинуло на агрокліматичні умови. У 2023 році кліматичні умови були сприятливішими для розвитку сорго цукрового, середньомісячна температура повітря в період вегетації (травень–серпень) коливалася від +14°C у травні до +21,1°C у серпні, створюючи стабільні умови для росту рослин. Цей рік відзначався кращим вологозабезпеченням, де за вегетаційний період випало 218,3 мм опадів, причому на період сівби припало 84,0 мм, що сприяло дружнім сходам і швидкому розвитку рослин на стадії кушення. Загалом

вегетаційний період характеризувався сприятливими умовами: переважала тепла погода, а температурні показники відповідали середньобогаторічній нормі.

Натомість 2024 рік характеризувався дефіцитом опадів, а це призвело до зниження запасів ґрунтової вологи та погіршення умов для росту та розвитку сорго цукрового, так як на час сівби випало лише 31 мм, а протягом наступних днів опадів зовсім не спостерігалось. Це негативно вплинуло на появу сходів, густоту стояння рослин і, відповідно, на врожайність культури.

Важливою передумовою реалізації потенційної продуктивності сучасних гібридів кукурудзи є формування оптимальної моделі структури врожаю шляхом раціонального поєднання елементів технології вирощування. Серед них провідне значення має схема розміщення рослин на одиниці площі, адже вона безпосередньо впливає не лише на індивідуальну продуктивність, але й на ефективність використання поживних речовин, сонячної енергії та стійкість агроценозу до впливу шкідливих факторів.

Одним із ключових показників структури врожаю є маса 1000 зерен, яка визначає не лише рівень урожайності, а й якість зерна. Формування цього показника залежить як від біологічних особливостей гібриду, так і від оптимізації елементів агротехнології. Висока маса 1000 зерен сприяє підвищенню енергетичної цінності зерна, зокрема вмісту крохмалю, що має важливе значення для подальшої переробки на біоетанол. Крім того, використання насінневого матеріалу з високою масою 1000 зерен зменшує різницю між потенційною та фактичною врожайністю культури.

Оцінка окремих морфологічних ознак, зокрема маси 1000 зерен, є доцільною поряд із визначенням продуктивності, оскільки ці ознаки є базовими для структури врожаю та чутливо реагують на умови вирощування. При цьому такі елементи, як кількість рядів зерен на качані, мають вищий рівень генетичної детермінації порівняно з продуктивністю чи масою 1000 зерен, адже їх закладання відбувається на ранніх етапах морфогенезу рослини [259].

Формування елементів структури врожаю кукурудзи відбувається на різних етапах органогенезу, що зумовлює специфічні вимоги культури до умов

вирощування [257]. Регулювання процесів формування цих елементів, особливо у критичні фази розвитку, коли рослина зазнає впливу стресових факторів, є запорукою отримання високої продуктивності [194]. За даними В. Д. Паламарчука та ін. [259] і В. А. Мазура та ін. [235], навіть за відносно низьких витрат на насіння (5–20 % загальних витрат), використання високоякісного насінневого матеріалу й адаптованих гібридів дозволяє отримати додатково 20–80% приросту врожаю. Розмір зерна також має важливе значення для початкового росту рослин: більші зерна містять більше запасних речовин в ендоспермі, що забезпечує активний розвиток проростків до формування повноцінної кореневої системи [100].

Досліджено, що на контролі довжина качана становила 15,2 см, діаметр – 4,1 см, маса зерна з качана – 110,2 г, маса 1000 зерен – 275,8 г (табл. 3.1). Використання мінеральних добрив $N_{90}P_{90}K_{90}$ призвело до збільшення всіх показників: довжина качана зросла до 16,4 см, діаметр – до 4,3 см, маса зерна – 143,6 г, а маса 1000 зерен – 279,1 г, що свідчить про позитивний вплив збалансованого внесення NPK на морфометричні показники кукурудзи.

Таблиця 3.1

Елементи структури врожаю кукурудзи залежно від удобрення, (середнє за 2023–2025 рр.)

Варіанти дослідів	Елементи структури врожаю кукурудзи			
	розмір качана за довжиною, см	товщина (діаметр) качана, см	маса зерна з качана, г	вага 1000 зерен, г
Контроль (обробка водою)	15,2	4,1	110,2	275,8
$N_{90}P_{90}K_{90}$	16,4	4,3	143,6	279,1
БЛЕК ДЖЕК КС	16,1	4,2	140,1	278,4
Інтермаг Титан	16,0	4,2	137,5	277,9
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС	17,2	4,5	150,8	292,7
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан	17,0	4,4	148,3	290,5

Використання біопрепаратів БЛЕК ДЖЕК КС і Інтермаг Титан окремо забезпечувало незначне підвищення довжини качана (16,1–16,0 см) і діаметра (4,2 см), а маса зерна з качана становила 137,5–140,1 г, що свідчить про стимулюючий ефект біопрепаратів на розвиток качанів. Комбіноване внесення мінеральних добрив з біопрепаратами $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан забезпечило максимальні показники: довжина качана – 17,2–17,0 см, діаметр – 4,5–4,4 см, маса зерна з качана – 150,8–148,3 г, маса 1000 зерен – 292,7–290,5 г. Це свідчить про синергічний ефект поєднання мінерального живлення та біопрепаратів, що сприяє підвищенню продуктивності та покращенню морфологічних характеристик кукурудзи. Отже, аналіз показників структури врожаю демонструє, що внесення комплексних добрив у поєднанні з біопрепаратами є ефективним заходом для оптимізації структури врожаю кукурудзи та збільшення маси зерна.

РОЗДІЛ 4. ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР ЗА РІЗНОГО УДОБРЕННЯ

Нині, коли наша держава перебуває в умовах воєнного стану та у світі відбуваються глобальні процеси, що спричиняють посилення кризових явищ, зокрема посух, значних втрат зазнає агропромисловий комплекс України, де вісім років із 21 – засушливі, а кожні 3–4 роки – приходить сильна посуха [227; 298], яка згубно позначається на стані посівів сільськогосподарських культур. Тому перед дослідниками виникає питання мінімізації наслідків посухи та інших небезпек аграрного виробництва. Одним із напрямів рішення цього питання є дослідження та впровадження у сівозміни засуховитривалих біоенергетичних культур.

Енергетична стратегія України до 2035 року визначає зростання сектору біоенергетики, що, з одного боку, забезпечить відносну сталість виробництва біопалив за умови наявності достатньої ресурсної бази, а з іншого – створить передумови для формування генеруючих потужностей на місцевому рівні. Передбачається, що до завершення стратегії наша країна постачатиме 11 млн. т н.е. біопалива, що матиме 11,5% в структурі суцільного постачання первинної енергії [289].

Створюючи плантації багаторічних та однорічних енергетичних культур головним завданням є отримання біосировини для наступного виготовлення біопалива різної якості, не зважаючи на тип ґрунту, на якому вони закладаються. Оскільки вони конкурують із традиційними сільськогосподарськими культурами, доцільність їх культивування можна виправдати лише кращими економічними показниками. Адже є багато схем переробки традиційних культур на біопаливо, тому вони не поступаються за ефективністю біоенергетичним культурам, які нерідко не можуть конкурувати за диверсифікацією напрямів переробки отриманої продукції.

4.1. Формування продуктивності багаторічних енергетичних культур під впливом років вегетації та удобрення

Суттєвими чинниками, які визначають продуктивність міскантусу гігантського, є біометричні показники рослин. Це підтверджується дослідженнями М.Я. Гументика та інших науковців [166], де зазначається, що мінливість кількісних ознак рослин пов'язана як з елементами технології вирощування та погодними умовами упродовж періоду вегетації. Не менш вагомим фактором також є видові особливості культури за багаторічного та однорічного циклу культивування, а саме збільшення кореневої маси та висоти стеблостою, відростання із сплячих бруньок нових пагонів тощо. Також за результатами досліджень цього автора, доведено ефективність сумісного культивування проса прутоподібного та міскантусу гігантського [167]. Іншими вченими визначено, що для міскантусу гігантського можна отримати врожайність біомаси на рівні 12–16 т/га (до 25,0 т/га) сухої речовини за дотримання всіх вимог технологічних операцій при вирощуванні цієї культури [17; 138]. Урожайність міскантусу визначається впливом таких факторів як: забезпечення теплом та вологою, елементами живлення, фізичним станом ґрунту і забур'яненістю посівів.

Аналіз чотирирічних даних (2022–2025 рр.) свідчить, що врожайність зеленої біомаси міскантусу характеризується стійким підвищенням у міру входження культури в повну продуктивність (3–4-й роки вегетації) та істотно варіює залежно від системи удобрення. Для всіх варіантів, включно з контролем, спостерігається: різке зростання врожайності з 2022 на 2023 рік (у 7–9 разів), що відповідає біології міскантусу, який у перший рік формує кореневу систему та вегетативну масу з поступовим накопиченням потенціалу. Також ми отримали максимальні значення 2024 року, що вказує на найбільш сприятливе поєднання погодних умов та біологічної зрілості плантації та подальше певне зниження врожаю 2025 року, характерне для культур із багаторічним циклом у варіаціях погодного режиму. Таким чином, багаторічна динаміка демонструє чіткий тренд до стабілізації

врожайності на високому рівні у третій–четвертий роки вирощування з подальшим зниженням під впливом кліматичних чинників.

Урожайність зеленої біомаси міскантусу гігантського сорту Осінній зорецвіт за ці роки становила від 4,34 до 51,41 т/га (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Динаміка урожайності зеленої біомаси міскантусу гігантського, т/га

Варіант	Урожайність біомаси, т/га				
	2022	2023	2024	2025	Середнє за 4 роки
Контроль (обробка водою)	4,34	34,17	35,72	30,10	26,08
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	5,64	44,42	47,74	39,12	34,23
БЛЕК ДЖЕК КС	5,21	41,04	44,06	36,12	31,61
Інтермаг Титан	4,99	39,30	42,23	34,62	30,29
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	6,07	47,84	51,41	42,14	36,87
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	5,86	46,13	49,57	40,64	35,6
НІР _{0,05}	0,56	2,37	3,45	5,61	4,23

В середньому за 4 роки на контролі вона була на рівні 26,08 т/га, що відображає потенціал сорту на природному фоні родючості, а при внесенні мінеральних добрив в нормі N₃₀P₃₀K₃₀ вона зросла на 8,15 т/га., або на 31 % вище порівняно з контролем. Подібно, використання препаратів БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан у чистому вигляді сприяло підвищенню продуктивності до 31,61 та 30,29 т/га відповідно, що свідчить про їх стимулюючу дію на ріст і розвиток рослин. Обидва препарати забезпечують позитивний ефект, однак їх ефективність нижча за НРК, що підтверджує ключову роль основних елементів живлення у формуванні біомаси міскантусу. Мікродобрива працюють як фактори інтенсифікації, але не можуть повністю компенсувати нестачу макроелементів.

Максимальні показники отримано за поєднання мінерального удобрення з біостимуляторами. Варіант $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС забезпечив максимальну середню врожайність – 36,87 т/га, що на 10,79 т/га ($\approx 41\%$) перевищує контроль і на 2,64 т/га – варіант із одним лише $N_{30}P_{30}K_{30}$. Дещо нижчою, але також високою була продуктивність у варіанті $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан – 35,60 т/га. Отже, мінеральне живлення забезпечує найстабільнішу та найпередбачуванішу реакцію культури, оскільки коливання врожайності між роками менші, ніж у контролі чи мікродобрив.

2022 року урожайність на всіх варіантах була найнижчою за весь період досліджень: від 4,34 т/га у контролі до 6,07 т/га у варіанті з $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС. Це свідчить про несприятливі кліматичні умови року, за яких потенціал міскантусу гігантського був реалізований тільки частково. Однак навіть у цих умовах внесення мінеральних добрив забезпечувало приріст продуктивності в межах 0,6–1,7 т/га.

У 2023 році відбулося різке зростання урожайності на всіх варіантах досліді, що може бути пов'язано з більш оптимальним забезпеченням вологою та теплом. На контролі показник збільшився до 34,17 т/га, а найбільші значення спостерігали на варіантах за комплексного внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС (47,84 т/га) та $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан (46,13 т/га). Порівняно з 2022 роком приріст становив 7–8-кратне зростання врожайності.

Тенденція до високої продуктивності зберігається і у 2024 році, хоча в більшості варіантів урожайність дещо зростає порівняно з 2023 роком. Найвищі показники зафіксовано на варіантах комбінованого удобрення: 51,41 т/га за $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та 49,57 т/га – $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан. Це вказує на стабільну ефективність поєднання мінерального живлення з біостимуляторами.

У 2025 році порівняно, з 2024 роком, на всіх варіантах спостерігається певне зниження врожайності, що, ймовірно, пов'язано з менш сприятливими кліматичними умовами. Урожайність на контролі зменшилася до 30,10 т/га, тоді як варіанти з комбінованим удобренням демонстрували 40,64–42,14 т/га, зберігаючи перевагу над іншими варіантами досліді.

Якщо прийняти контроль за 100 %, то середні рівні врожайності становлять: NPK – 131 %, БЛЕК ДЖЕК КС – 121 %, Інтермаг Титан – 116 %, NPK + БЛЕК ДЖЕК КС – 141 %, NPK + Інтермаг Титан – 136 %. Таким чином, домінуючим фактором підвищення продуктивності є мінеральне живлення, а максимального ефекту досягають комбіновані варіанти. Стабільність врожайності (менша міжрічна амплітуда) також зростає у варіантах із NPK, що свідчить про пом'якшення впливу погодно-кліматичних коливань за рахунок оптимізації мінерального живлення. Мікродобрива проявляють модифікуючий ефект, посилюючи дію NPK на 4–8 %. Їхня дія самостійно менш ефективна, але у складі комплексної системи живлення вони підвищують результативність технології.

Отже, міскантус гігантський сорту Осінній зорецвіт характеризується високою реактивністю на системи удобрення, що підтверджується зростанням врожайності в 1,2–1,4 раза порівняно з контролем. Найбільший внесок у формування біомаси забезпечують макроелементи, тоді як мікродобрива виступають каталізаторами фізіологічних процесів. Комбіновані варіанти NPK + мікродобрива забезпечують синергію живлення, що створює найсприятливіші умови росту і розвитку культури. А за всі роки досліджень найвищу продуктивність забезпечив варіант $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС (36,87 т/га).

Отримання максимально економічно належного врожаю культур можливе тільки за умови оптимізації технології вирощування проса прутоподібного з урахуванням раціонального застосування усіх факторів, а саме через правильний їх підбір регулюється ріст та розвиток рослин. Проведенні експериментальні дослідження демонструють, що при довготривалому вирощуванні проса прутоподібного суттєвий вплив на урожайність сирої маси рослин мали погодні умови і роки вирощування культури.

Просо прутоподібне як багаторічна злакова енергетична культура демонструє поступове нарощування врожайності у міру становлення травостою та стабільно реагує на системи удобрення. У 2022–2025 рр. спостерігається стійке щорічне зростання врожайності у всіх варіантах, що характерно для багаторічних злаків у фазі становлення кореневищної системи а найбільші прирости

відбуваються у 2023–2024 роках (табл. 4.2). У 2025 році культура досягає максимальної продуктивності, але темпи збільшення знижуються, що є типовим при виході насаджень у стабільну фазу розвитку.

Результатами дослідження встановлено, що врожайність проса прутіподібного на контролі (обробка водою) зростає з 12,2 т/га (2022 рік) до 18,0 т/га (2025 році) при цьому середнє багаторічне значення – 15,13 т/га. Отже, контроль формує базовий рівень продуктивності, який відображає потенціал сорту за рахунок природної родючості ґрунту. Фактичне зростання врожайності на 47% із року в рік вказує на природне становлення багаторічної культури без додаткового живлення.

Таблиця 4.2

Урожайність вегетативної маси проса прутіподібного залежно від удобрення та років вирощування, т/га

Варіант	Урожайність, т/га				
	2022	2023	2024	2025	Середнє за 4 роки
Контроль (обробка водою)	12,2	13,5	16,8	18,0	15,13
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	15,9	16,3	18,7	21,6	18,13
БЛЕК ДЖЕК КС	14,1	15,7	19,9	20,9	17,65
Інтермаг Титан	13,9	15,1	19,2	20,6	17,20
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	17,8	18,2	22,1	23,2	20,33
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	18,3	17,9	21,5	22,9	20,15
НІР _{0,05}	0,24	0,28	0,49	0,45	0,36

Встановлено, що використання добрив істотно впливало на продуктивність культури. Застосування мінеральних добрив у нормі N₃₀P₃₀K₃₀ позитивно вплинуло на приріст зеленої маси, урожайність проса прутіподібного зросла в середньому на 30,2 %, та становила 21,6 т/га у 2025 році, що є найвищим значенням серед усіх

монокомпонентних варіантів. В середньому за роки дослідження вона була 18,13 т/га, що на +3,00 т/га ($\approx +20\%$) більше контролю. Отже, мінеральне добриво істотно підвищує продуктивність, формуючи стабільну позитивну реакцію рослин на основні елементи живлення. Внесення макро добрив зменшує різницю між роками, що вказує на підвищення стабільності врожайності, особливо в умовах змінних кліматичних факторів.

Використання мікродобрива БЛЕК ДЖЕК КС забезпечувало середню урожайність 17,65 т/га, приріст до контролю +2,52 т/га (+17%). А за використання Інтермаг Титан середня урожайність 17,20 т/га, приріст +2,07 т/га (+14%). Отже, обидва мікродобрива демонструють модеруючу дію, підсилюючи фізіологічні процеси росту. Їх ефективність нижча, ніж у NPK, але вони забезпечують стабільне додаткове нарощування біомаси. Адже мікродобрива підсилюють фізіологічні механізми формування врожаю, але не замінюють основного живлення макроелементами.

Синергія мінерального живлення з мікродобривами $N_{30}P_{30}K_{30}+$ БЛЕК ДЖЕК КС сприяла отриманню урожайності в середньому 20,33 т/га, що на +5,20 т/га (+34%) більше контролю. У 2025 р. – 23,2 т/га, один із двох найвищих показників у досліді. Отже, порівняно з NPK, додавання мікродобрива забезпечило додаткові +2,20 т/га, що підтверджує синергічний ефект взаємодії макро- і мікроелементів.

Аналогічно за використання $N_{30}P_{30}K_{30}+$ Інтермаг Титан середня урожайність була 20,15 т/га, приріст до контролю +5,02 т/га (+33%), а максимум 2025 року – 22,9 т/га. Результат дуже близький до варіанта з БЛЕК ДЖЕК КС, але трохи нижчий. Проте синергічний ефект зберігається, що свідчить про універсальність поєднаної дії мінеральних добрив та мікроелементів. Отже, домінуючий вплив на врожайність має внесення NPK, а мікродобрива посилюють дію макроелементів у середньому на 6–8%.

Загалом, максимальний ефект серед цих варіантів відмічено у варіанті з препаратом БЛЕК ДЖЕК КС – 19,9 т/га у 2024 році та 20,9 у 2025 році. Максимальна прибавка врожаю заіксовано за комплексного внесення $N_{30}P_{30}K_{30}+$ БЛЕК ДЖЕК КС на 34,6% порівняно з контролем. У варіантах $N_{30}P_{30}K_{30}+$ БЛЕК

ДЖЕК КС та $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан урожайність досягла відповідно 22,1 і 21,5 т/га у 2024 році та 23,2 – 22,9 т/га у 2025 році.

Отже, просо прутоподібне сорту Морозко демонструє високу чутливість до систем удобрення, з приростом від 14 % до 34 % залежно від застосованих препаратів. Найбільш ефективними є комбіновані варіанти мінеральні добрива + мікродобрива, що забезпечують максимальну продуктивність (20,15–20,33 т/га в середньому). Основна частина приросту врожайності формується за рахунок NPK, тоді як мікродобрива відіграють роль підсилювачів. А стабільність продуктивності зростає у варіантах із повним живленням, що свідчить про підвищення адаптивності культури до погодних умов. Також за досліджуваний період урожайність збільшувалася щорічно, що підтверджує високу пластичність та продуктивний потенціал проса прутоподібного як енергетичної культури.

4.2. Урожайність однорічних енергетичних культур залежно від рівня мінерального живлення

Серед різних технологічних заходів, які сприяють збільшенню ефективності реалізації потенціалу енергетичних культур, в тому числі сорго цукрового та кукурудзи, мінеральні добрива. Особливо важливу роль відіграють азотні добрива, оскільки азот у більшості випадків виступає лімітуючим елементом живлення для зернових культур [87]. Залежно від ґрунтово-кліматичних умов та сортових особливостей виявлятиметься неоднакова реакція сорго цукрового і кукурудзи на застосування добрив [112]. За результатами досліджень J.T. Tsialtas та інших доведено, що азотні добрива підвищують вміст сахарози, а також прискорюють ріст сорго цукрового [109]. Крім того, використання мінеральних добрив, а особливо азотних та калійних збільшує продуктивність сорго на 15–17 % [81]. Вплив азоту на ріст та вихід соку з рослин сорго цукрового залежить від ґрунтово-кліматичних умов та сортових властивостей, тому використання мінеральних добрив викликає зростання цих показників. Оптимальна доза азотних добрив становить від 60 до 120 кг/га діючої речовини залежно від умов [318]. Дослідженнями О.О. Марчука

[242] доведено, що застосування мінеральних добрив сприяло зростанню сухої речовини в рослин сорго цукрового. Найкращі показники врожайності спостерігались у сорту Фаворит (54,7–114,5 т/га) за застосування мінерального удобрення у нормі $N_{160}P_{160}K_{160}$. Мінеральні добрива неоднаково впливають на продуктивність рослини сорго цукрового, це обумовлено їх хімічною природою, дозами й способами застосування, термінами внесення, а також специфічними ґрунтово-кліматичними умовами зони вирощування культури. Раціональний добір видів добрив, визначення їх оптимальних доз і своєчасне внесення у ґрунт є необхідними умовами забезпечення стабільної врожайності сорго та формування високоякісної сировини з підвищеним виходом біопалива [62].

За результатами досліджень встановлено, що протягом трьох років вирощування сорго цукрового на дерново-підзолистому середньосуглинковому глеюватому ґрунті у фазі воскової стиглості залежно від удобрення урожайність була на рівні від 43,2 т/га на контролі у 2025 році до 80,9 т/га на варіанті із $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан в 2023 році (табл. 4,3).

Таблиця 4,3

Урожайність зеленої маси сорго цукрового у фазі воскової стиглості залежно від удобрення

Варіанти	Урожайність біомаси, т/га			
	2023	2024	2025	Середнє за 3 роки
Контроль (обробка водою)	60,5	51,3	43,2	51,7
$N_{30}P_{30}K_{30}$	74,6	65,4	57,5	65,8
БЛЕК ДЖЕК КС	73,9	63,8	55,7	64,5
Інтермаг Титан	73,5	64,0	54,3	63,9
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС	79,7	69,3	60,1	69,7
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан	80,9	70,4	60,2	70,5
$HP_{0,05}$	1,59	0,95	1,08	1,21

Урожайність залежала від року та системи удобрення, суттєвим впливом погодних умов, що виражається у максимально високих показниках 2023 р. та поступовому зниженні врожайності у 2024–2025 рр. та стабільною позитивною реакцією культури на мінеральні та мікродобрива, особливо у комбінованих варіантах.

Сорго, як теплолюбна та високопластична культура, демонструє високу здатність до нарощування зеленої маси за умов достатнього рівня живлення та волого забезпечення. Контроль без добрив відображає природний потенціал сорту Фаворит без додаткового внесення мінеральних елементів. Тенденція до зниження врожаю з 2023 до 2025 року відображає вплив кліматичних умов та потребу культури у додатковому живленні в періоди стресу. На контролі (обробка водою) урожайність зеленої маси сорго цукрового за період досліджень в середньому становила 51,7 т/га. Внесення мінеральних добрив в нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ забезпечило приріст урожайності на 14,1 т/га порівняно з контролем. Мінеральне живлення забезпечує суттєве підвищення врожайності, що пояснюється активним поглинанням азоту на етапах інтенсивного росту, роллю фосфору у формуванні кореневої системи, значенням калію для накопичення цукрів та водного режиму рослин. Як наслідок, NPK забезпечує найбільший вплив серед усіх монокомпонентних варіантів.

Використання регулятора росту БЛЕК ДЖЕК КС дозволило досягти врожайності – 64,5 т/га. Обробка посівів мікродобривом Інтермаг Титан підвищила урожайність до 63,9 т/га, що перевищило контрольний варіант на 12,2 т/га. Найбільший показник урожайності – 70,5 т/га – спостерігався за умов комбінованого застосування добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ та мікродобрива Інтермаг Титан, що забезпечило приріст на 26,7 % порівняно з контролем. Високий результат також отримано у варіанті спільного використання $N_{30}P_{30}K_{30}$ і БЛЕК ДЖЕК КС – 69,7 т/га.

Максимальний ефект відмічено у варіанті з препаратом $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан – 80,9 т/га 2023 році, 70,4 у 2025 році та 60,2 т/га. Це свідчить про синергетичну дію макро- та мікродобрив на формування вегетативної маси культури сорго цукрового. Найкращим за продуктивністю спостерігався 2023 рік,

в якому врожайність була на рівні 60,5–80,9 т/га. Цьому сприяли сприятливі кліматичні умови для росту та розвитку рослин а також оптимальний догляд за ними.

Продуктивність кукурудзи формується під впливом комплексу структурних елементів урожаю, серед яких основними є кількість рядів зерен на качані, число зерен у ряді, маса 1000 зерен, кількість качанів на рослині, довжина та діаметр качана, а також вихід зерна з качана. Визначення цих показників дозволяє прогнозувати біологічну врожайність гібридів кукурудзи ще до початку збиральних робіт [194; 305].

За результатами дослідження протягом 2023 – 2025 років встановлено, що в середньому за три роки найнижчу врожайність зерна кукурудзи спостерігали на контролі (без добрив, обробка водою) – 6,73 т/га. (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Урожайність зерна кукурудзи гібриду Мантікора

Варіанти дослідів	Роки дослідження			Середнє за роки
	2023	2024	2025	
Контроль (без добрив)	6,98	6,63	6,59	6,73
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	10,90	10,57	9,61	10,36
БЛЕК ДЖЕК КС	10,76	10,36	9,43	10,18
Інтермаг Титан	10,81	10,38	9,35	10,16
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	11,16	10,74	10,27	10,72
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + Інтермаг Титан	11,14	10,67	10,09	10,63
НІР _{0,05}	0,24	0,22	0,22	0,23

Застосування мінеральних добрив в нормі N₉₀P₉₀K₉₀ дало змогу істотно збільшити врожайність – у середньому до 10,36 т/га, що становить +3,63 т/га або +35,0 % порівняно з контролем. Застосування мінеральних добрив забезпечило непропорційно високий приріст продуктивності 3,63 т/га до контролю (+54 %).

Азотно-фосфорно-калійне живлення є критичним для формування зерна, оскільки N визначає інтенсивність наростання асиміляційної поверхні, P впливає на розвиток кореневої системи та запилення, а K забезпечує водний баланс і наповнення зерна. Порівнянно з контролем, урожайність зростає в 1,53 раза, що свідчить про високий рівень ефективності мінерального удобрення.

Використання регулятора росту БЛЕК ДЖЕК КС дозволило досягти врожайності 10,18 т/га. Обробка посівів мікродобривом Інтермаг Титан підвищила урожайність до 10,16 т/га, що більше контролю на 3,43 т/га. Найвищий показник урожайності – 10,72 т/га – зафіксовано за умов комбінованого застосування добрива $N_{30}P_{30}K_{30}$ та біостимулятора БЛЕК ДЖЕК КС, що забезпечило приріст на 37,2 % порівняно з контролем. Високий результат також отримано у варіанті спільного використання мінеральних добрив $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан – 10,63 т/га.

Протягом трьох років вирощування кукурудзи на зерно гібриду Мантікора, найкращим по урожайності був 2023 рік, що може бути пов'язано з більш оптимальним забезпеченням вологою та теплом. На контролі показник становив 6,98 т/га, а найбільші значення спостерігали на варіантах із внесенням $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС (11,16 т/га) та $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан (11,14 т/га).

У 2024 році спостерігалась тенденція до зниження продуктивності порівняно з 2023 роком. Найвищі показники зафіксовано на варіантах комбінованого удобрення: 10,74 т/га за $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та 10,67 т/га – $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан. Це вказує на стабільну ефективність поєднання мінерального живлення з біостимуляторами. У всіх варіантах дослідів у 2025 році спостерігається певне зниження врожайності порівняно з попередніми роками, що пов'язано з менш сприятливими кліматичними умовами. Урожайність на контролі зменшилася до 6,59 т/га, тоді як варіанти з комбінованим удобренням демонстрували 10,09–10,27 т/га, зберігаючи перевагу над іншими варіантами дослідів.

Кукурудза гібриду Мантікора має високий генетичний потенціал продуктивності, що реалізується лише за умов оптимального мінерального та мікроелементного живлення. Застосування NPK забезпечує найпотужніший вплив

– +54 % до контролю, що виводить урожай на рівень 10,36 т/га. Мікродобрива окремо також забезпечують високий приріст – +51 %, але найвищий ефект проявляється у поєднанні з мінеральними добривами, що підвищує урожайність до $\geq 10,63$ т/га. А комбіноване удобрення формує найвищу і найстабільнішу врожайність, що робить його оптимальним для інтенсивних технологій вирощування гібриду Мантікора.

Побічна продукція кукурудзи, яка включає стебла, листки та обгортки качана, є важливим компонентом біомаси культури, особливо в контексті енергетичних технологій, тваринництва (сінаж, підстилка) та ґрунтозбагачення. Урожайність побічної продукції залежить як від генетичних особливостей гібриду, так і від рівня забезпечення рослин елементами живлення. Для гібриду Мантікора характерна висока стабільність формування вегетативної біомаси, що підтверджується порівняно вузьким діапазоном варіації показника – від 16,09 до 18,15 т/га за три роки досліджень. Це свідчить про здатність гібриду підтримувати продуктивність навіть за різних погодних умов. На контролі, де добрива не вносилися, середня врожайність за три роки становила 16,20 т/га, а показники за роками залишалися відносно стабільними (16,09–16,38 т/га) (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Урожайність зеленої маси кукурудзи гібриду Мантікора

Варіанти дослідів	Роки дослідження			Середнє за роки
	2023	2024	2025	
Контроль (обробка водою)	16,38	16,13	16,09	16,20
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	17,92	17,17	16,81	17,30
БЛЕК ДЖЕК КС	17,26	17,01	16,43	16,90
Інтермаг Титан	17,31	17,06	16,45	16,94.
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	18,10	17,74	17,27	17,70
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + Інтермаг Титан	18,15	17,67	17,19	17,67
НІР _{0,05}	0,43	0,32	0,40	0,38

Застосування мінерального удобрення у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ сприяло підвищенню продуктивності: середній показник зріс до 17,30 т/га, що перевищує контроль понад 1 т/га. Таким чином, порівняно з контролем внесення $N_{90}P_{90}K_{90}$ забезпечує 6,8 % приросту побічної біомаси, що підтверджує важливу роль макроелементів у підтриманні фотосинтетичного потенціалу рослин та накопиченні структурних компонентів стебла. Примітно, що хоча загальна врожайність зерна за NPK зростає на понад 50 %, приріст побічної біомаси є помірнішим, що свідчить про перерозподіл асимілятів на користь генеративних органів – типовий ефект інтенсивного удобрення.

Аналогічну тенденцію відмічено за використання препарату БЛЕК ДЖЕК КС, де середня врожайність становила 16,90 т/га, а також Інтермаг Титан – 16,94 т/га. Порівнюючи дію мікродобрив із дією мінеральних добрив, можна відзначити, що мінеральне живлення забезпечує вищий ефект, проте мікродобрива дають вищу стабільність між роками, оскільки різниця між мінімальним і максимальним значенням становить лише 0,83–0,86 т/га, порівняно з 1,11 т/га у варіанті з NPK. Це свідчить про те, що мікроелементи позитивно впливають на стійкість рослин до стресів та підтримують функціонування фотосинтетичного апарату.

Найвищі показники продуктивності забезпечили комбіновані варіанти удобрення. Поєднання мінеральних добрив $N_{90}P_{90}K_{90}$ з препаратом БЛЕК ДЖЕК КС забезпечило середню врожайність 17,70 т/га, тоді як комбінація $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан сформувала 17,67 т/га зеленої маси. Це свідчить про синергічний ефект поєднання макро- та мікроелементного живлення, що проявлявся у стабільному прирості врожайності порівняно з окремим застосуванням препаратів.

У перший рік досліджень урожайність варіювала від 16,38 т/га на контролі до 18,15 т/га за поєднання $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан. Застосування макродобрив ($N_{90}P_{90}K_{90}$) забезпечило приріст на 1,54 т/га порівняно з контролем. Застосування препаратів БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан підвищувало врожайність до 17,26–17,31 т/га, тоді як комбіновані їх варіанти мали найвищі показники (18,10–18,15 т/га).

У 2024 році урожайність дещо знизилася у всіх варіантах. На контролі вона становила 16,13 т/га, у варіанті $N_{90}P_{90}K_{90}$ – 17,17 т/га, а за використання біопрепаратів – 17,01–17,06 т/га. Комбінації добрив і мікродобрив також показали нижчі результати порівняно з попереднім роком (17,67–17,74 т/га), що могло бути пов'язано з погодними умовами.

У третьому році спостерігалось подальше, хоча й незначне, зниження врожайності. Контрольний показник зменшився до 16,09 т/га. За внесення $N_{90}P_{90}K_{90}$ урожайність становила 16,81 т/га. Застосування БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан дало 16,43–16,45 т/га. Комбіновані варіанти забезпечили урожайність 17,19–17,27 т/га, що залишилося найвищим рівнем серед усіх варіантів, але також нижчим порівняно з першими двома роками.

Підсумовуючи, упродовж 2023–2025 рр. у всіх варіантах спостерігалось поступове зниження врожайності, однак структура впливу добрив залишалася стабільною: найефективнішими залишалися комбінації $N_{90}P_{90}K_{90}$ з мікродобривами, тоді як контроль демонстрував найнижчі показники у всі роки.

Встановлено, що використання мінеральних добрив у поєднанні з регуляторами росту або мікродобривами є найбільш ефективним способом підвищення продуктивності кукурудзи гібриду Мантікора в умовах Передкарпаття Західного регіону України.

4.3. Формування показників якості однорічних енергетичних культур

Рівень рентабельності аграрного виробництва зумовлюється не лише показниками урожайності сільськогосподарських культур, а й якісними властивостями отриманої продукції. Якість зерна формується в результаті складної взаємодії природно-кліматичних умов, ґрунтових характеристик та застосованих агротехнологій. Внесення добрив виступає ефективним інструментом регулювання біосинтетичних процесів у рослинах, дозволяючи спрямовано формувати якісний склад зерна відповідно до потреб споживача.

Сорго цукрове має здатність накопичувати у стеблах рослин значну концентрацію розчинних цукрів і вміст сухої речовини. Воно є багатофункціональним у переробці на біопаливо, тому що після того як отримали сироп, стебла та листя можуть використовуватись для виробництва твердих видів палива. Відповідно якість отриманої сировини з сорго цукрового варто оцінювати за даними вмісту сухої речовини та валового вмісту цукрів [249]. Вагомим аспектом при вирощуванні сорго цукрового в кінці вегетаційного періоду є визначення вмісту сухих речовин, оскільки рослини фізіологічно до початку цвітіння накопичується приблизно 50 % загальної маси сухих речовин, після чого в період запліднення та формування насіння відбувається їх інтенсивне перенесення в зерно. Подібним чином, в межах рослини сорго цукрового здійснюється перерозподіл запасних поживних речовин який ніяк не можна визначити згідно методик обчислення чистої продуктивності фотосинтезу [225; 237]. Наведені дані, які характеризують формування врожайності сухої речовини сорго цукрового сорту Фаворит під впливом різних систем удобрення протягом 2023–2025 рр. подано в таблиці (табл. 4.1), де чітко простежується зростання продуктивності культури за рахунок застосування як мінеральних, так і позакореневих препаратів.

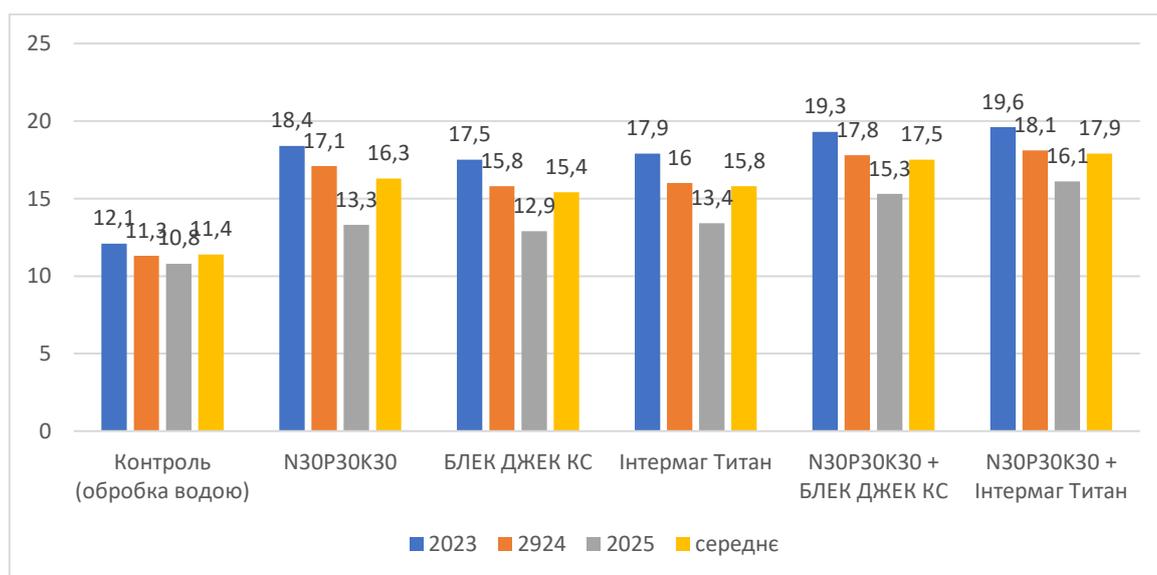


Рис. 4.1.Збір сухої речовини сорго цукрового залежно від удобрення, т/га

На контролі збір сухої речовини становив у середньому 11,4 т/га, із тенденцією до зниження показника впродовж трирічного періоду (від 12,1 т/га у 2023 р. до 10,8 т/га у 2025 р.). Застосування мінеральних добрив у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ сприяло підвищенню врожайності – до 16,3 т/га в середньому за роки досліджень, що на 4,9 т/га перевищувало контроль. Використання препаратів БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан як окремих факторів також сприяло покращенню накопичення сухої речовини – у середньому 15,4 і 15,8 т/га відповідно, що свідчить про ефективність стимуляції обмінних процесів та підвищення стійкості рослин до стресових умов.

Найвищі показники отримано за поєднання мінерального удобрення з позакореневими препаратами. Варіанти $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан забезпечили 17,5 та 17,9 т/га сухої речовини відповідно. Такі результати демонструють синергійний ефект комбінованої дії елементів живлення та біостимуляторів, що оптимізує ріст і продуктивність сорго.

Визначення загального вмісту цукрів соку стебел рослин сорго є ваговимим показником від якого залежить наскільки продуктивним буде виробництво. Результати досліджень Н.О. Григоренко та інших показують, що стебло сорго цукрового містить 12–20 % загальних цукрів, з яких 50–80 % становить сахароза, а 20–40 % – глюкоза та фруктоза [162; 192; 320]. Згідно з дослідженнями інших авторів доведено, що вміст цукрози в соку стебел рослин зростає у міру дозрівання насіння сорго та є найвищим у фазу повної стиглості. Уміст глюкози та фруктози, як правило, досягає максимальних значень у фазі молочної стиглості зерна. Надалі, до настання повної стиглості, в рослині посилюються процеси перетворення моносахаридів на цукрозу. Ця трансформація не супроводжується енергетичними втратами, оскільки молекула цукрози містить удвічі більше енергії порівняно з окремими простими цукрами. Водночас спостерігається зменшення загального вмісту цукрів, що зумовлено перебудовою вуглеводного комплексу в ході дозрівання [129; 152; 162; 237; 275; 276]. Отже, огляд наукових джерел підтверджує, що раннє збирання врожаю сорго є недоцільним, оскільки накопичення та трансформація цукрів у рослинах триває до настання фізіологічної

стиглості зерна. Водночас після завершення ростових процесів відбувається повільне розкладання вуглеводів у соку стебел, тому значне відтермінування строків збирання також не рекомендується [123].

За період дослідження впродовж 2023–2024 років простежується закономірне зростання вмісту цукрів від початку генеративного розвитку до настання молочної та фізіологічної стиглості зерна, що узгоджується з відомими фізіолого-біохімічними процесами формування цукронакопичення в сорго. На контролі вміст загальних цукрів коливався від 3,0 % у фазі викидання волоті до максимальних 15,1 % у молочній стиглості, після чого незначно знижувався до 13,5 % у фізіологічній стиглості зерна (табл. 4.6). Застосування мінерального удобрення у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ забезпечило підвищення концентрації цукрів на всіх етапах онтогенезу: від 3,3 % у ранній генеративній фазі до 15,9 і 14,4 % у фазах молочної та фізіологічної стиглості відповідно.

Таблиця 4.6

Вміст загальних цукрів у соці стебел сорго цукрового сорту Фаворит залежно від удобрення, %

Варіанти	Вміст загальних цукрів			
	викидання волоті	цвітіння	молочна стиглість зерна	фізіологічна стиглість зерна
Контроль (обробка водою)	3,0	7,2	15,1	13,5
$N_{30}P_{30}K_{30}$	3,3	7,6	15,9	14,4
БЛЕК ДЖЕК КС	3,2	7,4	14,5	13,7
Інтермаг Титан	3,2	7,5	14,7	13,9
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС	3,4	7,9	16,1	15,1
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан	3,5	8,0	16,2	15,2

Позакореневі препарати БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан позитивно впливали на інтенсивність цукронакопичення, проте їх дія була дещо слабшою порівняно з основним мінеральним удобренням. У молочній стиглості ці варіанти забезпечили відповідно 14,5 та 14,7 % загальних цукрів, що перевищувало контроль, але поступалося показникам варіанту $N_{30}P_{30}K_{30}$. Найвищу концентрацію цукрів отримано за поєднаного застосування мінерального удобрення з біостимуляторами. Варіанти $N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан досягли максимальних значень – 16,1–16,2 % у молочній стиглості та 15,1–15,2 % у фізіологічній стиглості зерна. Це свідчить про синергічний ефект елементів живлення та стимуляторів росту, що сприяє посиленню транспорту асимілянтів та підвищенню біохімічної активності рослин.

Таким чином, найефективнішим щодо підвищення цукронакопичення в стебловому соці сорго є поєднання мінерального удобрення з позакореневими препаратами, тоді як окреме їх застосування забезпечує помірне підвищення цього показника порівняно з контролем.

Формування якісних характеристик зерна кукурудзи є важливою передумовою раціонального використання врожаю, зокрема можливості спрямування його частини на виробництво біоетанолу без негативного впливу на продовольчу безпеку країни. В Україні питання підвищення ефективності виробництва зерна має стратегічне значення, адже якість зерна повинна відповідати вимогам різних напрямів його використання. Одним із ключових критеріїв, що визначає придатність кукурудзи для біоетанольного виробництва, є вміст крохмалю, який безпосередньо впливає на вихід етилового спирту. Удосконалення технологічних заходів вирощування, зокрема системи удобрення та способів сівби, сприяє підвищенню врожайності та покращенню накопичення крохмалю в зерні завдяки активізації фотосинтетичних процесів і посиленню синтезу сухої речовини [194; 259]. Генетичні особливості гібридів кукурудзи, адаптованих до певних умов вирощування, забезпечують формування оптимального біохімічного складу зерна, придатного для біоетанольної переробки [194; 260].

Високий вміст вуглеводів, передусім крохмалю, зумовлює перспективність використання кукурудзи як основної сировини для виробництва біоетанолу. Концентрація крохмалю в зерні залежить від генетичних особливостей гібриду, рівня агротехнічного забезпечення та ґрунтово-кліматичних умов вирощування і може становити від 60 до 85 % [194; 260]. Вуглеводний комплекс зерна кукурудзи включає прості цукри, крохмаль, клітковину, геміцелюлози та пентозани [258].

Процес накопичення крохмалю в зерні пов'язаний із біохімічними перетвореннями глюкози та фруктози, що утворюються в результаті фотосинтезу і трансформуються в складні вуглеводи – крохмаль – у генеративних органах рослини. У міру дозрівання зерна спостерігається поступове підвищення його крохмалистості [100; 259].

Аналіз хімічного складу зерна кукурудзи за різних варіантів удобрення засвідчив, що застосування мінеральних добрив та мікроелементних препаратів сприяє покращенню основних якісних показників зерна порівняно з контрольним варіантом. На контролі, де мінеральні добрива не застосовувалися, вміст крохмалю становив 66,90 %, сирого протеїну – 8,31 %, а жиру – 4,03 % (табл. 4.7). Ці показники є базовими для порівняння впливу різних елементів живлення.

Внесення повного мінерального добрива $N_{90}P_{90}K_{90}$ сприяло зростанню концентрації крохмалю до 68,05 %, сирого протеїну – до 9,25 %, а жиру – до 4,4 %, що свідчить про покращення азотного та енергетичного обміну в рослинах. Використання препаратів БЛЕК ДЖЕК КС і Інтермаг Титан забезпечило помірне підвищення вмісту крохмалю (до 67,23 % та 67,04 % відповідно) та жиру (4,29–4,21 %). Вміст сирого протеїну за цих варіантів також зростав порівняно з контролем, досягаючи 9,12 % (БЛЕК ДЖЕК КС) і 8,91 % (Інтермаг Титан). Найвищі показники якості зерна отримано за поєднання мінерального удобрення з мікродобривами. Варіант $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС забезпечив максимальний вміст крохмалю – 69,45 %, сирого протеїну – 9,79 %, та жиру – 4,52 %. Подібну тенденцію зафіксовано й у комбінації $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан, де відповідні показники становили 69,28 %, 9,56 % та 4,51 %.

Таблиця 4.7

Хімічний склад зерна кукурудзи залежно від удобрення, % (середнє за 2023–2025 рр.)

Варіанти досліду	Вміст у зерні, %		
	крохмалю	сирого протеїну	жиру
Контроль (обробка водою)	66,90	8,31	4,03
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	68,05	9,25	4,41
БЛЕК ДЖЕК КС	67,23	9,12	4,29
Інтермаг Титан	67,04	8,91	4,21
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	69,45	9,79	4,52
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + Інтермаг Титан	69,28	9,56	4,51

Отримані результати підтверджують, що внесення мінеральних добрив у поєднанні з мікроелементними препаратами позитивно впливає на синтез запасних поживних речовин у зерні кукурудзи, сприяючи формуванню продукції з підвищеним вмістом крохмалю, протеїну та жиру.

За результатами досліджень В. Д. Паламарчук та інших, в ранньостиглих гібридах кукурудзи Лісостепової зони України спостерігається не високу урожайність зерна та вихід крохмалю [127; 181; 259]. Підвищений вміст крохмалю, характерний для середньоранніх і середньостиглих гібридів кукурудзи, зумовлений їх належністю до зубовидного підвиду, зерно якого відзначається високою концентрацією крохмалистих фракцій.

Аналіз виходу крохмалю з одиниці площі за 2023–2025 рр. засвідчив суттєвий вплив системи удобрення на формування вуглеводної продуктивності кукурудзи. Упродовж всіх років дослідження фіксувалося зростання виходу крохмалю за рахунок застосування як мінеральних добрив, так і мікроелементних препаратів, проте інтенсивність приросту була різною залежно від варіанта.

У перший рік досліджень вихід крохмалю становив 4,650 т/га на контролі (рис. 4.2).

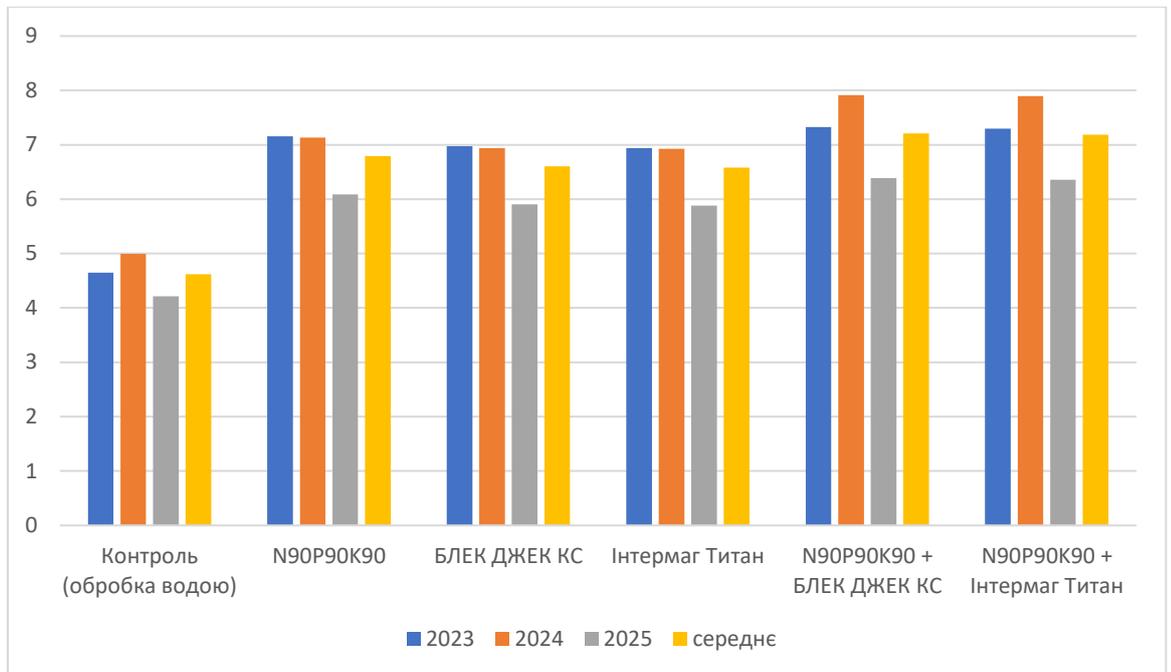


Рис. 4.2. Вихід крохмалю по роках, т/га

Використання повного мінерального удобрення $N_{90}P_{90}K_{90}$ збільшило цей показник до 7,154 т/га, що свідчить про суттєве покращення вуглеводного синтезу. Застосування препаратів БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан забезпечило отримання 6,972 та 6,940 т/га відповідно, а комбіновані варіанти сформували найвищий вихід крохмалю – 7,325–7,296 т/га. У 2024 році відмічалася загальна позитивна динаміка. Контрольний показник зріс до 4,995 т/га, тоді як варіанти з мікродобривами та мінеральним удобренням забезпечили близькі за рівнем значення (6,925–7,913 т/га). Максимальний вихід відмічено за поєднання $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС – 7,913 т/га.

У третьому році дослідження відбулося зниження показників в усіх варіантах, що, ймовірно, пов'язано з погодними умовами або ґрунтовими чинниками. На контролі вихід крохмалю становив 4,217 т/га. Внесення $N_{90}P_{90}K_{90}$ забезпечило 6,089 т/га, тоді як інші варіанти з препаратами дали 5,883–6,385 т/га. Найвищий рівень виходу крохмалю зберігався у варіантах комбінованого удобрення. У середньому за три роки найнижчий вихід крохмалю був на контролі – 4,621 т/га. Мінеральне удобрення забезпечило 6,792 т/га, застосування

мікродобрив – 6,583–6,606 т/га, тоді як $N_{90}P_{90}K_{90}$ з мікроелементними препаратами досягло найвищих середніх значень – 7,184–7,209 т/га. Отже, найбільш ефективним для формування максимального виходу крохмалю виявилось комплексне удобрення, яке поєднувало мінеральні добрива з мікроелементними препаратами, тоді як контрольний варіант у всі роки демонстрував значно нижчі показники.

4.4. Розрахунковий вихід біопалива енергетичних культур під впливом досліджуваних факторів

Зелена маса енергетичних культур, таких як міскантус (*Miscanthus giganteus*), просо прутоподібне (*Panicum virgatum* L.), сорго цукрове (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) та кукурудза звичайна (*Zea mays* L.), характеризується значним вмістом структурних вуглеводів, які визначають її енергетичний потенціал. Основними компонентами є целюлоза, геміцелюлоза, лігнін, а також білки, жири, зола та волога. Співвідношення цих речовин обумовлює як ефективність переробки біомаси (зокрема в біоетанол, біогаз або тверде паливо), так і її кормову придатність у тваринництві [114; 187].

За даними досліджень [10; 65], енергетичні культури можуть містити до 40–45 % целюлози у сухій речовині, близько 25–35 % геміцелюлози та 10–20 % лігніну, що забезпечує високу калорійність при спалюванні – від 17 до 19 МДж/кг. Окрім того, зелена маса багатьох культур містить важливі мікро- та макроелементи, що робить її потенційно цінною і в агроекологічному аспекті, оскільки після використання залишків у якості сидератів сприяє поліпшенню ґрунтових властивостей.

Поживна цінність зеленої біомаси, зокрема для використання як силосу або зеленої підкормки, визначається рівнем сирого протеїну (6–12 % у залежності від виду та фази вегетації), вмістом клітковини, перетравністю органічної речовини та енергетичною цінністю. Наприклад, в умовах помірного клімату зелена маса міскантусу містить у середньому 9–11 % сирого протеїну, тоді як сорго цукрове може мати до 12 % залежно від фаз розвитку [41].

Таким чином, біохімічний склад енергетичних культур визначає їхню функціональну придатність як для виробництва біопалива, так і в системах сталого землеробства та кормовиробництва. Кукурудза нині розглядається як один із ключових відновлюваних видів сировини для виробництва різноманітних форм біопалива, що зумовлює її високу енергетичну та економічну значущість у аграрному секторі України. Розширення напрямів використання кукурудзи для виготовлення біопалив створює сприятливі умови для подальшого формування та розвитку вітчизняної біоенергетичної галузі [142].

Виробництво біопалива з рослинної сировини, зокрема ріпаку, кукурудзи, міскантусу, свічграсу та сорго цукрового, розглядається як дієвий інструмент скорочення антропогенних викидів вуглецю. За даними досліджень, сорго цукрове характеризується високим енергетичним потенціалом і здатне формувати до 17,6 тис. м³/га біогазу з часткою метану близько 60 %, а також забезпечувати вихід до 25 т твердого біопалива з одиниці площі [250]. Серед енергетичних культур кукурудза посідає провідне місце завдяки поєднанню високої урожайності та ефективності перетворення біомаси. Наявність C4-типу фотосинтезу забезпечує їй значний потенціал продуктивності, а технології вирощування та заготівлі силосної маси є добре відпрацьованими й широко застосовуваними [6; 206; 211]. Для біогазових установок переважно вирощують спеціалізовані енергетичні гібриди кукурудзи, урожайність сухої речовини яких сягає 9–30 т/га [125; 142; 224]. За таких показників можливий вихід метану становить близько 5300–9000 м³/га залежно від біологічних особливостей гібридів, погодних умов та строків збирання врожаю [6].

За результатами досліджень R. Weiland та співавторів, кукурудза є більш однорідною та придатною для анаеробної ферментації сировиною: ступінь її розкладу у метантенках досягає 90 %, тоді як у різних видів трав – близько 50 % [118]. Згідно з висновками I. Lewandowski, правильно проведене зброджування 1 кг сухої речовини дає орієнтовно 0,4 м³ біогазу з теплотворністю 16,8–23,0 МДж; після вилучення CO₂ енергетична цінність газу може зростати до 35,7 МДж [24; 65; 117; 121]. Н. Oechsner і А. Lemmer повідомляють, що з 1 т трав'яної біомаси

отримують близько 100 м³ біогазу, тоді як із 1 т кукурудзяної маси, заготовленої у фазі воскової стиглості, – приблизно 180 м³ [77].

В усіх варіантах дослідів міскантус гігантський демонструє найвищий вихід твердого біопалива, який коливається від 17,1 т/га у контролі до 23,0 т/га у варіанті з внесенням N₉₀P₉₀K₉₀ + БЛЕК ДЖЕК КС (табл. 4.8). Така стабільно висока маса обумовлена анатомічною структурою міскантуса гігантського – домінуванням жорсткої клітковини, високим вмістом сухої речовини та мінімальними втратами при сушінні та пресуванні.

Таблиця 4.8

Вихід біопалива з врожаю досліджуваних культур, т/га

Варіанти дослідів	Міскантус гігантський, т/га	Просо прутоподібне, т/га	Кукурудза, побічна продукція, т/га	Сорго цукрове	
				твердий залишок, т/га	біогаз, м ³ /га
Контроль (обробка водою)	17,1	9,49	6,65	4,75	3110
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	20,2	11,13	7,03	6,33	4140
БЛЕК ДЖЕК КС	17,5	9,78	6,94	6,12	4010
Інтермаг Титан	17,9	10,01	6,94	5,97	3910
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	23,0	11,52	7,32	6,61	4327
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	22,1	11,33	7,22	6,62	4334
НІР _{0,05}	1,4	0,8	1,0	1,1	14

Зростання виходу біопалива при внесенні добрив відбувається за рахунок збільшення кількості стеблової маси, підвищення щільності біомаси, посилення фотосинтетичної активності культури. А комбіновані варіанти добрив забезпечують приріст твердого біопалива до 35 % порівняно з контролем, що

свідчить про високу чутливість міскантусу до оптимізованого живлення, незважаючи на загальну невибагливість культури.

Просо прутоподібне формує від 9,49 т/га твердого біопалива у контролі до 11,52 т/га у варіанті $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС. Незважаючи на нижчі абсолютні значення, культура характеризується найменшими технологічними витратами та високою адаптивністю до стресових умов.

Біомаса проса має високу частку структурних полісахаридів (целюлози та геміцелюлоз), що забезпечує високу ефективність пресування. Мікродобрива сприяють приросту біомаси на 2–5 %, тоді як застосування НРК підвищує вихід твердого палива на 15–20 %. Особливо важливим є те, що відмінності між варіантами добрив у проса менші, ніж у міскантусу чи сорго, що свідчить про стабільність культури у виробничих умовах.

Кукурудза звичайна формує 6,65–7,32 т/га твердого біопалива, що є високим показником для однорічної культури, яка одночасно забезпечує отримання товарного зерна. Побічна продукція (стебла, обгортки, стрижні качанів) містить високий відсоток сухої речовини та добре піддається брикетуванню. Зростання виходу біопалива від добрив становить лише 10–12 %. Це пояснюється тим, що кукурудза при достатньому забезпеченні азотом спрямовує більшу частину асимілятів у зерно, а не у вегетативну масу. Тому енергетичні варіанти використання кукурудзи потребують врахування двовекторності продукції: зерно + біомаса.

Сорго характеризується найнижчими показниками виходу твердого біопалива – 4,75–6,62 т/га, що обумовлено високим вмістом розчинних цукрів у стеблах, низькою часткою структурної целюлози, великими втратами сухої речовини при сушінні та низькою ефективністю пресування. З іншого боку, культура проявляє надзвичайно високий потенціал до метаноутворення і вихід біогазу становить від 3110 м³/га у контролі до 4334 м³/га у варіантах із комплексним удобренням.

Тобто сорго щонайменше вдвічі ефективніше як сировина для біогазової технології, ніж як культура для виробництва твердого біопалива. У поєднанні з

високою врожайністю зеленої маси культура є перспективною для кластерів з біогазовими комплексами. Однак, культура потребує проектування та побудови біогазових установок що ускладнює переробку на відміну від культур для виробництва твердих видів палива.

Усі культури реагують позитивно на оптимізацію живлення, найбільше – міскантус і сорго. Комбіновані варіанти $N_{90}P_{90}K_{90}$ + мікродобрива забезпечують у міскантусу: +35 % приросту біопалива, у проса: +20 %, у кукурудзи: +10 %, у сорго: +39 % біогазу та +39 % твердого залишку. Це демонструє, що мікродобрива підсилюють ефект макроелементів і формують найвищу енергетичну продуктивність агрофітоценозів.

РОЗДІЛ 5. ЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД ОДНОРІЧНИХ РОСЛИН ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ

Сорго поглинає значно більше деяких мікроелементів з ґрунту, ніж інші культури. Особливо це стосується молібдену, міді та йоду. Водночас, менше порівняно з іншими культурами, сорго засвоює кобальт, цинк і бор. Серед мікроелементів першочергове значення для рослин сорго має молібден, а також кобальт, вміст якого становить не більше 5–10 мг/кг ґрунту. Бор і цинк мають менший вплив на врожайність сорго [207]. Для нормального розвитку рослин важливі не лише основні макроелементи, але й мікроелементи та мезоелементи. Вони також відіграють критичну роль у всіх фізіологічних процесах росту та розвитку. Серед них можна виокремити залізо, мідь, молібден, марганець, цинк, бор, сірку та інші, які є необхідними для ефективної дії багатьох ферментів в рослинному організмі та сприяють кращому засвоєнню елементів живлення з ґрунту.

Мікроелементи функціонують як активні каталізатори, прискорюючи біохімічні реакції та впливаючи на їхній хід, тому їх неможливо замінити іншими речовинами і їхнє недостатнє забезпечення може має негативний вплив на ріст та розвиток рослин [153]. Найбільш дефіцитним елементом живлення для культури є азот, який завдяки природній родючості задовольняє потребу лише на 38,7 %, фосфор – на 53,2 % та калій – на 93,7 %. Найбільше використання азоту рослинами сорго відмічається у міжфазні періоди активного росту та розвитку генеративних органів. Що припадає за 10–15 добу до початку викидання волоті, та 10–15 добу після цвітіння. Поглинання фосфору коренями починається з перших днів вегетації рослин. До фази викидання волоті рослина засвоює до 50 % загальної кількості фосфору. Рослини поглинають калій рівномірно протягом усього вегетаційного періоду [190; 212].

Одним із важливих елементів для росту і розвитку рослин, зокрема й кукурудзи, є фосфор. Цей макроелемент являється основою енергетичних ресурсів і запасів клітин рослини. Усі ключові біохімічні процеси проходять за участю

фосфору, оскільки він є складовою нуклеїнових кислот, нуклеотидів, ферментів, а також продуктів фотосинтезу та дихальних циклів [11]. Позакореневе підживлення рослин сорго найбільш ефективним буде на добре удобрених ґрунтах. Що відмічають за використання інтенсивної технології вирощування культури. В цьому випадку нестача макро- та мікроелементів може стати обмежуючим фактором для збільшення врожайності сорго цукрового [307].

Аналіз вмісту елементів живлення у корінні сорго засвідчив істотну варіабельність їх накопичення залежно від удобрення та застосування мікродобрив. Встановлено, що вміст алюмінію (Al) змінювався у вузькому діапазоні (71–80 мг/100 г) і характеризувався незначною тенденцією до зростання за рахунок внесення мінеральних добрив та регуляторів росту (табл. 5.1). Подібна закономірність простежувалася і для мангану (Mn) та цинку (Zn), концентрації яких підвищувалися під дією мікродобрив, особливо у варіантах з Інтермаг Титан.

Особливо інтенсивно на мінеральне живлення реагували кремній та залізо. Так на контролі вміст Si становив 118 мг/100 г, тоді як за використання препарату Інтермаг Титан цей показник зріс майже у 1,7 раза (198 мг/100 г). Аналогічна тенденція спостерігалася для Fe: його кількість збільшилася з 183 мг/100 г у контролі до 420 мг/100 г у варіанті $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан. Це вказує на здатність даного препарату стимулювати інтенсивніше засвоєння мікроелементів.

Вміст калію (K) та кальцію (Ca) варіював значно ширше. Максимальне накопичення K (1820 мг/100 г) зафіксовано у варіанті з повною нормою добрив ($N_{30}P_{30}K_{30}$). Однак у поєднанні мінерального удобрення з мікродобривами його рівень дещо знижувався, що може бути наслідком антагонізму між елементами. Ca демонстрував чітке зростання під впливом Інтермаг Титан (780 мг/100 г), що свідчить про позитивний вплив препарату на кальцієвий обмін у кореневій системі.

Для фосфору (P) та сірки (S) характерним було зменшення концентрації у варіантах з мікродобривами: з 43 і 25 мг/100 г у контролі до 18–20 та 17–19 мг/100 г відповідно. Це може пояснюватися інтенсивнішим їх використанням у процесі біосинтезу органічних сполук.

Таблиця 5.1

Вміст елементів у кореннях сорго, мг/100 г

Елемент	Варіанти дослідів					
	Контроль	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	БЛЕК ДЖЕК КС	Інтермаг Титан	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан
Al	71,0	73,0	77,0	78,0	79,0	80,0
Si	118,0	100,0	142,0	198,0	151,0	199,0
P	43,0	30,0	25,0	18,0	20,0	19,0
S	25,0	43,0	25,0	17,0	19,0	18,0
Cl	56,0	384,0	378,0	40,0	320,0	45,0
K	1002,0	1820,0	971,0	904,0	1200,0	950,0
Ca	585,0	446,0	535,0	740,0	600,0	780,0
Ti	29,0	23,0	38,0	68,0	41,0	70,0
Cr	12,0	2,0	30,0	17,0	20,0	18,0
Mn	9,0	13,0	15,0	16,0	15,0	17,0
Fe	183,0	159,0	276,0	397,0	310,0	420,0
Ni	4,0	1,0	12,0	8,0	9,0	10,0
Cu	3,0	1,0	3,0	2,0	3,0	2,0
Zn	2,5	1,6	3,4	3,1	3,3	3,2
Sr	1,0	1,0	1,0	3,0	2,0	3,0

Варіабельність Cl була найбільшою серед усіх елементів: у варіанті N₉₀P₉₀K₉₀ він зріс до 384 мг/100 г, тоді як за Інтермаг Титан знизився до 40–45 мг/100 г. Подібні різкі коливання можуть бути пов'язані з особливостями іонного обміну в коренях сорго під впливом препаратів. Накопичення Ti, Cr, Ni, Cu та Sr

відзначалося підвищенням у дослідних варіантах порівняно з контролем, що свідчить про стимулюючий вплив мікродобрив на надходження мікроелементів із ґрунту. Загалом, оптимальне забезпечення рослин макро- та мікроелементами забезпечувало поєднання $N_{30}P_{30}K_{30}$ з Інтермаг Титан, тоді як максимальні коливання елементного складу спостерігалися у варіантах з повною нормою мінеральних добрив ($N_{30}P_{30}K_{30}$).

Аналіз елементного складу листків сорго цукрового показав, що мінеральне удобрення та мікродобрива по-різному впливали на вміст макро- і мікроелементів. Встановлено, що вміст магнію (Mg) підвищувався від 43,3 мг/100 г на контролі до 74,4–76,1 мг/100 г при використанні Інтермаг Титан (табл. 5.2). Це свідчить про посилення фотосинтетичної активності, адже магній є складовою хлорофілу.

Вміст алюмінію (Al) і кремнію (Si), навпаки, знижувався у дослідних варіантах: з 168,0 і 279,0 мг/100 г у контролі до 94,1–115,1 мг/100 г у комбінаціях з мікродобривами. Це може бути пов'язано з особливостями поглинання і антагонізмом між кремнієм та іншими катіонами. Значне зменшення відзначалося також для фосфору (P) та сірки (S) – у варіантах з мікродобривами їх вміст знижувався у 2–4 рази. Подібна тенденція свідчить про активніше використання цих елементів у метаболізмі при стимуляції росту.

Суттєві коливання відмічено у вмісті хлору (Cl): на фоні мінерального удобрення його концентрація зростала до 497 мг/100 г, тоді як застосування препарату Інтермаг Титан сприяло її зниженню до 182–190 мг/100 г. Найбільші кількості калію (K) нагромаджувалися у варіантах із застосуванням БЛЕК ДЖЕК КС (2734 мг/100 г), що підтверджує роль препарату у посиленні калієвого живлення. У той же час, вміст кальцію (Ca) варіював у межах 182–728 мг/100 г, при цьому максимальні значення зафіксовано у варіанті з внесенням мінеральних добрив у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ (728 мг/100 г).

Мікроелементи проявляли індивідуальні тенденції: вміст Mn істотно зростав на фоні $N_{30}P_{30}K_{30}$ (41 мг/100 г), однак знижувався за умови застосування мікродобрив; концентрація Fe під впливом Інтермаг Титан підвищувалася у 1,5–2 рази (27–29 мг/100 г); вміст Cu залишався відносно стабільним (близько

1 мг/100 г); концентрація Zn зменшувалася у варіантах з використанням БЛЕК ДЖЕК КС (0,6 мг/100 г), проте зростала за комбінованого застосування $N_{30}P_{30}K_{30}$ (2,5–2,8 мг/100 г).

Таблиця 5.2

Вміст елементів у листках сорго, мг/100 г

Елемент	Варіанти дослідів					
	Контроль	$N_{30}P_{30}K_{30}$	БЛЕК ДЖЕК КС	Інтермаг Титан	$N_{30}P_{30}K_{30}$ + БЛЕК ДЖЕК КС	$N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан
Mg	43,3	57,2	68,3	74,4	72,5	76,1
Al	168,0	127,0	109,6	94,1	105,3	92,0
Si	279,0	179,0	115,1	110,8	120,4	112,7
P	109,0	76,0	68,0	19,0	55,0	22,0
S	74,0	69,0	61,0	26,0	50,0	28,0
Cl	230,0	497,0	453,0	182,0	420,0	190,0
K	2438,0	2601,0	2734,0	2299,0	2650,0	2350,0
Ca	296,0	728,0	182,0	572,0	540,0	600,0
Ti	2,6	5,1	1,9	5,1	3,5	5,3
Mn	5,0	41,0	7,0	9,0	18,0	12,0
Fe	16,0	30,0	14,0	27,0	25,0	29,0
Cu	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Zn	5,6	4,2	0,6	2,3	2,8	2,5

Загалом результати свідчать, що найбільш збалансоване живлення листя сорго забезпечувало поєднання мінерального удобрення з мікродобривами, особливо у варіанті $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан, який сприяв оптимальному засвоєнню Mg, Ca, Fe та Zn.

Отримані результати досліджень узгоджуються з літературними даними щодо впливу мінерального удобрення та мікродобрив на мінеральний склад надземних органів сорго. Так, за повідомленням В.В. Лихочвора та ін. (2019), застосування мікроелементних препаратів підвищує вміст магнію та кальцію в листках, що позитивно впливає на фотосинтетичну активність та обмін речовин [265]. У дослідженнях Patel et al. (2021) встановлено, що позакореневі підживлення стимулюють накопичення Fe, Mn і Zn у листі сорго, що відповідає отриманим нами даним для варіантів з Інтермаг Титан [80]. Зниження вмісту фосфору та сірки у дослідних варіантах також підтверджується результатами Fageria (2016), де зазначено, що ці елементи активно залучаються до синтезу органічних сполук у фазі активного росту [32]. Водночас, різке зростання вмісту Cl і K у варіантах з БЛЕК ДЖЕК КС співпадає з результатами Bourgault et al. (2020), які вказують на можливий вплив органічних мікродобрив на підвищення іонної проникності клітинних мембран [14]. Таким чином, дані нашого дослідження підтверджують висновки вітчизняних і зарубіжних дослідників щодо доцільності інтегрованого використання мінеральних добрив і мікроелементних препаратів для оптимізації мінерального живлення сорго.

За результатами досліджень встановлено, що найвищий вміст фосфору та калію в корінні рослин кукурудзи спостерігався на варіанті за внесення Інтермаг Титан і становив 114 та 2051 мг/100 г, найнижчим показником характеризувався контроль відповідно на 31 і 880 мг/100 менше до попереднього варіанту (рис. 5.1–5.2, ДОДАТОК В). Варіанти з унесенням мінеральних добрив та гуматів мали середнє значення, найменша кількість калію спостерігалась на варіанті, де вносились мінеральні добрива у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ і становила 633 мг/100 г. З цього випливає, що титанове добриво сприяє засвоєнню фосфору та калію рослинами кукурудзи з ґрунту, а гумати є потужним джерелом калію.

Виявлено, що вміст фосфору в зерні кукурудзи був майже однаковим у всіх варіантах дослідження. Калій у варіанті із застосуванням Інтермаг Титан у зерні кукурудзи не виявлено, тоді як максимальний його вміст зафіксовано за внесення мінеральних добрив і він становив 725 мг/100 г.

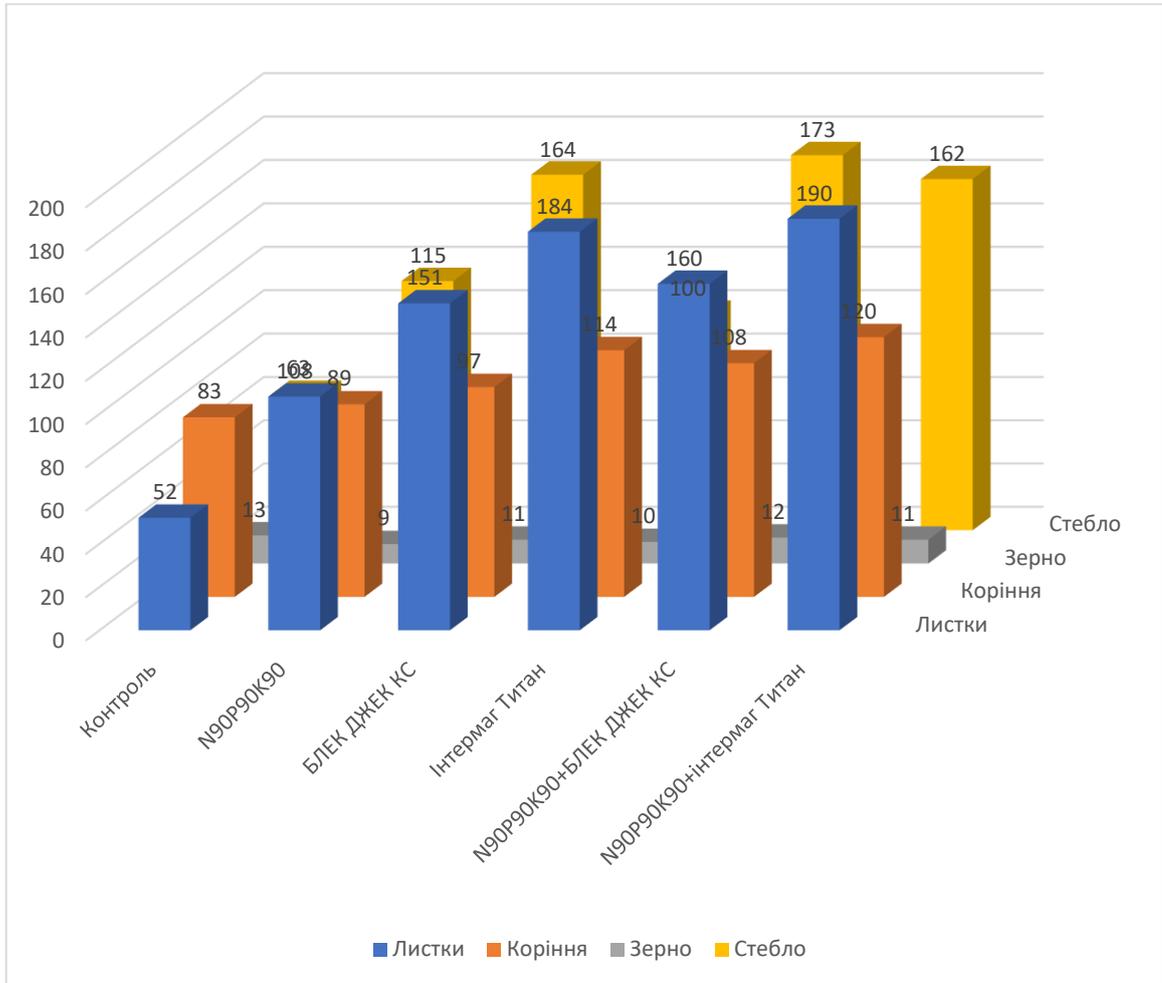


Рис. 5.1. Уміст фосфору в різних частинах рослин кукурудзи, мг/100 г.

Встановлено, що найвищі показники макроелементів у листках кукурудзи спостерігались на варіантах БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан, де вміст фосфору становив 151 та 184 мг/100 г відповідно, що на 66 –72 % більше ніж на контролі. У контрольному варіанті найбільша частка фосфору припадає на корені (83 мг/100 г), тоді як листя та стебла характеризуються помірними значеннями (52 і 63 мг/100 г відповідно), а в зерні зафіксовано найнижчий вміст фосфору (13 мг/100 г). Внесення мінеральних добрив у нормі N₉₀P₉₀K₉₀ сприяло суттєвому зростанню акумуляції фосфору в листках (108 мг/100 г) та, особливо, у стеблах (115 мг/100 г), водночас в зерні його кількість зменшилася до 9 мг/100 г.

Застосування біостимулятора БЛЕК ДЖЕК КС зумовило подальше нагромадження фосфору в листках (151 мг/100 г.) та стеблах (164 мг/100 г.), а також помірне зростання в коренях (97 мг/100 г.).

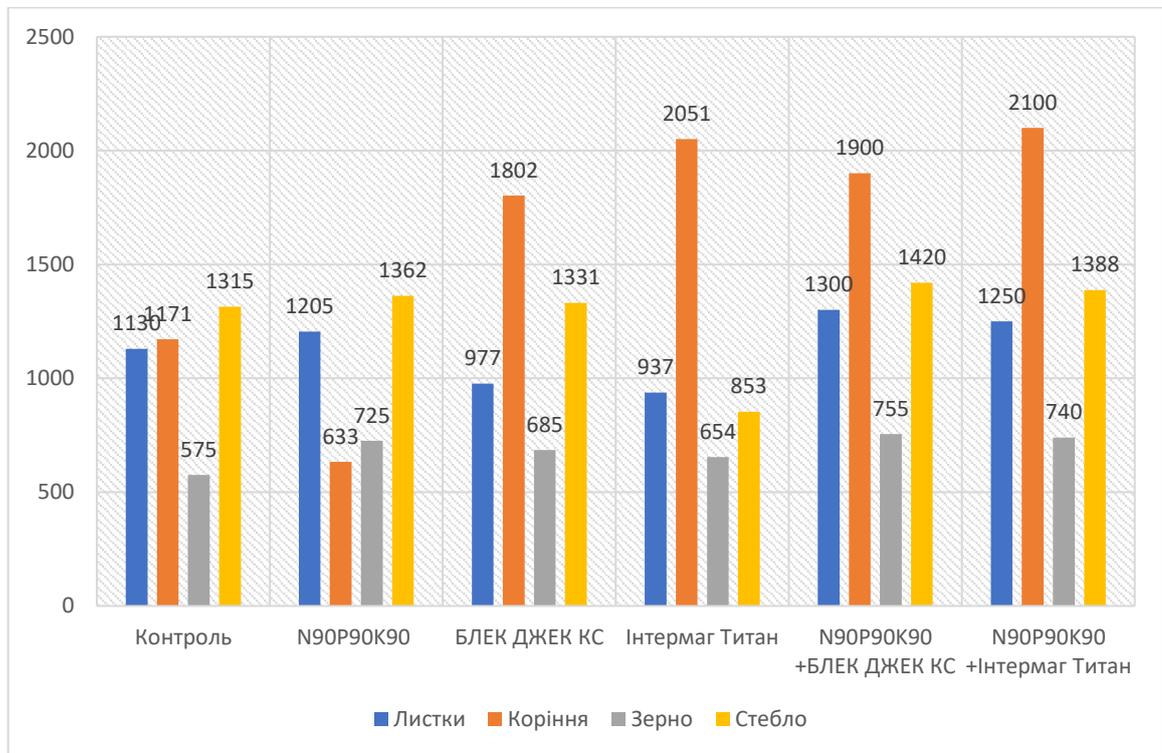


Рис. 5.2. Концентрація калію у органах рослин кукурудзи, мг/100 г.

Кількість фосфору в зерні залишалася на рівні 11 мг/100 г. Варіант із мікродобривом Інтермаг Титан вирізнявся найбільшою кількістю цього елемента (184 мг/100 г.) та підвищеною у корінні (114 мг/100 г.). Вміст фосфору в зерні кукурудзи склав 10 мг/100 г., а в стеблах 100 мг/100 г. Поєднання N₉₀P₉₀K₉₀з БЛЕК ДЖЕК КС забезпечило значний приріст кількості елемента в стеблах – 173 мг/100 г. та суттєве зростання в листках – 160 мг/100 г.

Найвищі значення кількості фосфору в листі (190 мг/100 г.) та коренях (120 мг/100 г.) зафіксовано за сумісної дії мінеральних добрив в нормі N₉₀P₉₀K₉₀ та Інтермаг Титан, що свідчить про виражений синергетичний ефект між мінеральним живленням та мікродобривом. Кількість елемента в стеблах була на рівні 162 мг/100 г., а в зерні залишалась стабільною (11 мг/100 г.).

Калій належить до ключових елементів живлення рослин, активуючи понад 60 ферментів. Він сприяє гідrataції протоплазми, зменшує її в'язкість та підвищує водний баланс у клітинах. У рослинних клітинах калій знаходиться в іонній формі та не входить до складу органічних речовин, тому він дуже рухливий, легко реутилізується та відіграє важливу роль у транспортуванні іонів, водообміні та процесах осморегуляції рослини [120].

На контролі найвищу концентрацію калію зафіксовано у стеблах (1315 мг/100 г) та листках (1130 мг/100 г), тоді як найменше калію містило зерно (575 мг/100 г). Застосування мінеральних добрив у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ зумовило підвищення калію в листках (1205 мг/100 г) та зерні (725 мг/100 г), проте зниження його кількості в коренях (633 мг/100 г), що може бути пов'язано зі зміною перерозподілу елемента на користь генеративних органів. Обробка препаратом БЛЕК ДЖЕК КС сприяла максимальному накопиченню калію в коренях (1802 мг/100 г), а його поєднання з мінеральним удобренням підвищувало вміст елемента у всіх органах, особливо в листках (1300 мг/100 г) та стеблах (1420 мг/100 г). Застосування мікродобрива Інтермаг Титан забезпечило найвищий рівень калію в коренях серед усіх варіантів (2051 мг/100 г), що свідчить про стимулювання кореневої активності та поглинальної здатності. Водночас у стеблах відмічено певне зниження вмісту елемента (853 мг/100 г). Комбінація $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан забезпечила збалансоване підвищення калію в усіх частинах рослин, зокрема у коренях (2100 мг/100 г) та стеблах (1388 мг/100 г).

У цілому встановлено, що найбільша здатність до акумуляції калію характерна для кореневої системи за використання мікродобрив, тоді як поєднання мінерального живлення з листовими препаратами сприяє комплексному підвищенню вмісту калію в листках, стеблах і зерні. Отримані результати свідчать про значний вплив як мінерального, так і позакореневого підживлення на перерозподіл калію в рослинах кукурудзи.

Кальцій і кремній виконують ключову функцію у метаболізмі рослинної клітини. Кальцій стабілізує клітинні мембрани через взаємодію з негативно зарядженими групами фосфоліпідів, знижуючи їхню пасивну проникність.

Практично вся катіонообмінна ємність поверхні кореня насичена кальцієм, що обмежує поглинання інших іонів і сприяє зменшенню токсичності високих концентрацій іонів амонію, алюмінію, марганцю та заліза [120]. За результатами досліджень встановлено, що у контрольному варіанті максимальний вміст кальцію зафіксовано в листках (830 мг/100 г), тоді як у зерні та стеблах його кількість була мінімальною (13 і 34 мг/100 г відповідно) (рис. 5.3). Це узгоджується з фізіологічними особливостями культури, оскільки кальцій мало мобільний у флоемі та переважно акумулюється в активно транспіруючих вегетативних органах.

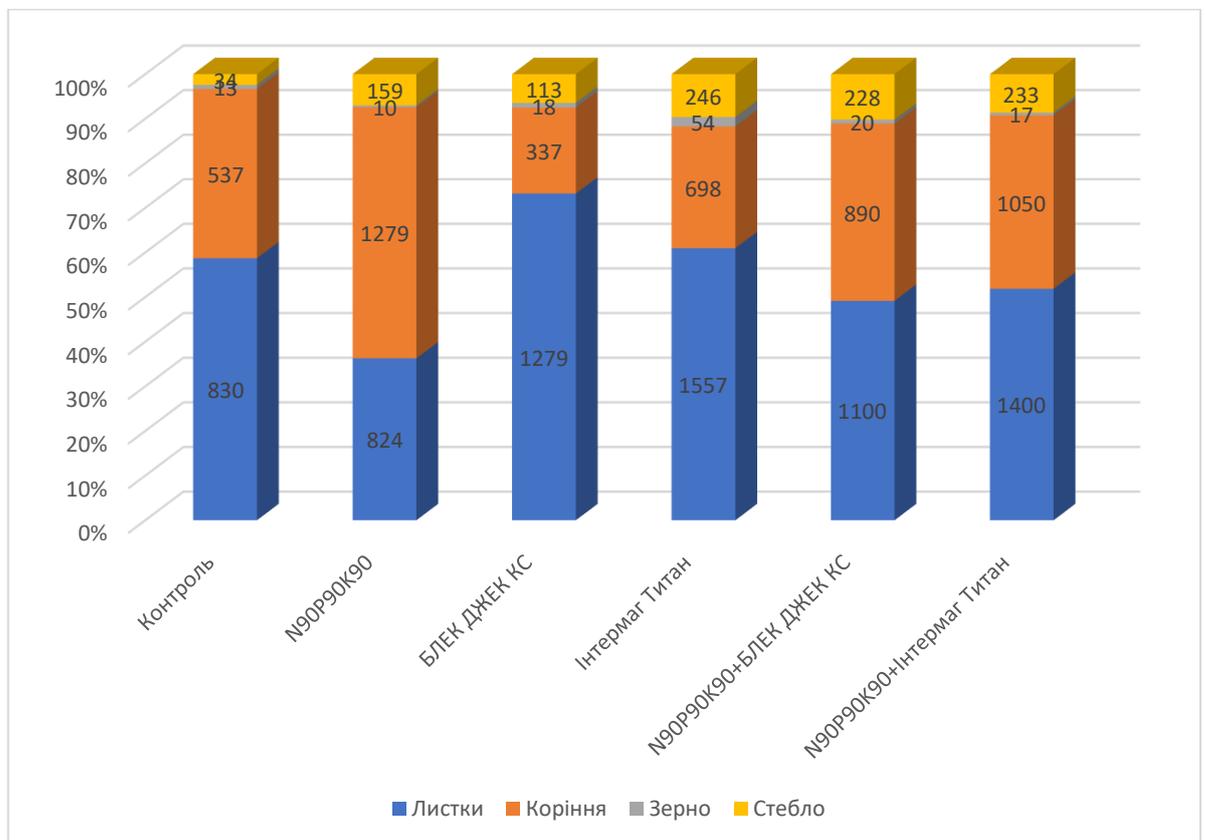


Рис. 5.3. Концентрація кальцію у органах рослин кукурудзи, мг/100 г.

Застосування повного мінерального добрива $N_{90}P_{90}K_{90}$ сприяло істотному підвищенню концентрації кальцію в коренях (1279 мг/100 г) та стеблах (159 мг/100 г), що може бути результатом активізації кореневого поглинання та посилення

метаболической активности. Водночас у листках вміст елемента практично не змінився (824 мг/100 г). Використання препарату БЛЕК ДЖЕК КС забезпечило найвищий рівень кальцію в листковій масі серед окремих позакореневих обробок (1279 мг/100 г). Проте в коренях спостерігалось різке зниження показника (337 мг/100 г), що свідчить про зміну напрямку транспорту та фіксації кальцію в рослинній тканині. Концентрація в зерні дещо зросла (18 мг/100 г), але залишалася низькою порівняно з вегетативними органами.

Обробка мікродобривом Інтермаг Титан виявилася найбільш ефективною для накопичення кальцію у листках (1557 мг/100 г) та стеблах (246 мг/100 г). Значне підвищення вмісту кальцію в зерні (54 мг/100 г) також є показником покращення транспорту та засвоєння елемента на генеративній стадії розвитку. Комбінація мінерального удобрення з БЛЕК ДЖЕК КС сприяла стабільному зростанню вмісту кальцію в усіх органах, особливо в коренях (890 мг/100 г) та стеблах (228 мг/100 г). Поєднання $N_{90}P_{90}K_{90}$ із Інтермаг Титан забезпечило найвищий рівень кальцію в коренях серед комбінованих варіантів (1050 мг/100 г) та сприяло додатковому нагромадженню елемента в листках (1400 мг/100 г).

Узагальнюючи, встановлено, що кальцій у рослинах кукурудзи переважно акумулюється у вегетативних органах, а найбільший ефект на його перерозподіл мають мікродобрива, особливо Інтермаг Титан, який істотно підсилює накопичення елемента як у листках, так і в стеблах та зерні. Комбіноване внесення мінеральних і позакореневих добрив формує більш збалансований розподіл кальцію в рослині.

Магній є складовою хлорофілу та функціонує як кофактор ферментів, що каталізують перенесення фосфатних груп, а також необхідний для активації численних ферментів гліколізу та циклу Кребса. Крім того, він забезпечує структурну цілісність рибосом і, подібно до кальцію, впливає на включення дезоксирибонуклеотидів у молекулу ДНК [120]. Було встановлено, що вміст магнію у стеблах кукурудзи найвищий на контролі – 48 мг/100 г, а у стеблах рослин на варіанті з внесенням Інтермаг Титан він був відсутній (рис. 5.4). Деякі мікроелементи, що входять до його складу (такі як, цинк або марганець), можуть

пригнічувати засвоєння магнію через конкурування за ті самі транспортні шляхи в рослині. Також, внесення добрив могло змінити співвідношення катіонів у ґрунтовому розчині, зменшивши доступність магнію. Особливості ґрунтових умов у Західному регіоні могли сприяти збереженню магнію в доступній формі за відсутності добрив, а внесення Інтермаг Титан – навпаки, знижувало його мобільність або потребу в засвоєнні.

На контролі найвищий вміст магнію відмічено у стеблах (48 мг/100 г) та листках (27 мг/100 г), тоді як корені та зерно характеризувалися низькими показниками (9 і 10 мг/100 г відповідно). Такий розподіл відповідає фізіологічним особливостям магнію як мобільного елемента, що активно перерозподіляється у рослині залежно від потреб органів.

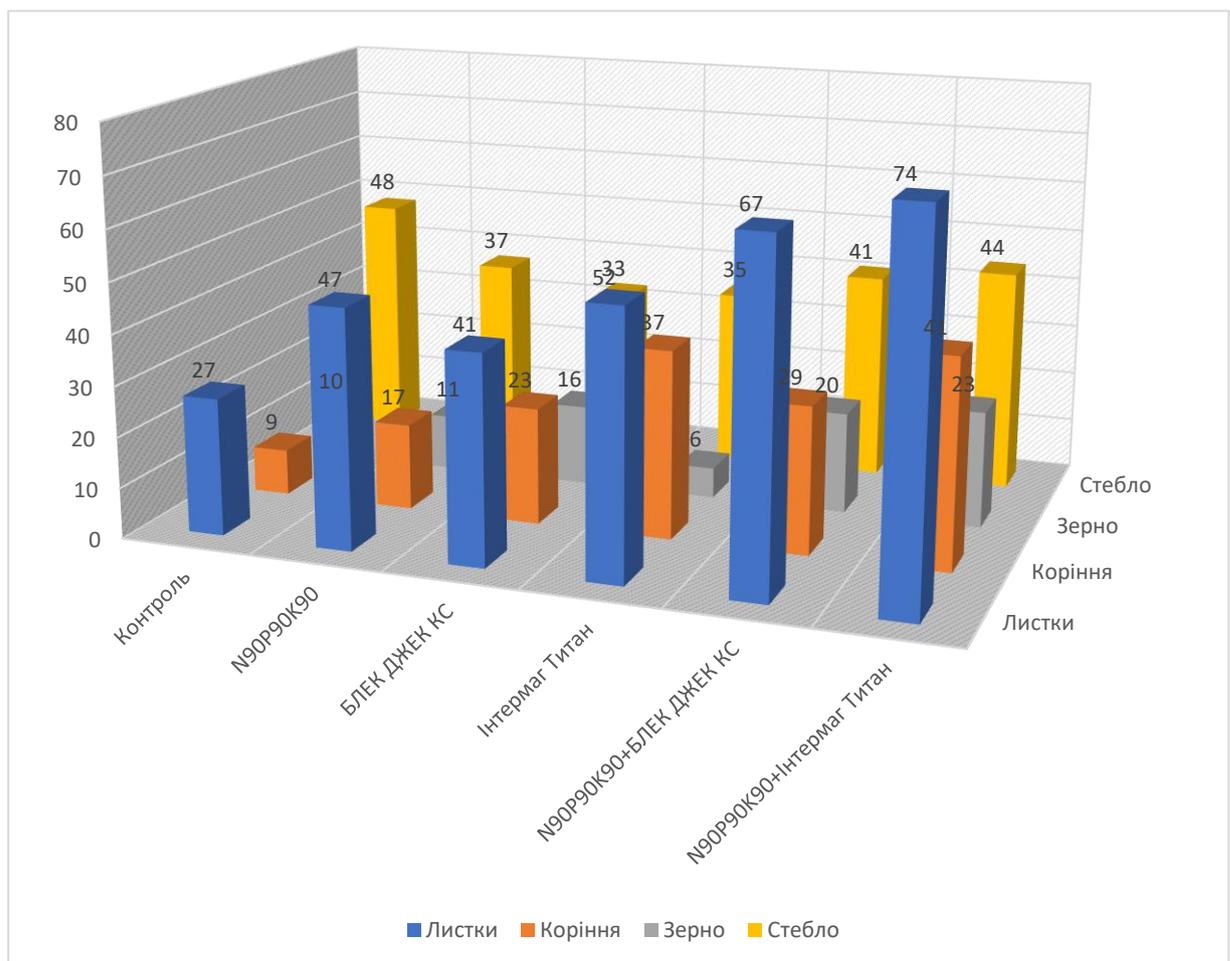


Рис.5. 4. Концентрація магнію в органах рослин кукурудзи, мг/100 г.

Застосування мінерального добрива в нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ зумовило підвищення вмісту магнію у листках (47 мг/100 г) та коренях (17 мг/100 г), що свідчить про посилення інтенсивності метаболічних процесів і збільшення поглинання елемента. Концентрація магнію в зерні та стеблах змінилася несуттєво відносно контролю. Обробка препаратом БЛЕК ДЖЕК КС сприяла додатковому накопиченню магнію як у надземних органах (41 мг/100 г у листках; 33 мг/100 г у стеблах), так і в коренях (23 мг/100 г). Зростання показника у зерні (16 мг/100 г) свідчить про покращення транслокації магнію до генеративної частини рослини.

Мікродобриво Інтермаг Титан забезпечило найвищий рівень магнію у коренях серед окремих варіантів (37 мг/100 г), що вказує на активізацію кореневої системи та збільшення її поглинальної здатності. У листках також відмічено підвищення (52 мг/100 г), тоді як у зерні показник дещо знижений (6 мг/100 г), що може бути пов'язано з перерозподілом елемента на користь вегетативних тканин. Комбінація $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС забезпечила комплексне зростання вмісту магнію в усіх частинах рослин, зокрема у листках (67 мг/100 г), стеблах (41 мг/100 г) і зерні (20 мг/100 г). Таке поєднання сприяло найбільш рівномірному перерозподілу елемента. Варіант $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан виявився найефективнішим щодо загального накопичення магнію: у листках зафіксовано максимальне значення серед усіх варіантів (74 мг/100 г), у коренях – 41 мг/100 г, у зерні – 23 мг/100 г, а у стеблах – 44 мг/100 г. Це свідчить про потужну синергічну дію мінерального та мікроелементного живлення.

Узагальнюючи, виявлено, що внесення як мінеральних добрив, так і позакореневих препаратів, особливо у поєднанні, сприяє суттєвому підвищенню вмісту магнію в органах кукурудзи. Найбільш інтенсивне його накопичення елемента спостерігалось у листках та стеблах, що відображає провідну роль цих органів у фотосинтетичному обміні та потребу в магнії як центральному компоненті молекули хлорофілу.

Алюміній не є есенціальним елементом для рослин, а його токсичність, особливо в кислих ґрунтах, може стримувати ріст. Допустимі рівні Al у харчових продуктах не регламентовані чітко на рівні Codex Alimentarius, але EFSA

рекомендує не перевищувати 1 мг/кг маси тіла на тиждень (TWI – tolerable weekly intake). Для кормів допустимий вміст Al не має перевищувати 500–1000 мг/кг. Таким чином, якщо виявлені концентрації хрому та алюмінію в зерні кукурудзи після застосування добрив перевищують ці межі, це потребує додаткової оцінки з огляду на потенційний ризик для здоров'я тварин і людей та екологічну безпеку. Причини накопичення цих елементів можуть бути пов'язані з хімічним складом добрив або зміною реакції ґрунтового середовища.

Щодо вмісту мікроелементів у листках кукурудзи, то найвищий рівень алюмінію спостерігався за внесення мінеральних добрив в нормі N₉₀P₉₀K₉₀ (96 мг/100 г), що у понад два рази перевищує контроль. Застосування БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан не спричинило підвищення його нагромадження в листках порівняно з контролем (рис. 5.5). У стеблах найбільше Al накопичено в контролі (135 мг/100 г), тоді як мінеральне живлення зменшувало його вміст. У коренях максимальні концентрації відмічені в варіантах Інтермаг Титан (124–127 мг/100 г), що може свідчити про інтенсифікацію кореневого поглинання. У зерні загальний вміст алюмінію залишався низьким і коливався в межах 6–17 мг/100 г, що узгоджується з даними про низьку транслокацію цього елемента до генеративних органів.

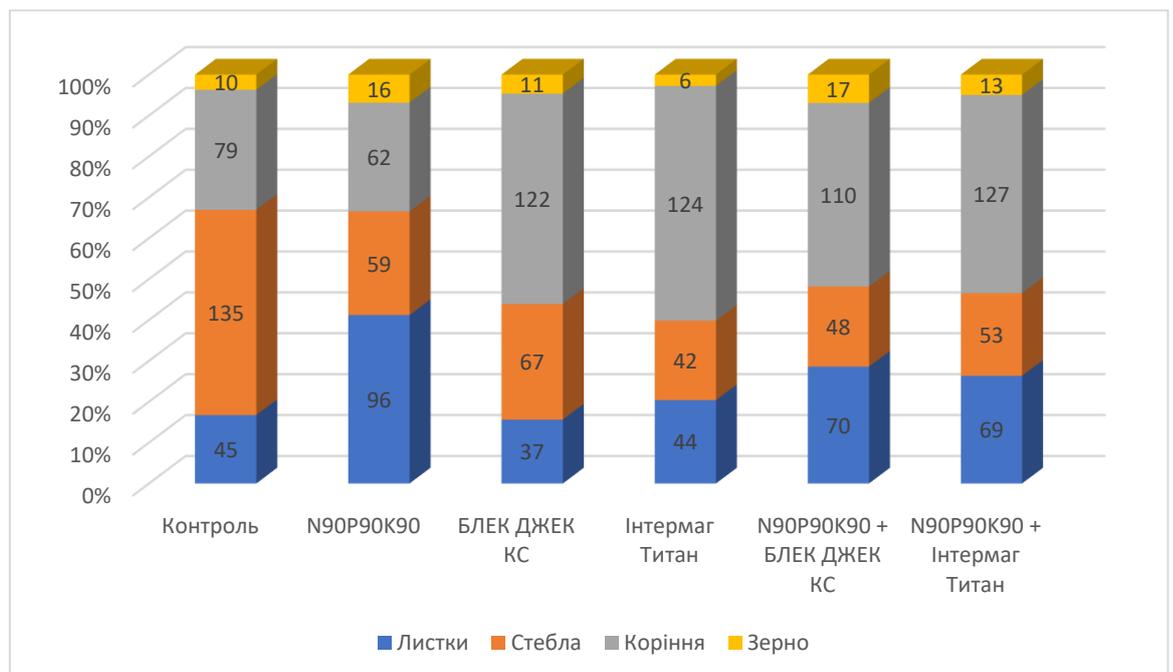


Рис. 5.5. Концентрація алюмінію (Al) в органах рослин кукурудзи, мг/100 г.

Цинк грає ключову роль у підвищенні врожайності зеленого корму, оскільки він бере участь у численних фізіологічних процесах рослин, таких як утворення хлорофілу, накопичення біомаси та регуляція прорихів, що сприяє зростанню врожаю. Крім того, цинк здатен перетворювати аміак на нітрат у рослинах.

За результатами досліджень встановлено, що вміст цинку в зерні кукурудзи коливався від 3,46 мг/100 г у варіанті з внесенням Інтермаг Титан до 5,87 мг/100 г у варіанті із застосуванням БЛЕК ДЖЕК КС (рис. 5.6). Уміст цинку в зерні та стеблах кукурудзи показує, що гумати сприяють його накопиченню в більшій мірі ніж для інших варіантів досліду, що не є оптимальним для безпеки продуктів, одержаних з такого зерна.

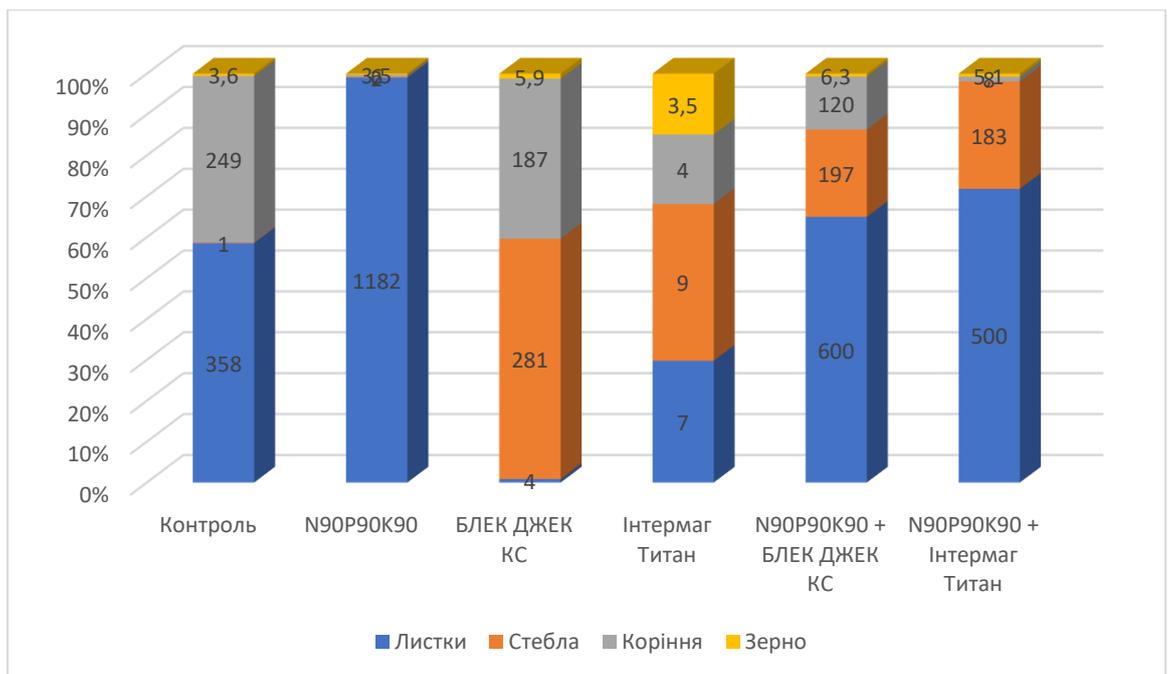


Рис. 5.6. Уміст цинку (Zn) в органах рослин кукурудзи, мг/100 г.

Результатами досліджень встановлено, що найбільші зміни спостерігаються у листках: внесення мінеральних добрив в нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ забезпечило різке зростання концентрації Zn до 1182 мг/100 г, що майже у 3,3 раза більше за контроль. Значне зниження показників у варіантах БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг

Титан свідчить про відмінності у механізмах мобілізації цинку. У стеблах, навпаки, максимальний вміст Zn відмічено за обробки БЛЕК ДЖЕК КС (281 мг/100 г), тоді як контроль та мінеральні добрива забезпечили лише мінімальні значення. У коренях найвищі показники цинку спостерігались на контролі (249 мг/100 г), тоді як комплексне удобрення сприяло зменшенню його акумуляції. У зерні різниця між варіантами була менш вираженою, проте найвищий вміст Zn отримано за сумісного застосування N₉₀P₉₀K₉₀ з БЛЕК ДЖЕК КС (6,25 мг/100 г).

У листках концентрації заліза коливалися від 39 до 61 мг/100 г, найбільші значення отримані зі застосуванням N₉₀P₉₀K₉₀ і Інтермаг Титан. Стебла накопичували порівняно невеликі кількості, проте обробка БЛЕК ДЖЕК КС сприяла їх істотному підвищенню (до 11 мг/100 г). У коренях залізо містилося в найбільших кількостях – від 158 до 634 мг/100 г, причому найвищий рівень спостерігався у варіанті N₉₀P₉₀K₉₀, що відповідає загальній закономірності переважного утримання Fe у кореневій системі. У зерні його вміст був незначним (1–7 мг/100 г), що відповідає літературним даним про слабку транспортувальну спроможність заліза до генеративних органів.

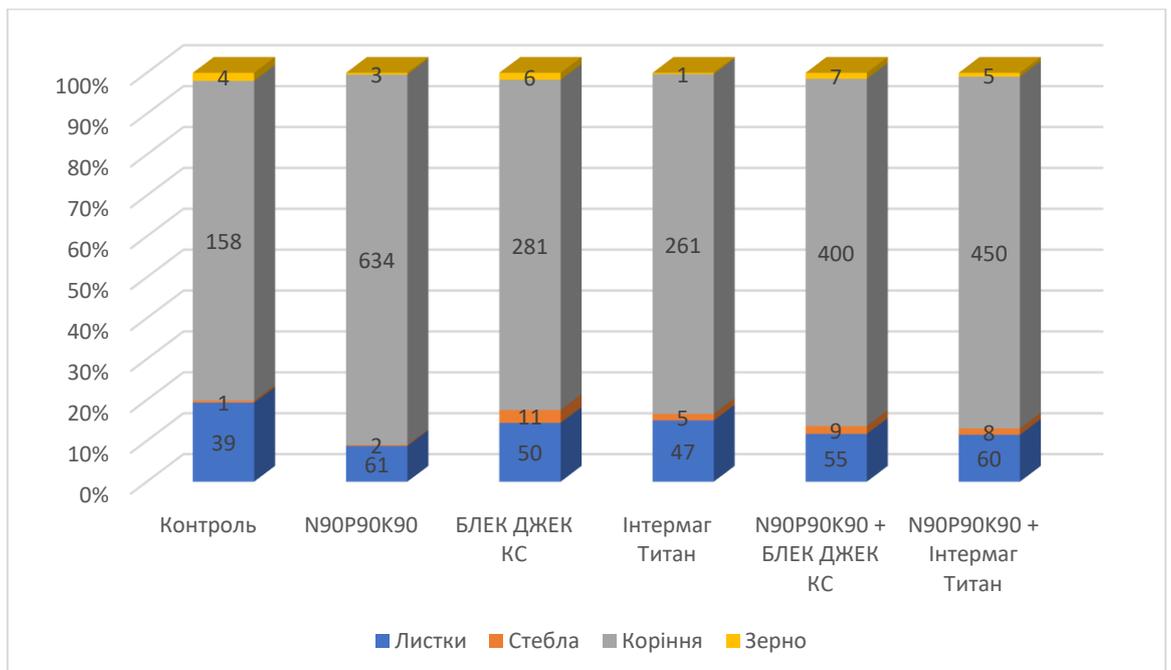


Рис. 5.7. Уміст заліза (Fe) в органах рослин кукурудзи, мг/100 г.

Накопичення титану вегетативними органами відбувалося на низькому рівні. У листках він варіював у межах 6–8 мг/100 г без суттєвої залежності від варіантів живлення. У стеблах його концентрації були мінімальними, а поява титану (1 мг/100 г) спостерігалась лише за використання Інтермаг Титан та комбінованого внесення добрив. Корені акумулювали істотно більші кількості – до 91 мг/100 г у варіанті N₉₀P₉₀K₉₀, що свідчить про інтенсивне поглинання та слабку транслокацію в надземні органи.

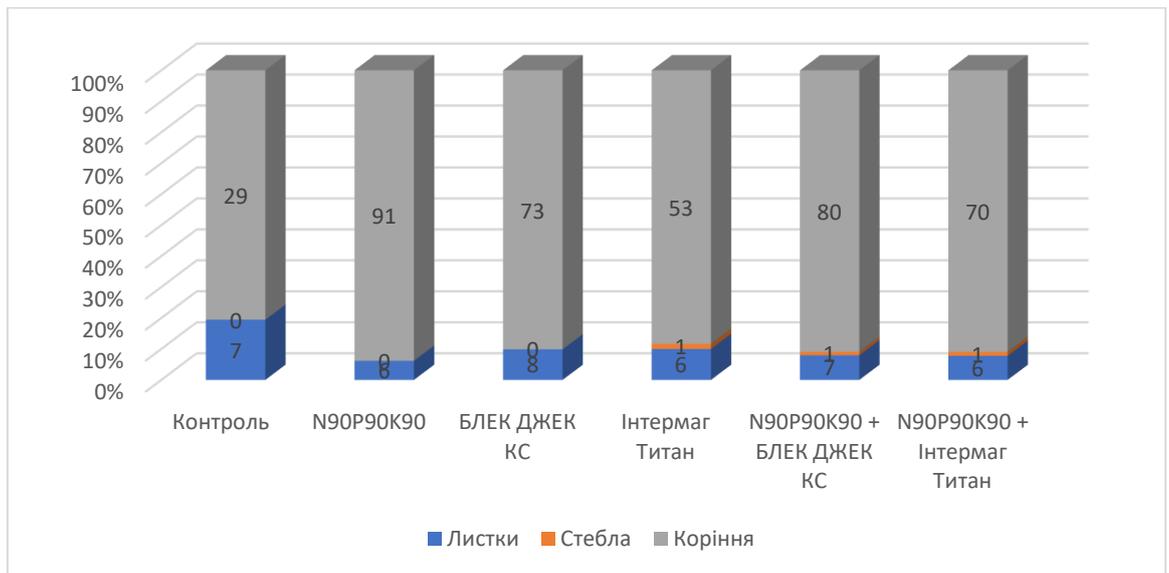


Рис. 5.8. Уміст титану (Ti) в рослинах кукурудзи, мг/100 г.

Максимальний вміст фосфору зафіксовано у варіанті з внесенням N₉₀P₉₀K₉₀ + Інтермаг Титан, де його вміст становив у листках кукурудзи 190 мг/100 г та коренях 120 мг/100 г, а на варіанті з внесенням N₉₀P₉₀K₉₀ + БЛЕК ДЖЕК КС в стеблах кукурудзи з показником 173 мг/100 г. З цього випливає, що титанове добриво сприяє засвоєнню фосфору та калію рослинами кукурудзи з ґрунту, а гумати є потужним джерелом калію.

Варто також відмітити, що застосування мінерального добрива у нормі N₉₀P₉₀K₉₀ та гумату кількість калію була найвищою і становила в листі рослин кукурудзи 1300 мг/100 г, стеблах – 1420 мг/100 г, коренях – 1900 мг/100 г.

Встановлено, що вміст магнію у стеблах кукурудзи був найвищим на контролі і становив 48 мг/100 г.

Найбільша кількість алюмінію (96 мг/100 г) у листі кукурудзи була зафіксована у варіанті з внесенням мінеральних добрив, а найвищий вміст кальцію – у варіанті з використанням Інтермаг Титан (1557 мг/100 г). Найнижчий вміст кальцію спостерігався у варіанті з мінеральними добривами (824 мг/100 г) і на контролі (830 мг/100 г). Проте саме на цих двох варіантах відмічено найвищий рівень цинку – 1182 та 358 мг/100 г.

РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУР НА БІОЕНЕРГЕТИЧНІ ЦІЛІ

6.1. Економічна ефективність елементів технології вирощування

У сучасних ринкових умовах для виробництва необхідні економічно обґрунтовані технології вирощування, які можуть забезпечувати стабільний збір урожаю біосировини енергетичних культур, при цьому не знижувати родючість ґрунту та зменшували витрати на одиницю продукції [74; 236; 239; 240].

Розвиток виробництва біосировини енергетичних культур має проходити шляхом його інтенсифікації та впровадження високоефективних технологій вирощування. Вони базуються на оптимальних показниках: ґрунтово-кліматичних умовах, біологічному потенціалі сорту, забезпеченні енергетичних культур елементами живлення (достатня кількість та співвідношення), системі захисту рослин, своєчасному виконанні технологічних процесів, матеріальній зацікавленості у зростанні виробництва сировини та її економічній ефективності [53; 54; 59; 60; 61; 74; 172; 233].

На сьогодні культивування енергетичних культур потребує більших витрат на одиницю посівної площі, проте деякі господарства не завжди одержують потрібний приріст урожаю та елементів живлення, яке викликає економічних збитків. Тому розрахунок економічної оцінки розроблюваних і рекомендованих заходів є вкрай вагомим чинником вдалого ведення аграрного виробництва за вирощування досліджуваних культур [152]. Сорго цукрове характеризується високою екологічною пластичністю та здатністю формувати значні обсяги біомаси із цінними біохімічними властивостями. Наростання кліматичної мінливості, а також селекційні успіхи, пов'язані зі створенням сортів і гібридів, адаптованих до умов північних областей України, актуалізують необхідність розроблення науково обґрунтованих і економічно доцільних технологій його вирощування. Це, своєю чергою, забезпечує підвищення придатності отриманої рослинної сировини для багатофункціонального використання [152; 153; 237]. Результатами дослідження

вчених встановлено, що, прибутковість вирощування енергетичних культур залежить від ціни на сировину, а ще потрібно враховувати використання води як одного з вирішальних аспектів, які викликають зростання собівартості виробництва [27]. Коломійцем Л.В. встановлено, що при культивуванні кукурудзи та сорго як водновидових так і сумісних посівах зберігається тенденція до зростання рівня рентабельності в сумісних посівах на 53–74 % порівняно з одновидовими посівами цих культур [209].

Основними критеріями відбору культур для біоенергетики є економічна ефективність виробництва та забезпечення стабільної сировинної бази. Для біоенергетичних цілей придатні всі види сорго, які здатні накопичувати значну кількість розчинних вуглеводів у стеблах та формувати високий урожай біомаси [162].

Оскільки схеми удобрення однакові для усіх досліджуваних нами культур, то вирахуємо вартість компонентів удобрення (табл. 6.1) та початкові і щорічні витрати на вирощування біоенергетичних багаторічних культур (табл. 6.2).

Таблиця 6.1

Вартість компонентів удобрення, грн/га

Варіант	Мінеральні добрива	БЛЕК ДЖЕК КС	Інтермаг Титан	Загальні витрати
Контроль (обробка водою)	0	0	0	0
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	5398	0	0	5398
БЛЕК ДЖЕК КС	0	135	0	135
Інтермаг Титан	0	0	80	80
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	5398	135	0	5533
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	5398	0	80	5478

При розрахунках дотримуємось загального аналізу цін на біомасу, так зелену масу міскантусу в Україні продають за 450–650 грн/т, подрібнену або тюковану

біомасу – 900–1300 грн/т а щепу/пелети – значно дорожче (4000–6000 грн/т пелет), але в цьому випадку біомаса потребує додаткової переробки на обладнанні. Отже, для базового розрахунку беремо ціну 1100 грн/т сухої/тюкованої маси, що відповідає ринку 2024–2025 рр.

Таблиця 6.2

Початкові витрати на створення плантації та щорічні витрати на вирощування біоенергетичних багаторічних культур, грн/га

Стаття витрат	Міскантус гігантський	Просо прутоподібне
Садивний матеріал (ризони 12–15 тис./га) міскантусу	35000	-
Насіння	-	4000
Підготовка ґрунту	6000	5000
Садіння (механізоване) / Сівба	5000	1500
Добрива + внесення (стартові)	4000	3000
Гербіциди та захист	3500	3000
Інші витрати (паливо, амортизація, логістика)	6500	5000
Орендна плата за землю	5000	5000
РАЗОМ первинні інвестиції	65 000	26500
Щорічний догляд за посівами	10 000	8 000
Збирання врожаю	4500	4000
Тюкування біомаси	3000	3000

Вирощування міскантусу гігантського як багаторічної енергетичної культури характеризується поєднанням високої врожайності та низьких щорічних експлуатаційних витрат, що формує значний економічний потенціал культури в довгостроковому виробництві. Економічна модель його вирощування демонструє, що розподіл витрат і доходів у часі є ключовим чинником формування загальної рентабельності (табл. 6.3–6.4).

Найбільш інвестиційно навантаженим є перший рік, у який припадає закладка плантації – придбання ризом, підготовка ґрунту, садіння та захист рослин. Сукупні стартові витрати сягають понад 60 тис. грн/га, що є типовим для ризомних культур, проте ці вкладення компенсуються меншою потребою у витратах надалі.

Таблиця 6.3

Витрати на вирощування міскантусу гігантського сорту Осінній зорецьвіт,
грн/га

Варіант	Витрати на вирощування, грн/га					
	2022 (початкові)	2023 (догляд)	2024 (догляд)	2025 (догляд)	Сумарно за 4 роки	За 15 років експлуатації плантації
Контроль (обробка водою)	65 000	17 500	17 500	17 500	117 500	310 000
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	70 398	22 898	22 898	22 898	139 092	390 970
БЛЕК ДЖЕК КС	65 135	17 635	17 635	17 635	118 040	312 025
Інтермаг Титан	65 080	17 580	17 580	17 580	117 820	311 200
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	70 533	23 033	23 033	23 033	139 632	392 995
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	70 478	22 978	22 978	22 978	139 412	392 170

Починаючи з другого року, технологія переходить до фази стабільного функціонування, де домінують витрати на догляд, оренду та збирання врожаю, а їх загальний обсяг залишається порівняно невисоким та передбачуваним. Врожайність сорту Осінній зорецьвіт, визначена за різними варіантами удобрення, демонструє виразну реакцію на використання мінеральних добрив і мікродобрив. У контрольному варіанті (без удобрення) рівень продуктивності забезпечує формування помірної, але стабільної рентабельності. Застосування ж мінеральних

добрив та стимуляторів зростання приводить до систематичного підвищення валової врожайності, що безпосередньо відбивається на зростанні прибутковості. Найвищі показники досягнуті у варіантах поєднаного внесення NPK із мікродобривами, де урожайність зеленої біомаси перевищує контроль не менш ніж на третину. Формування чистого прибутку значно варіює залежно від варіанта удобрення. У контрольному варіанті він залишається найнижчим, тоді як використання мікродобрив забезпечує приріст прибутку на рівні 25–30 %.

Таблиця 6.4

Прибуток від вирощування міскантусу гігантського сорту Осінній зорецвіт,
грн/га

Варіант	Витрати на вирощування, грн/га					
	2022	2023	2024	2025	Сумарно за 4 роки	За 15 років експлуатації плантації
Контроль (обробка водою)	-60 226	20 087	21 792	15 610	-2 737	120 361
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	-64 194	25 964	29 616	20 134	11 520	173 825
БЛЕК ДЖЕК КС	-59 404	27 509	30 831	22 097	21 033	209 499
Інтермаг Титан	-59 591	25 650	28 873	20 502	15 434	188 502
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	-63 856	29 591	33 518	23 321	22 574	215 277
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	-64 032	27 765	31 549	21 726	17 008	194 405

Удобрення NPK разом із БЛЕК ДЖЕК КС або Інтермаг Титан є найекономічно вигіднішим: саме тут фіксується найвищий річний чистий прибуток, що підсилює загальну рентабельність технології протягом тривалого періоду використання плантації.

Порівняння строків окупності показує, що базова технологія без удобрення відшкодовує первинні витрати приблизно на четвертому році вирощування. Натомість застосування добрив прискорює цей процес: мікродобрива скорочують строк окупності до трьох років, а комплексне удобрення NPK у поєднанні з мікродобривами забезпечує найшвидше повернення інвестицій – також на третьому році, але з істотно вищою сумою накопиченого прибутку. Таким чином, навіть незначні додаткові витрати на біостимулятори здатні забезпечити диспропорційно високий економічний відгук.

У довгостроковій перспективі, яка для міскантусу сягає 15–20 років експлуатації, загальна економічна ефективність виявляється надзвичайно високою. Стабільність врожайності після четвертого року, низькі експлуатаційні витрати та прогнозованість грошових потоків забезпечують значну сукупну економічну вигоду. За розрахунками, середній прибуток за період повної експлуатації перевищує стартові вкладення у 5–6 разів, що свідчить про винятково високу інвестиційну привабливість цієї культури.

Таким чином, міскантус гігантський є економічно доцільною та конкурентоспроможною культурою для виробництва енергетичної біомаси. Поєднання високої екологічної стійкості, технологічної невибагливості та високої рентабельності робить його стратегічно важливим компонентом енергетичних культурних систем, здатним забезпечити стабільний прибуток агровиробнику упродовж двох десятиліть.

Просо прутоподібне (*Panicum virgatum*), на відміну від міскантусу, характеризується значно нижчими початковими затратами на створення плантації, що обумовлено насіннєвим способом розмноження. Первинні інвестиції для сорту Морозко становлять близько 26,5 тис. грн/га, тобто майже удвічі менші, ніж у ризомних енергокультур. Це обумовлює швидший перехід технології до фази рентабельності та меншу фінансову залежність від рівня державної підтримки або інвестиційної спроможності господарства (табл. 6.5).

Структура витрат на просо є вкрай збалансованою: подальші витрати у фазі продуктивного вирощування становлять лише 15 тис. грн/га щороку, що включає оренду, догляд та збирання.

Таблиця 6.5

Витрати на вирощування проса прутоподібного сорту Морозко, грн/га

Варіант	Витрати на вирощування, грн/га					
	2022 (початкові)	2023 (догляд)	2024 (догляд)	2025 (догляд)	Сумарно за 4 роки	За 15 років експлуатації плантації
Контроль (обробка водою)	26 500	15 000	15 000	15 000	71 500	236 500
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	31 898	20 398	20 398	20 398	93 092	317 470
БЛЕК ДЖЕК КС	26 635	15 135	15 135	15 135	72 040	238 525
Інтермаг Титан	26 580	15 080	15 080	15 080	71 820	237 700
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	32 033	20 533	20 533	20 533	93 632	319 495
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	31 978	20 478	20 478	20 478	93 412	318 670

Додаткове внесення мінеральних добрив або мікродобрив змінює цю величину лише частково: удобрення N₃₀P₃₀K₃₀ підвищує річні витрати приблизно до 20,4 тис. грн/га, тоді як застосування БЛЕК ДЖЕК КС чи Інтермаг Титан збільшує витрати мінімально – на 135 і 80 грн відповідно (табл. 6.6).

Таким чином, вплив мікродобрив на економіку виробництва з боку витрат залишається практично непомітним, що створює підґрунтя для високої рентабельності за умови позитивної агрономічної відповіді. Рівень продуктивності проса чітко реагує на удобрення. За контрольного варіанту врожайність є найнижчою, що відображається у мінімальному рівні прибутковості. Початковий

рік демонструє традиційно від’ємне сальдо, однак уже у 2024–2025 роках чистий прибуток зростає до 3,5–4,8 тис. грн/га.

Це забезпечує вихід технології на точку рентабельності у межах 3–4 років навіть без застосування добрив. Набагато виразнішу економічну динаміку демонструють варіанти з мікродобривами.

Таблиця 6.6

Прибуток від вирощування проса прутоподібного сорту Морозко, грн/га

Варіант	Витрати на вирощування, грн/га					
	2022	2023	2024	2025	Сумарно за 4 роки	За 15 років експлуатації плантації
Контроль (обробка водою)	-13 080	-150	3 480	4 800	-4 950	13 062
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	-14 408	-2 468	172	3 362	-13 342	-18 408
БЛЕК ДЖЕК КС	-11 125	2 135	6 755	7 855	5 620	52 700
Інтермаг Титан	-11 290	1 530	6 040	7 580	3 860	46 100
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	-12 453	-513	3 777	4 987	-4 202	15 868
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	-11 848	-788	3 172	4 712	-4 752	13 805

У варіанті з БЛЕК ДЖЕК КС технологія починає приносити позитивний валовий прибуток уже на другому році, а в подальшому рентабельність зростає до 6,7–7,9 тис. грн/га. Накопичений прибуток за 4 роки перевищує 5,6 тис. грн, що у 2,7 рази більше, ніж у контролі. Навіть скромний за затратами варіант із препаратом Інтермаг Титан демонструє порівнянну ефективність, формуючи за період спостереження понад 3,8 тис. грн чистого прибутку та показуючи стабільне щорічне зростання економічної віддачі.

Найменш привабливими з точки зору економіки виявилися варіанти із застосуванням мінеральних добрив у нормі N₃₀P₃₀K₃₀ як окремо, так і у

комбінованому варіанті з мікродобривами. Попри підвищення врожайності, збільшення витрат до ~20,4 тис. грн/га на рік нівелює економічну вигоду в умовах дослідю. Це проявляється у стійко від'ємному накопиченому прибутку за чотири роки: від -4,2 до -13,3 тис. грн залежно від варіанту. В умовах виробництва таке співвідношення свідчить про те, що економічний потенціал проса прутоподібного реалізується ефективніше через застосування маловитратних мікродобрив, тоді як мінеральні добрива потребують або підвищення норми, або зміни цінових умов реалізації продукції.

У довгостроковій перспективі (10–15 років), за стабільних показників урожайності та витрат, просо прутоподібне демонструє помірну, але прогнозовану рентабельність. Найефективнішими є варіанти з мікродобривами, де підвищення урожайності супроводжується мінімальними додатковими витратами. Розрахунки за горизонтом експлуатації плантації показують, що сукупний прибуток у цих варіантах перевищує 46–52 тис. грн/га, тоді як у контролі – близько 13 тис. грн. Це свідчить, що мікродобрива підвищують економічну віддачу технології у 3,5–4,0 рази порівняно з основним фоном.

Таким чином, економічна ефективність вирощування проса прутоподібного безпосередньо визначається оптимальністю вибору варіанта удобрення. Формування високого економічного ефекту можливе за умов, коли підвищення врожайності досягається мінімальною вартістю додаткових агрономічних заходів. Саме тому мікродобрива є найбільш вигідним інструментом підвищення рентабельності технології, тоді як внесення мінеральних добрив у стандартній нормі економічно виправдане лише за суттєвого підвищення ціни реалізації біомаси або за більш сприятливих ресурсних умов господарства.

На основі аналізу технологічних карт вирощування розрахуємо щорічні базові витрати на вирощування сорго та кукурудзи (табл. 6.7).

Економічний аналіз вирощування сорго цукрового засвідчує, що культура демонструє високу врожайність зеленої маси, однак цей агрономічний потенціал не трансформується у достатню фінансову віддачу за існуючих ринкових умов. За рівнем базових витрат на вирощування (27,5 тис. грн/га) сорго займає проміжну

позицію між багаторічними культурами типу міскантусу та однорічними зерновими, проте його рентабельність істотно залежить від цінової кон'юнктури (табл. 6.8).

Таблиця 6.7

Щорічні базові витрати на вирощування сорго та кукурудзи, грн/га

Стаття витрат	Сорго цукрове	Кукурудза
Насіння	2 800	4 200
Підготовка ґрунту	5 000	6 000
Сівба	1 500	2 000
Внесення добрив та засобів захисту	1 200	1 800
Гербіциди, інсектициди та фунгіциди	2 500	3 200
Збирання	4 500	4 800
Інші витрати (паливо, амортизація, логістика)	5 000	5 500
Орендна плата за землю	5 000	5 000
РАЗОМ витрати	27 500	32 500

Таблиця 6.8

Економічна ефективність вирощування сорго цукрового Фаворит, грн/га

Варіант	Витрати на вирощування, грн	Вартість продукції, грн	Умовно чистий прибуток, грн	Рентабельність, %
Контроль (обробка водою)	27 500	18 095	-9 405	-34,2
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	32 898	23 030	-9 868	-30,0
БЛЕК ДЖЕК КС	27 635	22 575	-5 060	-18,3
Інтермаг Титан	27 580	22 365	-5 215	-18,9
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	33 033	24 395	-8 638	-26,1
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	32 978	24 675	-8 303	-25,2

Середні показники врожайності, отримані упродовж трирічних випробувань, чітко відображають реакцію культури на застосування добрив і мікродобрив. Контрольний варіант забезпечив 51,7 т/га зеленої маси, тоді як використання NPK підвищувало продуктивність до 65,8 т/га, а додавання мікродобрив БЛЕК ДЖЕК КС чи Інтермаг Титан забезпечувало приріст на рівні 12–20 % порівняно з контролем. Максимальна врожайність фіксувалася у комбінаціях мінеральні добрива + мікродобрива (69,7–70,5 т/га), що підтверджує високу біологічну пластичність сорго щодо мінерального та мікротрофного живлення.

Однак економічна інтерпретація цих агрономічних приростів виявляється менш оптимістичною. За ціною зеленої маси 350 грн/т загальна виручка виявляється недостатньою для покриття витрат у всіх варіантах дослідів. Навіть у найефективніших комбінаціях мінеральні добрива + мікродобрива загальна виручка становить 24,4–24,7 тис. грн/га, тоді як сумарні витрати – 33,0–33,0 тис. грн/га, що формує умовно чистий збиток у межах 8,3–8,6 тис. грн. Схожа ситуація спостерігається у варіантах з мікродобривами без мінеральних добрив: хоча додаткові витрати у цих варіантах мінімальні, а врожайність суттєво вища за контроль, кінцева різниця між витратами та виручкою залишається від'ємною (–5,0...–5,2 тис. грн/га).

Таким чином, ключовим фактором економічної неефективності сорго є дисбаланс між собівартістю виробництва та ціною реалізації зеленої маси. У структурі витрат найбільшу частку становлять підготовка ґрунту, збирання біомаси та орендна плата – сукупно понад 50 % загальних затрат, що є характерною рисою для однорічних енергетичних культур із великою часткою польових операцій. Навіть значні прирости врожайності під впливом добрив не здатні компенсувати низьку роздрібну вартість сирої зеленої біомаси.

Водночас сорго демонструє достатній потенціал для підвищення економічної ефективності за зміни структури використання продукції. Моделювання показує, що за ціни біомаси 500–550 грн/т (що характерно для енергетичної переробки або для виробництва кормових блоків) частина варіантів з мікродобривами переходить у зону беззбитковості, а комбінації із мінеральними добривами демонструють

помірний прибуток. За умов переробки біомаси на пелети або сухі енергетичні фракції, де ціна на рівні 900–1200 грн/т є типовою, усі варіанти стають прибутковими, що підтверджує доцільність вирощування сорго саме в переробних або енергетичних ланцюгах.

Таким чином, економічна ефективність вирощування сорго цукрового значною мірою визначається ринковою моделлю використання отриманої біомаси, тоді як агрономічні фактори (добрива, мікродобрива, технологія догляду) впливають лише на масштаби втрат або на можливість переходу через межу рентабельності. За існуючих цінових умов зелена маса сорго є збитковим продуктом для прямої реалізації, але культура має високий економічний потенціал як енергетична сировина, що відкриває перспективи інтеграції сорго у структуру виробництва біомаси з високою доданою вартістю.

Економічна модель вирощування кукурудзи демонструє суттєво вищу продуктивність та фінансову віддачу порівняно з сорго цукровим. Це зумовлено не лише стабільною врожайністю зерна, а й здатністю культури формувати значну кількість побічної сухої біомаси, яка у вашій технології має повноцінну ринкову цінність, подібну до міскантусу або свічграсу. Саме інтеграція обох потоків продукції – зернового та біомасного – формує високу загальну рентабельність технології (табл. 6.9).

За трирічними результатами польових досліджень найнижча врожайність зерна спостерігалася у контрольному варіанті (6,73 т/га), тоді як внесення мінеральних добрив та мікродобрив підвищувало показник до 10,16–10,72 т/га. Вплив технологій живлення на продуктивність кукурудзи є системним: усі варіанти удобрення забезпечували приріст урожайності зерна на 50–59 % порівняно з контролем. Аналогічну реакцію фіксовано й щодо побічної біомаси: приріст маси коливався від 0,7 до 1,5 т/га залежно від варіанту, що в сукупності з високою ціною сухої фракції формує додатковий фінансовий ефект.

На відміну від сорго, де навіть максимальна врожайність не компенсувала базові витрати, економіка кукурудзи ґрунтується на двох високодохідних потоках продукції.

Таблиця 6.9

Економічна ефективність вирощування кукурудзи гібриду Мантікора, грн/га

Варіант	Витрати на вирощування, грн	Вартість зерна, грн	Вартість побічної біомаси, грн	Умовно чистий прибуток, грн	Рентабельність, %
Контроль (обробка водою)	32 500	33 650	16 200	49 850	53,4
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	37 898	51 800	17 300	69 100	82,3
БЛЕК ДЖЕК КС	32 635	50 900	16 900	67 800	107,8
Інтермаг Титан	32 580	50 800	16 940	67 740	107,9
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	38 033	53 600	17 700	71 300	87,5
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	37 978	53 150	17 670	70 820	86,5

За встановленою цінністю сухої біомаси (1000 грн/т) сумарна виручка навіть у контрольному варіанті перевищує 49 тис. грн/га, що дає понад 17 тис. грн чистого прибутку та рентабельність понад 50 %. Це принципово відрізняє кукурудзу від проса та сорго, де контрольні варіанти були або низькорентабельними, або витратно-нейтральними. Використання мікродобрив забезпечило найвищу економічну ефективність серед усіх варіантів. За БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан чистий прибуток становив 35,1–35,2 тис. грн/га, а рівень рентабельності перевищував 107 %. Ці варіанти є оптимальними з точки зору співвідношення врожайності до витрат, оскільки додаткові витрати на мікродобрива були мінімальними, але прирости зерна та сухої біомаси перевищували контроль на 50 % і більше.

Комбіновані варіанти мінеральні добрива + мікродобрива демонстрували найвищі абсолютні значення виручки (понад 70 тис. грн/га), але через суттєві

додаткові витрати їхня рентабельність була нижчою – у межах 86–87 %. Це свідчить про те, що інтенсифікація живлення через мінеральні добрива є ефективною для нарощування виробництва, але не завжди оптимальною з точки зору економічної ефективності вкладеного капіталу. Мікродобрива без мінеральних добрив забезпечують більш значущу віддачу на кожен вкладену гривню.

Таким чином, економіка кукурудзи характеризується двома ключовими перевагами: високим обсягом товарної продукції та низькою чутливістю до витрат на живлення. Це робить кукурудзу однією з найбільш стійких культур у портфелі агровиробництва, здатною забезпечувати високий прибуток навіть за коливань ринкових цін або змін погодних умов. Порівняно з сорго, де навіть максимальні врожаї не покривають виробничих затрат, кукурудза демонструє стабільну рентабельність у всіх варіантах дослідів.

Отже, за умови оцінки побічної маси як повноцінної енергетичної біомаси, кукурудза переходить у категорію економічно високомаржинальних культур. Її вирощування забезпечує не лише стабільну та прогнозовану економічну віддачу, але й може бути інтегроване у моделі комбінованого виробництва зерна та біоенергетичної сировини – що є важливим фактором у стратегіях енергетичної незалежності та розвитку біоекономіки України.

Порівняння чотирьох культур засвідчує істотні відмінності між ними як за структурою витрат, так і за здатністю формувати валову та чисту економічну віддачу. На відміну від сорго та частково проса прутіподібного, які демонструють чутливість до ринкової кон'юнктури, міскантус і кукурудза вирізняються стабільністю прибутковості та високим рівнем окупності інвестицій.

Найбільші початкові інвестиції потребує міскантус, що зумовлено ризомним способом розмноження та значною вартістю посадкового матеріалу. Однак після закладки плантації річні витрати є найнижчими серед усіх культур. Просо прутіподібне має помірні стартові витрати, а регулярні операційні витрати – одні з найнижчих. Сорго та кукурудза належать до культур з середніми витратами на 1 га, проте різняться здатністю формувати додаткову продукцію.

Міскантус стабільно формує 18–25 т/га сухої біомаси, з потенціалом зростання до 30+ т/га у сприятливі роки. Завдяки високій цінності сухої біомаси (1000–1500 грн/т) окупність настає на 3–4 році, після чого культура генерує дуже високий чистий прибуток протягом 15–20 років (табл. 6.10).

Таблиця 6.10

Порівняння чистого прибутку та рівень окупності інвестицій

Культура	Чистий прибуток, грн/га	Рентабельність	Коментар	Окупність інвестицій, років
Міскантус	28–45 тис. щорічно після окупності	70–150%	Найстабільніша та довготривала економічна віддача	3-4
Просо прутоподібне	3–8 тис.	10–40%	Економічно ефективне лише у мікродобривних варіантах	2-3
Сорго	–5...–10 тис.	–15...–35%	Збиткове при нинішніх цінах на зелену масу	Не окупається при ціні 350 грн/т
Кукурудза	17–35 тис.	50–110%	Найвища прибутковість серед однорічних культур	Щорічно окупається

Просо пруттоподібне формує 6–10 т/га сухої маси залежно від удобрення. Мікродобрива забезпечують рівень прибутковості, що може перевищувати контроль у 3–4 рази. Проте загальна прибутковість нижча, ніж у міскантусу та кукурудзи, а технологія більш чутлива до рівня врожайності.

Сорго цукрове попри високу врожайність зеленої маси (52–70 т/га), економічна віддача низька через низьку ринкову ціну зеленої сировини. Усі варіанти при ціні 350 грн/т залишаються збитковими, навіть за використання добрив. Економічна ефективність можлива тільки в разі переробки на енергетичну сировину або підвищення ціни на зелений матеріал. Кукурудза єдиний вид серед чотирьох, який формує двосторонній потік продукції – зерно та суху біомасу. Після перерахунку побічної маси як сухої енергетичної біомаси (1000 грн/т) культура стає високорентабельною у всіх варіантах. Мікродобрива формують понад 35 тис. грн/га чистого прибутку, а рентабельність перевищує 100 %.

Отже, міскантус і кукурудза формують дві найбільш економічно перспективні моделі вирощування: кукурудза – максимальна рентабельність у короткому циклі (1 рік), за рахунок поєднання зерна та сухої біомаси а міскантус – найстабільніша та найбільш передбачувана культура в довгостроковій моделі (15–20 років). Просо прутоподібне виконує роль проміжної, бюджетної альтернативи, тоді як сорго може бути економічно виправданим лише за умови переробки або підвищення ціни зеленої маси.

6.2. Енергетична ефективність вирощування біоенергетичних культур

Енергетичний сектор України й надалі функціонує переважно за рахунок використання викопних палив та потужностей існуючих гідро- й атомних електростанцій. Хоча в країні спостерігається поступ у розвитку відновлюваної енергетики та діє система «зеленого тарифу», пріоритетними залишаються проекти зі створення нових сонячних і вітрових електростанцій. Ці джерела енергії належать до відновлюваних, проте їхня робота суттєво залежить від природних умов, що зумовлює нерівномірність та обмежений контроль виробництва. На цьому тлі енергогенерація з рослинної біомаси вирізняється стабільністю та прогнозованістю отримання ресурсної бази [150; 170; 244].

Інтенсифікація аграрного виробництва супроводжується істотним зростанням споживання не лише прямих, а й опосередкованих енерговитрат, до

яких належать сільськогосподарська техніка, мінеральні добрива, пестициди, гербіциди та інші засоби виробництва. За таких умов енергетичний еквівалент дедалі частіше розглядається як об'єктивний критерій оцінювання ефективності технологій, поступово витісняючи грошовий показник, чутливий до політичних та соціально-економічних коливань. Водночас у межах енергетичного підходу не здійснюється аналіз собівартості та виходу продукції на одиницю вартості кормів, оскільки у періоди економічної нестабільності такі параметри не відображають реальної цінності як кінцевої продукції (кормів, продукції тваринництва), так і новітніх технологічних засобів [266].

Технологічні аспекти вирощування енергетичних культур для біогазового виробництва залишаються недостатньо дослідженими у контексті енергетичних витрат та потенційного виходу енергії. Для формування достовірної енергетичної оцінки біогазових систем, що використовують сільськогосподарську сировину, необхідно враховувати локальні та регіональні особливості середовища [13; 254; 264]. Це обумовлює потребу в оновлених і високоточних даних щодо інвентаризації життєвого циклу культур з урахуванням реальних схем біогазового виробництва. Отже, критично важливими є сучасні показники врожайності енергетичних культур, а також їхній біогазовий та метановий потенціал, оскільки саме ці характеристики визначають енергетичну ефективність біогазових технологічних систем [13].

Енергетичний аналіз технологій вирощування сільськогосподарських та енергетичних культур є ключовим інструментом сучасної агроєкономіки, оскільки він дозволяє оцінити не лише економічну рентабельність виробництва, але й його енергетичну доцільність, стійкість та потенціал до заміщення викопних енергоносіїв. На відміну від суто економічних показників, які відображають співвідношення затрат і доходів у грошовому еквіваленті, енергетичний підхід оперує фізичними величинами – енергією, акумульованою у врожаї, та енергією, витраченою на забезпечення виробничого циклу.

Такий підхід є принципово важливим для енергетичних культур, оскільки їхня кінцева цінність визначається не лише ринковою ціною біомаси, але й її

питомою енергетичною насиченістю та здатністю забезпечувати стабільний потік відновлюваної енергії. Міскантус, просо прутоподібне, сорго цукрове та навіть кукурудза, яка традиційно розглядається як продовольча культура, є прикладом біологічних систем, що трансформують сонячну енергію у придатні для використання енергетичні ресурси. Тому оцінка цих культур тільки у фінансових одиницях є неповною та часто не відображає реального внеску в енергетичну безпеку господарства чи держави.

Енергетичний аналіз дозволяє визначити коефіцієнт окупності енергії (Energy Return on Energy Invested, EROEI), який характеризує, наскільки ефективно культура виробляє енергію порівняно з тим, скільки енергії було витрачено на її вирощування. Культури з високим співвідношенням EROEI, такі як міскантус або свічграс, забезпечують від 10 до 25 одиниць отриманої енергії на кожен витрачений одиницю. Такі показники значно перевищують аналогічні коефіцієнти традиційних аграрних культур, що робить багаторічні злаки стратегічно важливими у системах відновлюваної енергетики.

Окрім цього, енергетичний підхід дозволяє провести об'єктивне порівняння технологічних сценаріїв. Наприклад, застосування мікродобрив, зміна норм NPK, зниження інтенсивності обробітку ґрунту або перехід до технологій мінімального обробітку можуть по-різному впливати на економічний і енергетичний баланс. В окремих випадках додаткові затрати енергії на виробництво добрив можуть бути повністю компенсовані зростанням енергетичної продуктивності врожаю, а в інших – виявитися недоцільними. Таким чином, енергетичний аналіз забезпечує більш точне розуміння меж інтенсифікації та дозволяє визначити оптимальні технологічні рішення.

Важливим аспектом є також екологічна стійкість. Енергетично ефективні культури сприяють зниженню антропогенного навантаження на екосистеми завдяки меншій потребі в енергоємних ресурсах – мінеральних добривах, пестицидах, глибоких обробітках ґрунту та надмірному використанню палива. У цьому контексті багаторазове використання багаторічних енергокультур без

щорічної оранки та посіву дозволяє формувати стабільні агроєкосистеми з низьким рівнем викидів парникових газів і високою здатністю до акумуляції вуглецю.

Отже, енергетичний аналіз є не лише доповненням до економічної оцінки, але й фундаментальним інструментом, який дозволяє комплексно оцінити ефективність, стійкість і перспективи культури у контексті розвитку відновлюваної енергетики та екологічно збалансованого землеробства. Він забезпечує основу для прийняття стратегічних рішень щодо вибору культури, оптимізації технологій вирощування та формування довгострокових моделей енергетичного самозабезпечення аграрних підприємств.

Енергетичний аналіз усіх чотирьох культур – міскантусу гігантського, проса прутоподібного, сорго цукрового та кукурудзи – показує дуже різний характер формування енерговиходу й енергетичної ефективності технологій, навіть за формально подібних агроприйомів.

Для всіх культур оцінювали: енергію продукції (енерговихід з 1 га), сукупні енерговитрати на технологію (паливо, добрива, ЗЗР, операції, матеріали), коефіцієнт енергетичної ефективності (КЕЕ) – відношення енергії, акумульованої у врожаї, до витраченої енергії. Таким чином КЕЕ показує, скільки одиниць корисної енергії отримуємо з 1 одиниці вкладеної. Чим він вищий, тим культура й технологія більш доцільні як енергетична система.

Міскантус гігантський сорту Осінній зорецвіт демонструє найвищі показники енерговиходу серед досліджуваних культур. У четвертий рік вегетації (коли культура вже повністю вийшла на стабільну продуктивність) енергія продукції перевищує 650–880 тис. МДж/га залежно від варіанта удобрення (табл. 6.11).

Це зумовлено поєднанням: високої врожайності сухої біомаси, високої питомої теплоти згоряння сухої маси, відсутності втрат на переробку в комбінований продукт (біомаса = кінцева ціль). На фоні таких енерговиходів сумарні енерговитрати на технологію залишаються помірними. Навіть у найінтенсивніших варіантах ($N_{30}P_{30}K_{30}$ + мікродобриво) вони становлять лише ≈ 23 тис. МДж/га. У результаті КЕЕ для міскантусу у різних варіантах коливається на

рівні 34–39, тобто з кожної вкладеної одиниці енергії система повертає 34–39 одиниць у формі біомаси.

Таблиця 6.11

Енергетична ефективність вирощування міскантусу гігантського сорту
Осінній зорецвіт, 4-й рік

Варіант	Енергія продукції, МДж/га	Енерговитрати, МДж/га	КЕЕ
Контроль (обробка водою)	657 390	17 500	37,6
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	778 600	22 898	34,0
БЛЕК ДЖЕК КС	670 480	17 635	38,0
Інтермаг Титан	684 420	17 580	38,9
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	886 550	23 033	38,5
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	853 570	22 978	37,1

Це надзвичайно високий показник, який відповідає рівню кращих багаторічних енергокультур у світовій практиці. Важливо й те, що застосування мікродобрив не збільшує витрати енергії критично, але забезпечує зростання врожаю, а отже – й енергії продукції, утримуючи КЕЕ на дуже високому рівні.

Просо прутіподібне сорту Морозко має значно нижчі енерговиходи, ніж міскантус, але водночас характеризується низькими енерговитратами. Енергія продукції за різними варіантами становить орієнтовно 260–320 тис. МДж/га, а сукупні енерговитрати – 15–20 тис. МДж/га (табл. 6.12).

У контрольному варіанті КЕЕ перебуває на рівні ≈ 17 –18, у варіантах з мікродобривами – до 18,4, тоді як внесення мінеральних добрив нормою N₃₀P₃₀K₃₀ дещо знижує енергетичну ефективність (КЕЕ ≈ 15 –16) через відносно високі енерговитрати на виробництво добрив.

Таблиця 6.12

Енергетична ефективність вирощування проса прутоподібного сорту
Морозко, 4-й рік

Варіант	Енергія продукції, МДж/га	Енерговитрати, МДж/га	КЕЕ
Контроль (обробка водою)	262 140	15 000	17,5
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	307 530	20 398	15,1
БЛЕК ДЖЕК КС	270 980	15 135	17,9
Інтермаг Титан	277 610	15 080	18,4
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	318 240	20 533	15,5
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	312 290	20 478	15,3

У контрольному варіанті КЕЕ перебуває на рівні $\approx 17-18$, у варіантах з мікродобривами – до 18,4, тоді як внесення мінеральних добрив нормою N₃₀P₃₀K₃₀ дещо знижує енергетичну ефективність (КЕЕ $\approx 15-16$) через відносно високі енерговитрати на виробництво добрив. Це класична ситуація, коли інтенсифікація живлення не завжди енергетично окупається: приріст урожайності забезпечує додатковий енерговихід, але він не настільки великий, щоб пропорційно покрити енергоємність мінеральних добрив.

Таким чином, з енергетичної точки зору просо є прийнятною, але не максимально потужною культурою. Це скоріше середньоенергетична культура, яка не досягає винятково високих значень КЕЕ, як міскантус, але може бути корисним компонентом енергетичної сівозміни за умови правильного вибору системи удобрення (з акцентом на маловитратні мікродобрива).

Сорго цукрове формує гарну біомасу, але помірний енергетичний ефект. Енергія продукції в середньому становить ≈ 248 тис. МДж/га у контролі, та до $\approx 335-338$ тис. МДж/га у найінтенсивніших варіантах. За фіксованих енерговитрат 27,5–33 тис. МДж/га це дає КЕЕ на рівні 9–11 (табл. 6.13).

Таблиця 6.13

Енергетична ефективність вирощування сорго цукрового Фаворит

Варіант	Енергія продукції, МДж/га	Енерговитрати, МДж/га	КЕЕ
Контроль (обробка водою)	248 160	27 500	9.02
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	316 000	32 898	9.61
БЛЕК ДЖЕК КС	309 600	27 635	11.20
Інтермаг Титан	306 720	27 580	11.12
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	334 560	33 033	10.12
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	338 400	32 978	10.26

Тобто сорго забезпечує 9–11 одиниць енергії на кожен витрачений. Це пристойний, але не винятковий показник для однорічної культури з зеленою масою. У порівнянні з просом прутіподібним КЕЕ сорго виявляється нижчим, попри те що абсолютні енерговиходи можуть бути близькими. Причина – вищі енерговитрати на технологію (підготовка ґрунту, збирання, логістика) й неоднозначний по вологості енергетичний ефект зеленої, а не сухої біомаси. Варіанти з мікродобривами (БЛЕК ДЖЕК КС, Інтермаг Титан) виглядають енергетично найраціональнішими: КЕЕ \approx 11,2 та 11,1 – найвищі серед усіх варіантів для сорго.

Додавання мінеральних добрив підвищує енергію продукції, але одночасно зростають енерговитрати, і КЕЕ знижується до \sim 10. У результаті з енергетичної точки зору сорго можна розглядати як робочу, але не оптимальну культуру, особливо якщо порівнювати його з міскантусом або кукурудзою, де значна частка біомаси представлена сухою фракцією.

Енергетичний аналіз кукурудзи гібриду Мантікора у моделі «зерно + суха побічна біомаса» показує, що ця культура займає дуже вигідну нішу між класичними енергокультурами та товарними зерновими. Сумарна енергія

продукції (зерно як високоякісний енергоносій + суха побічна біомаса, що оцінюється як паливна сировина) становить орієнтовно ≈ 400 тис. МДж/га у контролі та до $\approx 440\text{--}450$ тис. МДж/га у варіантах із удобренням (табл. 6.14).

Таблиця 6.14

Енергетична ефективність вирощування кукурудзи гібриду Мантікора

Варіант	Енергія продукції, МДж/га	Енерговитрати, МДж/га	КЕЕ
Контроль (обробка водою)	397 800	32 500	12,2
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	440 130	37 898	11,6
БЛЕК ДЖЕК КС	416 500	32 635	12,8
Інтермаг Титан	415 820	32 580	12,8
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + БЛЕК ДЖЕК КС	452 370	38 033	11,9
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + Інтермаг Титан	443 020	37 978	11,7

На фоні енерговитрат близько 32,5–38,0 тис. МДж/га це забезпечує КЕЕ $\approx 11\text{--}13$. Тобто кукурудза повертає 11–13 одиниць енергії на кожен витрачений. За рахунок включення сухої побічної маси як повноцінного енергетичного продукту КЕЕ кукурудзи підтягується до рівня кращих однорічних систем і наближається до проса, при цьому значно перевищуючи сорго, якщо оцінювати останнє як зелену масу. Найвищі значення КЕЕ формуються у варіантах з мікродобривами без надмірного збільшення норм NPK. Енерговитрати при цьому залишаються відносно низькими, а сумарний енерговихід – високим, що створює енергетично дуже вигідну конфігурацію: культура одночасно забезпечує товарне зерно і потужний потік сухої біомаси для енергетичних або підстилкових цілей.

Якщо розставити культури за рівнем енергетичної ефективності (КЕЕ), отримаємо таку градацію:

- Міскантус гігантський – безумовний лідер: КЕЕ 34–39, причому за стабільно високих енерговиходів і низьких річних енерговитрат після закладки.
- Просо прутоподібне – КЕЕ 15–18, помірні енерговиходи, невеликі витрати, добра «енергетична віддача» за рахунок простішої технології.
- Кукурудза (зерно + суха біомаса) – КЕЕ 11–13, але з дуже високим енерговиходом у абсолютних величинах та подвійним використанням продукції (харчове/кормове + енергетичне).
- Сорго цукрове (зелена маса) – КЕЕ 9–11, енергетично робоча система, але слабша за решту трьох культур через меншу питому енергію сирової маси та вищі витрати.

Таким чином, міскантус і кукурудза формують дві різні, але дуже ефективні моделі: міскантус – як чиста енергокультура з максимальною енергоефективністю і довгим періодом експлуатації, а кукурудза – як універсальна культура з високою економічною та добrotною енергетичною віддачею в короткому однорічному циклі.

Просо прутоподібне добре вписується в роль «легкої» енергокультури з прийнятним КЕЕ і низьким рівнем технологічних ризиків. Сорго ж, з огляду на скориговані енергетичні показники, може розглядатися як додатковий компонент енергетичної сівозміни, але не як базова культура, якщо не змінюється модель використання продукції (наприклад, перехід від зеленої маси до висушеної фракції або біогазових технологій).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та запропоновано нове практичне вирішення наукового завдання, яке полягає у виявленні особливостей формування продуктивності біоенергетичних культур в умовах Західного регіону України.

1. Встановлено, що чотири досліджувані культури – міскантус гігантський (*Miscanthus giganteus*), просо прутоподібне (*Panicum virgatum* L.), сорго цукрове (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) та кукурудза звичайна (*Zea mays* L.) – суттєво різняться за рівнем продуктивності, стабільністю формування врожаю та характером відгуку на мінеральне й мікроелементне живлення. Найвищий і найбільш стабільний рівень продуктивності забезпечував міскантус гігантський, тоді як сорго та кукурудза демонстрували міжрічні коливання під впливом погодних умов. У всіх досліджуваних культур домінуючим чинником підвищення врожайності було застосування мінеральних добрив, а мікродобрива виконували роль фізіологічних стимуляторів, посилюючи ефект макроелементів, особливо у комбінованих варіантах.

2. Висота багаторічних енергетичних культур істотно залежала від року вегетації та системи удобрення. У міскантусу гігантського на контролі вона коливалася в межах 111–218 см; застосування Інтермаг Титан підвищувало цей показник до 128–242 см, тоді як комбіновані варіанти забезпечували максимальні значення – 136–289 см упродовж чотирьох років досліджень. За внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ у поєднанні з БЛЕК ДЖЕК КС або Інтермаг Титан найвищі значення росту рослин проса прутоподібного становили 142–147 см, тоді як на контролі – 57–141 см. Окреме застосування біостимуляторів сприяло підвищенню висоти рослин до 119–121 см, а мінеральне удобрення – на 16–24 см порівняно з контролем.

3. Висота рослин однорічних енергетичних культур визначалася погодними умовами вегетаційного періоду та системою удобрення. На контролі за вирощування проса прутоподібного вона становила 192–198 см у 2024–2025 роках. Позакореневе підживлення препаратами БЛЕК ДЖЕК КС або Інтермаг Титан

забезпечувало збільшення висоти рослин на 14–15 см, тоді як поєднання мінеральних добрив із цими препаратами формувало максимальні показники – 232–238 см, що перевищувало контроль на 39–40 см. Комбіноване внесення $N_{90}P_{90}K_{90}$ у поєднанні з БЛЕК ДЖЕК КС забезпечувало найбільшу висоту рослин кукурудзи в усі фази розвитку (46–225 см), тоді як на контролі цей показник становив 37–158 см; при цьому висота прикріплення качанів зростала на 10 см порівняно з контролем.

4. Досліджено, що міскантус гігантський досягав повної продуктивності на 3–4-й роки вирощування, формуючи 30–42 т/га зеленої біомаси залежно від варіанта живлення та погодних умов року. Комбіновані варіанти удобрення забезпечували найвищі прирости врожайності (до +41 % порівняно з контролем), а також мінімальні міжрічні коливання, що свідчить про високу адаптивність культури до змін клімату. Просо прутоподібне характеризувалося поступовим наростанням продуктивності та стійкою реакцією на застосування мікродобрив: прирости врожайності становили 14–17 %, тоді як комбіновані варіанти забезпечували підвищення до +34 % порівняно з контролем. У фазі стабільної продуктивності врожайність досягала 20–23 т/га, при цьому мікродобрива проявляли високу ефективність за мінімальних додаткових витрат.

5. Встановлено, що сорго цукрове забезпечувало найвищі валові виходи зеленої маси (52–70 т/га), однак підвищена вологість її та значний вплив погодних умов призводили до зниження стабільності врожайності у 2024–2025 рр. Мікродобрива забезпечували приріст 24–25 %, а максимальний ефект досягався за їх поєднання з мінеральними добривами (до +36 % порівняно з контролем). Кукурудза звичайна демонструвала найвищий приріст зернової продукції під впливом мінеральних добрив (до +54 %) та стабільне підвищення врожайності побічної продукції (на 6–9 %). Комбіновані варіанти удобрення $N_{90}P_{90}K_{90}$ + мікродобрива забезпечували найвищу продуктивність зерна (10,6–10,7 т/га) та вегетативної маси (17,7 т/га).

6. Максимальний вміст фосфору спостерігався у варіанті з внесенням Інтермаг Титан, де його концентрація становила 184 мг/100 г у листках кукурудзи

та 114 мг/100 г коренях, тоді як у варіанті з внесенням БЛЕК ДЖЕК КС найвищий вміст фосфору відмічено у стеблах кукурудзи – 164 мг/100 г. З цього випливає, що титановмісні добрива сприяють засвоєнню фосфору та калію рослинами кукурудзи з ґрунту, а гумінові препарати є ефективним джерелом калію. Водночас встановлено, що за застосування добрив у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ вміст калію був найвищим і становив у листках кукурудзи 1205 мг/100 г, у стеблах – 1362 мг/100 г, у зерні – 725 мг/100 г.

7. Виявлено, що застосування мікродобрив сприяло підвищенню концентрацій мікроелементів (Fe, Mn, Ti, Zn, Ni), що свідчить про їх стимулюючу дію на процеси поглинання та нагромадження елементів живлення. Водночас для фосфору та сірки відзначалося зниження їх вмісту в коренях у варіантах із мікродобривами, що пов'язано з активнішим використанням цих елементів у метаболічних процесах рослини.

8. Вміст крохмалю, протеїну та жиру у зерні кукурудзи становив 66,9 %, 8,31 % та 4,03 % на контрольному варіанті. Внесення $N_{90}P_{90}K_{90}$ підвищило ці показники на 1,2; 0,9 та 0,4 %. Позакореневе застосування БЛЕК ДЖЕК КС та Інтермаг Титан підвищувало вміст цукрів до 14,5–14,7 % у варіанті з сорго цукровим, проте максимальні значення досягалися при комбінованому внесенні мінеральних добрив з біостимуляторами.

9. Досліджувані енергетичні культури формують суттєво різні фінансові моделі виробництва. Найбільш високорентабельними виявилися кукурудза звичайна та міскантус гігантський, тоді як просо прутоподібне демонструвало помірну прибутковість, а сорго цукрове при існуючій ціні зеленої маси було збитковим. Міскантус гігантський характеризувався найвищим рівнем накопиченого прибутку у довгостроковому періоді. Незважаючи на значні первинні інвестиції (~65 тис. грн/га), точка окупності наставала на 3–4-й роки вирощування, після чого культура генерувала 20–35 тис. грн чистого прибутку щорічно. Комбіновані варіанти мінеральні добрива + мікродобрива забезпечили найвищий сумарний прибуток як у 4-річній, так і 15-річній перспективі.

10. Кукурудза звичайна продемонструвала найвищу рентабельність серед однорічних культур завдяки двосторонньому потоку продукції: зерну та побічній біомасі. За оцінки останньої як повноцінної енергетичної продукції (1000 грн/т), чистий прибуток становив 17–35 тис. грн/га у різних варіантах. Варіанти з мікродобривами показали найвище співвідношення «доходи/витрати» і перевищили 100 % рентабельності.

11. Енергетичний аналіз показав, що міскантус гігантський характеризувався найвищими КЕЕ – 34–39. Така ефективність зумовлена високим виходом біомаси (до 51 т/га у найкращі роки) та низькими енергетичними витратами після закладки плантації. Комбіновані варіанти удобрення забезпечували найвищі енерговиходи – до 886 тис. МДж/га. КЕЕ проса прутоподібного становив 15–18. Високі значення у мікродобривних варіантах засвідчують, що культура є енергетично доцільною за умов мінімальних витрат і стабільного рівня продуктивності. Сорго цукрове після корекції енерговиходів із урахуванням фактичної вологості біомаси демонструвало КЕЕ 9–11. Це значно нижче за багаторічні культури, але відповідає рівню однорічних зеленомасових культур. Найвищі значення фіксувалися у варіантах із мікродобривами. Кукурудза звичайна формувала КЕЕ на рівні 11–13. Висока енерговіддача зумовлена поєднанням енергетично цінного зерна та побічній біомаси. Важливо, що культура залишалася енергетично ефективною у всіх варіантах удобрення, а мікродобрива демонстрували максимальну віддачу енергії на вкладену одиницю ресурсів.

12. Комплексний агрономічно-економічний та енергетичний аналіз доводить, що для біоенергетичного виробництва та стабільного функціонування енергетичних агросистем найбільш доцільними культурами є міскантус гігантський та кукурудза звичайна, які забезпечують найвищі показники врожайності, прибутковості та енерговіддачі. Просо прутоподібне є технологічно простим і економічно ефективним за умов низьких витрат, тоді як сорго цукрове потребує змін у моделі використання продукції для переходу до рентабельного виробництва.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

З метою забезпечення високої продуктивності енергетичних культур за умов належного техніко-технологічного рівня виробництва, у господарствах Західного регіону України з нестійким зволоженням на дерново-підзолистому ґрунті доцільно впроваджувати вирощування багаторічних біоенергетичних культур, зокрема міскантусу гігантського сорту Осінній зорецвіт та проса прутоподібного сорту Морозко, а також однорічних – сорго цукрове сорту Фаворит та кукурудзу звичайну гібрид Мантікора, як стабільних і адаптивних до кліматичних змін агроценозів із високим енергетичним потенціалом.

Для забезпечення максимальної продуктивності та стабільності врожаїв міскантусу гігантського рекомендується застосовувати комбіновану систему удобрення з внесенням у нормі $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Інтермаг Титан, що забезпечує приріст біомаси до 35 % порівняно з контролем та найвищу енергетичну віддачу.

За вирощування проса прутоподібного доцільно віддавати перевагу комбінованим варіантам удобрення NPK + мікродобрива, які забезпечують приріст урожайності на 20 % та підвищують адаптивність культури до міжрічної мінливості погодних умов. В умовах обмежених ресурсів рекомендовано використання мікродобрив як економічно ефективного елемента технології.

Для однорічних біоенергетичних культур у зоні Передкарпаття оптимальним є застосування збалансованого мінерального живлення. За вирощування кукурудзи звичайної доцільно застосовувати удобрення $N_{90}P_{90}K_{90}$ + БЛЕК ДЖЕК КС та $N_{90}P_{90}K_{90}$ + Інтермаг Титан, що забезпечує найвищу та найбільш стабільну врожайність зерна і побічної продукції з рентабельністю виробництва понад 100 %.

Вирощування сорго цукрового рекомендовано орієнтувати переважно на енергетичну переробку (виробництво біогазу, твердого біопалива, силосу), оскільки за реалізації зеленої маси як кормової сировини культура є економічно доцільною лише за підвищених закупівельних цін або за оптимізації витрат на удобрення з акцентом на мікродобрива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdelhalim T.S., Abdelhalim N.S., Kamal N.M., Mohamed E.E., Hassan A.B. Exploiting the potential of Sudanese sorghum landraces in biofortification: physicochemical quality of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) landraces. *Food Chem.* 2021. Vol. 337. Article number 127604.
2. Adhikari R. K., Wang T., Jin H., Ulrich-Schad J. D., Sieverding H. L., Clay D. Farmer perceived challenges toward conservation practice usage in the margins of the Corn Belt, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems.* 2023. Vol. 38. Article e14. DOI: 10.1017/S1742170523000042
3. Ahmed M., Fayyaz-ul-Hassan, Asif M. Amelioration of drought in sorghum by Silicon. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 2014. Vol. 45. No. 4. P. 470–486.
4. Alkemade R., Bakkenes M. Eickhout B. Towards a general relationship between climate change and biodiversity: an example for plant species in Europe. *Regional Environmental Change.* 2011. Vol. 11. P. 143–150.
5. Almodares A., Taheri R., Hadi M. R, Fathi M. The effect of nitrogen and potassium fertilizers on the growth parameters and the yield components of two sweet sorghum cultivars. *Pakistan Journal of Biological Sciences.* 2006. №9. pp.2350–2353.
6. Amon T., Amon B., Kryvoruchko M., Zollitsch W., Mayer K., Gruber L. Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2007. № 118. P. 173–182.
7. Ashworth A.J., Taylor A.M., Reed D., Tyler D.D., Allen F.L., Keyser P.D. Life cycle assessment of regional switchgrass feedstock production compared to nitrogen input scenarios and legume-intercropping systems. *Journal of Cleaner Production.* 2015. 87. 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.002>
8. Athar M., Habib U., Muhammad I., Muhammad Mansoor J., Ahmad S. Naeem. Honermeier B. Evaluation of sorghum hybrids for biomass and biogas production. *Australian Journal of Crop Science.* 2013. Vol. 7. №10. P. 1456-1462.

9. Bai Y., Luo L., van der Voet E. Life cycle assessment of switchgrass-derived ethanol as transport fuel. *J. Life Cycle Assess.* 2010. Vol. 15: 468–477. DOI: 10.1007/s11367-010-0177-2
10. Balat M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review. *Energy conversion and management.* 2011. T. 52. №. 2. P. 858–875.
11. Bartuševics J., Gaile Z. Effect of silaging on chemical composition of maize substrate for biogas production. Annual 16th International Scientific Conference Proceedings, “Research for rural development 2010”, Jelgava, Latvia, 19-21 May 2010. Vol. 1. P. 42-47.
12. Bennetzen J. L., Sarah C. Hake. Handbook of Maize: Its Biology. Springer Science. Business Media. 2009. P.146 p.
13. Borjesson P., Tufvesson L. M. Agricultural crop-based biofuels – resource efficiency and environmental performance including direct land use changes. *J Clean Prod.* 2011. №19. pp.108–120.
14. Bourgault M., James A. T., Dreccer M. F. Impact of micronutrient foliar applications on nutrient status and productivity of sorghum. *Field Crops Research.* 2020. Vol. 250. Article 107770. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107770>
15. Braun A., Weiland R., Wellinger P. Biogas from energy crop digestion. In IEA Bioenergy Task. 2008. Vol. 37. pp. 1–20.
16. Brazienė Z., Paltanavičius V., Aleknavičienė A. The influence of bioorganic preparations on plant productivity and soil quality. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources.* 2019. V. 65. Is. 4. P. 146–149.
17. Caslin B., Finnan J., Eason L. Miscanthus best practice guidelines Teagasc. *Ecclesville Printing Services.* 2011. V. 52. p. 91.
18. Chen Y., Aviad T. Effects of humic substances on plant growth. *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Reading*; Eds: P. MacCarthy, C.E. Clapp, R.L. Malcolm, and P.R. Bloom. Madison: Soil Sci. Soc. Am. 1990. P. 161 – 186.

19. Chipman R. B., Raper C. D., Patterson R. P. Allocation of nitrogen and dry matter for two soybean genotypes in response to water stress during reproductive growth. *Journal of Plant Nutrition*. 2001. № 24. pp. 873–884.
20. Chou C.-H. Miscanthus plants used as an alternative biofuel material: The basic studies on ecology and molecular evolution. *Renewable Energy*. 2009. Vol. 34, Iss. 8. P. 1908–1912.
21. Chramiec-Głabik A., Grabowska-Joachimciak A., Sliwinska E., Legutko J., Kula A. Cytogenetic analysis of *Miscanthus × giganteus* and its parent forms. *Caryologia*, 2012. Vol. 65, no. 3. P. 234–242.
22. Clifton-Brown, J., Schwarz, K.-U., & Hastings, A. Miscanthus: a review of European experience with a novel bioenergy crop. *Biomass and Bioenergy*, 2004. 27(3), 1–14.
23. Comis D. Switching to Switchgrass makes Sense, in Agricultural Research, July. 2006. USDA. URL: <http://www.ars.usda.gov/is/AR/archive/jul06/grass0706.pdf>.
24. Corden C., Bougas K., Cunningham E., Tyrer D., Kreißig J., Crookes M. Digestate and Compost as Fertilisers: Risk Assessment and Risk Management Options; Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited: Aberdeen, UK, 2019. pp. 121-128. Available online: https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/40_039
25. Dębowski M., Kazimierowicz J., Zieliński M., Bartkowska I. Co-Fermentation of microalgae biomass and *Miscanthus × giganteus* silage-assessment of the substrate, biogas production and digestate characteristics. *Appl. Sci.* 2022. 12 (14), 7291. doi: 10.3390/app12147291
26. Delchev G., Barakova T. Efficacy of herbicides and herbicide combinations at sorghum (*Sorghum bicolor* Moench.). *Bulg. J. Agric. Sci.* 2018. № 24 (Suppl. 1). P. 33–39.
27. Donati M., Bodini D., Arfini F., Zezza A. An integrated PMP model to assess the development of agro-energy crops and the effect on water requirements. *Bio-based Appl. Econ.* 2013. №2. pp. 301–321.
28. Dumych V., Bova D., Krupych O. The influence of tillage systems on the efficiency of growing corn for grain. Technical and Technological Aspects of

Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine. 2023. Vol. 31(45). P. 169–178. DOI: 10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-16.

29. Dykes L., Rooney L. W., Waniska R. D., Rooney W. L. Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005. Vol. 53. P. 6813–6818. doi: 10.1021/jf050419e

30. Earp C. F., McDonough C. M., Rooney L. W. Microscopy of pericarp development in the caryopsis of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Journal of Cereal Science*. 2004. Vol. 39. P. 21–27. doi: 10.1016/S0733-5210(03)00060-2

31. Elbersen W., Kulyk M., Poppens, R. P. et al. Switchgrass Ukraine: overview of switchgrass research and guidelines. Wageningen : Wageningen UR Food & Biobased Research, 2013. 26 p.

32. Fageria N. K. The Use of Nutrients in Crop Plants. *Boca Raton* : CRC Press, 2016. 430 p.

33. Fijalkowski K., Rosikon K., Grobelak A., Hutchison D. & Kacprzak M.J. Modification of properties of energy crops under Polish condition as an effect of sewage sludge application onto degraded soil. *Journal of Environmental Management*. 2018. N 217. P. 509–519. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.03.132>

34. Gamayunova V., Honenko L., Baklanova T., Pilipenko T. Current Trends in Sorghum Use, Grain Yield and Water Consumption Depending on the Hybrid Composition. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. 24(6). C.211–220. DOI: [10.12912/27197050/168451](https://doi.org/10.12912/27197050/168451)

35. Gnansounou E., Dauriat A., Wyman C.E. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. *Bioresource Technology*, 2005. 96(9), 985–1002. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.015>

36. Goel P., Madhu D. Humic Substances: Pro-spects for Use in Agriculture and Medicine. *Open access peer-reviewed chapter*. 2021. doi: 10.5772/intechopen.99651

37. Gumentyk M., Kharytonov M. Development and assessment of technologies of miscanthus and switchgrass growing in Foreststeppe zone of Ukraine. *Agriculture & Forestry*. 2018. Vol. 64. Issue 2. P. 137–146.

38. Hafez M., Mohamed A.E., Rashad M., Popov A.I. The efficiency of application of bacterial and humic preparations to enhance of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant productivity in the arid regions of Egypt. *Biotechnology Repots*. 2021. V. 29 (3). P. e00584. doi: 10.1016/j.btre.2020.e00584 Get rights and content

39. Haifeng N., Youdong Z., Qiulin Y. et al. Effects of different activation processes of humic acids on the growth of oilseed rape. *AIP Conference Proceedings*. 2019. P. 020021. doi: 10.1063/1.5110815

40. Hattori T., Morita S. Energy crops for sustainable bioethanol production; which, where and how? *Plant Production Science*. 2010. 13. P. 221–234.

41. Heaton, E.A., Dohleman, F.G., Long, S.P. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*. 2008. 14(9), 2000–2014. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01662.x>

42. Heiermann M., Plöchl M., Linke B., Schelle H., Herrmann C. Biogas Crops – Part I: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2009. Vol. XI. P. 1087–1093.

43. Herman T., Nungesser E., Miller K. E., Davis S. C. Comparative fuel yield from anaerobic digestion of emerging waste in food and brewery systems. *Energies*. 2022. 15. P. 1538. doi: 10.3390/en15041538.

44. Hoffmann K., Huculak-Mączka M. The utilization possibility of waste lignite as a raw material in the process of obtaining humic acids preparations. *Polish J. of Chemical Technology*. 2012. № 14 (4). P. 1–6. doi:10.2478/v10026-012-0093-2

45. Holou R., Stevens W., Rhine M., Heiser J. Sweet sorghum and biomass production for biofuel and the effects of soil types nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 2014. Vol. 45. № 21. P. 2778–2793.

46. Hopkins A., Del Prado A. Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review. *Grass and Forage Science*. 2007. Vol. 62. P. 118–126.

47. Huma B., Hussain M., Ning C., Yuesuo Y. Human benefits from maize. *Scholar Journal of Applied Sciences and Research*. 2019. 2. 4–7.

48. Jentsch A., Kreyling J., Beierkuhnlein C. A new generation of climate-change experiments: events, not trends. *Frontiers in ecology and the environment*. 2007. Vol. 5. P. 365–374.
49. Jerome J. Maleski, David D. Bosch, Ray G. Anderson, Alisa W. Coffin, William F. Anderson, Timothy C. Strickland. Evaluation of miscanthus productivity and water use efficiency in southeastern United States. *Science of the Total Environment*. 2019. № 692. P. 1125–1134.
50. José Alberto Oliveira, C. P. West, Elias Afif, Pedro Palencia. Comparison of Miscanthus and Switchgrass Cultivars for Biomass Yield, Soil Nutrients, and Nutrient Removal in Northwest Spain. *Agronomy Journal*. 2017. Vol. 109, Issue 1. P. 122–130.
51. Kaletnik G., Honcharuk I., Okhota Yu. The Waste-Free Production development for the energy autonomy formation of Ukrainian agricultural enterprises. *Journal of environmental management and tourism*. 2020. Vol. XI, № 3(43). P. 513-522. DOI:10.14505/jemt.v11.3(43).02 [https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3\(43\).02](https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3(43).02)
52. Kaletnik H., Pryshliak V., Pryshliak N. Public Policy and Biofuels: Energy, Environment and Food Trilemma. *Journal of Environmental Management & Tourism*. 2019. T. 10. № 2 (24). C. 479–487.
53. Kalinichenko A.V., Vakulenko Y.V., Galych O.A. Ecological and economic aspects of feasibility of using crop products in alternative energy. *Actual Problems of Economics*. 2014. N 161 (11). P. 202–208.
54. Kalinichenko A., Kalinichenko O., Kulyk M. Assessment of available potential of agro biomass and energy crops phytomass for biofuel production in Ukraine: Odnawialne zrydla energii: teoria i praktyka. Monograph / pod red. I. Piet kunGreber, P. Ratusznego, Uniwersytet Opolski: Opole, Kijow. 2017.II: 163–179.
55. Karbivska U.M., Hryhoriv Ya. Ya., Sitnyk A.A. Impact of fertilization on the productivity of sugar sorghum in the conditions of the Carpathian. *Topical aspects of modern scientific research: The 4th International Scientific and Practical Conference, December 21–23, 2023*. CPN Publishing Group, Tokyo, Japan, 2023. P. 15–19.

56. Kaschl A., Chen Y. Interaction of humic substances with trace metals and their stimulatory effects on plant growth. Use of humic substances to remediate polluted environments from theory to practice. 2002. V. 52. P. 83 – 115.
57. Keshwani D.R., Cheng J.J. Switchgrass for bioethanol and other value added applications: a review. *Bioresource Technology*, 100. 2009. 1515–1523.
58. Kholodna A.S. Soil factors of floodplain soils that limit growth of energy crops. *Gruntoznavstvo*. 2016. Vol. 17. N 3–4. P. 43–49.
59. Kulyk M., Galytska M., Samoylik M., Zhornyk I. Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. *Agrology*. 2019. 2 (1). P. 65–73. <https://doi.org/10.32819/26176106.2018.14020>
60. Kulyk M., Kalynychnenko V., Pryshliak N., Pryshliak, V. Efficiency of Using Biomass from Energy Crops for Sustainable Bioenergy Development. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2020. Vol. XI, Fall, 5 (45). P. 1040–1053. DOI:10.14505/jemt.v11.5(45).02
61. Kulyk M., Rakhmetov D., Rozhko I., Sipylyva N. Source material of millet of *Panicum virgatum* L. on a complex of economically valuable features in the conditions of the central forest steppe of Ukraine. *Sorting and Protection of Plant Variety Rights*. 2019. 15, 4. P. 354–364.
62. Kurylo V., Marchuk A., Ivanovs S. Impact of agrotechnical methods up on the energetic productivity of sweet sorghum. *Journal of research and applications in agricultural engineering*. Poznan. 2015. № 60 (2). P. 50–53.
63. Lee D.K., Owens V.N., Doolittle J.J. Switchgrass and soil carbon sequestration response to ammonium nitrate, manure, and harvest frequency on conservation reserve program land. *Agron J*. 99. 2007. 462–468.
64. Leonard C. The Use of Humic Substances in Agriculture: Origins, Science and Applications. *Copyright*. 2012. https://cdn2.hubspot.net/hub/148034/file-17893304-pdf/docs/humic_substances-white-paper.pdf
65. Lewandowski I., Heinz A. Delayed harvest of miscanthus – influences on biomass quantity, quality, and environmental impacts of energy production. *European Journal of Agronomy*. 2003. № 19. P. 45–63.

66. Lewandowski, I., Clifton-Brown, J.C., Scurlock, J.M.O., Huisman, W. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 19(4), 2000. 209–227. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00032-5)
67. Lobell D. B. et al. Climate trends and global crop production since. *Science*, 333(6042), 2011. 616–620.
68. Mahmood A., Ullah H., Ijaz M., Naeem A.S., Honermeier B. Evaluation of sorghum cultivar for biomass and biogas production. *Aust. J. Crop Sci.* 2013. №7 (10). P. 1456–1462.
69. Marenych M.M., Hanhur V.V., Len O.I. et al. The efficiency of humic growth stimulators in pre-sowing seed treatment and foliar additional fertilizing of sown areas of grain and industrial crops. *Agronomy Research*. 2019. № 17(1). P. 194 – 205. doi: 10.15159/AR.19.023
70. Masse L., Masse D., Beaudette V., Muir M. Size distribution and composition of particles in raw and anaerobically digested swine manure. *Transactions of the ASAE*. 2005. № 48 (5). P. 1943–1949.
71. Mata-Alvarez J., Dosta J., Macé S., Astals S. Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling. *Crit Rev Biotechnol*. 2011. 31 (2). P. 99-111.
72. Mazur V.A., Branitskyi Y.Y., Pantsyreva H.V. Bioenergy and economic efficiency technological methods growing of switchgrass. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. 10(2). P. 8–15.
73. McKervey Z., Woods V. B., Easson D. L. Miscanthus as an energy crop and its potential for Northern Ireland. *Global Research Unit AFBI Hillsborough*. 2008. № 8. P. 37-43.
74. McLaughlin, S.B., Kszos, L.A. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy*, 2005. 515–535. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.05.006>
75. Muscolo A., Sidari M., Attinà E. Biological Activity of Humic Substances Is Related to Their Chemical Structure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2007. V. 71. P. 75 – 85.

76. Nardi S., Pizzeghello A., Muscolo A. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*. 2002. V. 34. № 11. P. 1527 – 1536.

77. Oechsner H, Lemmer A. Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten? VDI-Gesellschaft Energietechnik: Biogas 2009. *Energieträger der Zukunft*, 2009, P. 37–46.

78. Oliver T.H., Morecroft M.D. Interactions between climate change and land use change on biodiversity: attribution problems, risks, and opportunities. *Advanced Review*. 2014. Vol. 5. P. 317–335.

79. Palamarchuk V., Krychkovskiy V., Skakun M. Study of the efficiency of growing maize for silage for processing into biogas and digestate. *Scientific Horizons*. 2024. 27 (1). P. 54-61. DOI: 10.48077/scihor1.2024.54.

80. Patel M., Singh R., Kumar S. Foliar fertilization effects on growth, nutrient uptake and yield of sorghum under different fertility regimes. *Journal of Plant Nutrition*. 2021. Vol. 44, №.14. P. 2120–2132. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1875843>

81. Pholsen S., Sornsungnoen N. Effects of nitrogen and potassium rates and planting distances on growth, yield and fodder quality of forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Pakistan Journal of Biological Science*. 2004. №7. pp.1793–1800.

82. Podkówka W., Podkówka Z., Kowalczyk-Juśko A., Pasyniuk P. Agricultural biogas renewable energy source. Theory and practical application. Wydawnictwo PWRiL. 2012. P. 147–152.

83. Pogrzeba M., Krzyżak J., Sas-Nowosielska A. Environmental hazards related to *Miscanthus×giganteus* cultivation on heavy metal contaminated soil. *Web of Conferences*. 2013. № 1: 29006. URL: E3S <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130129006>

84. Popović V., Vučković S., Jovović Z., Ljubičić N., Kostić M., RakašćanN., Ikanović J. Genotype by year interaction effects on soybean morpho-productive traits and biogas production. *Genetika*. 2020. 52 (3) P. 1055–1073. <https://doi.org/10.2298/GENSR1802635>

85. Prysiazniuk O., Maliarenko O., Roik M., Fuchylo Y., Iris Lewandowski, Kristaps Makovskis, Dagnija Lazdina, Moritz von Cossel. Biomass dry matter yield of willow and Miscanthus in low-input cropping on heavy clay soils in Ukraine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2022. № 16. P. 1794–1807.

86. Rajvanshi A.K., Nimbkar N. Sweet sorghum R&D at the Nimbkar Agricultural Research Institute (NARI). Cited 5. 2005. <http://nariphaltan.virtualave.net/sorghum.htm>

87. Rao P.S., Kumar C.G. Sweet Sorghum: from theory to practice. *Characterization of Improved Sweet Sorghum Cultivars, Springer Briefs in Agriculture India*. 2013, pp. 1–15.

88. Reddy B. V. S., et al. Sorghum and millet as bioenergy crops. *Advances in Agronomy*, 103, 2009. 157–200.

89. Röder M., Mohr A., & Yan Liu. Sustainable bioenergy solutions to enable development in low- and middleincome countries beyond technology and energy access. *Biomass and Bioenergy*. 2020. Vol. 143. doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105876

90. Rudska N. Influence of the protection system on limitation of the number of main pests in corn crops. *Захист рослин*. 2022. 27. 143–165. <http://dx.doi.org/10.37128/2707-5826-2022-4-11>

91. Sahoo S., Misra M., Mohanty A. K. Biocomposites From Switchgrass and Lignin Hybrid and Poly(butylene succinate) Bioplastic: Studies on Reactive Compatibilization and Performance Evaluation. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2013. Vol. 299, Iss. 2. P. 178–189. doi: 10.1002/mame.2013000

92. Samson R., Mani S., Boddey R., Sokhansanj S., Quesada D., Urquiaga S. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005. Vol. 24. P. 461–495. doi.org/10.1080/07352680500316508

93. Sanderson M.A., Reed R.L., McLaughlin S.B., Wullschleger S.D. at all. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop. *Bioresource Technology*. 1996. № 56. P. 83–93. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00176-X](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00176-X)

94. Sanderson, M., Adler, P., Boatman, K., et al. Switchgrass as a bioenergy crop. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1(5), 2006. 301–314.

95. Sarah C. Davis, William J. Parton, Frank G. Dohleman, Candice M. Smith, Stephen Del Grosso, Angela D. Kent. Comparative Biogeochemical Cycles of Bioenergy Crops Reveal Nitrogen-Fixation and Low Greenhouse Gas Emissions in a *Miscanthus×giganteus* Agro-Ecosystem. *Ecosystems*. 2010. № 13 (1). P. 144–156.

96. Schittenhelm S. Effect of drought stress on yield and quality of maize / sunflower and maize / sorghum intercrops for biogas production. *J. Agron. Crop. Sci.* 2010. № 196. P. 253–61.

97. Schmer M.R., Liebig M.A., Vogel K.P., Mitchell R.B. Field-scale soil property changes under switchgrass managed for bioenergy. *GCB Bioenergy*. 2011. doi: 10.1111/j.1757-170732011.01099x

98. Seppälä M. Biogas Production from High-Yielding Energy Crops in Boreal Conditions. Academic dissertation of the University of Jyväskylä, 2013, 92 p.

99. Sigurnjak I., Vaneeckhaute C., Michels E., Ryckaert B., Ghekiere G., Tack F. M. G. et al. Fertilizer performance of liquid fraction of digestate as synthetic nitrogen substitute in silage maize cultivation for three consecutive years. *Sci. Total Environ.* 2017. 599-600, 1885-1894. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.120.

100. Sims R. E., Hastings A., Schlamadinger B., Taylor G., Smith P. Energy crops: current status and future prospects. *Global change biology*. 2006. №12(11). P. 2054–2076.

101. Smutný V., Neudert L., Dryšlov T., Lukas V., et al. Current arable farming systems in the Czech Republic-agronomic measures adapted to soil protection and climate change. *Agric Conspec Sci.* 2018. 83 (1): 11-16.

102. Sticklen M.B. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. *Nature Reviews Genetics*, 2008. 9(6). 433–443. DOI: [10.1038/nrg2336](https://doi.org/10.1038/nrg2336)

103. Stockle C.O., Kjelgaard J.G.. Parameterizing Penman-Monteith surface resistance for estimating daily crop ET. *Am. soc. agric. engi.* San Antonio, Texas, USA, 1996. № 6. P. 697–703.

104. Tang Y., Xie J.-S., Geng S. Marginal land-based biomass energy production in China. *J. Integr. Plant Biol.* 2010. N 52. P. 112–121.

105. Theuerl S., Herrmann C., Heiermann M., Grundmann P., Landwehr N., Kreidenweis U. et al. The future agricultural biogas plant in Germany: A vision. *Energies*. 2019. 12 (3), 396. doi: 10.3390/en12030396.
106. Trnka M. et al. Climate change and impact on European grasslands : proceedings of the 16th symposium of the European Grassland Federation. *Grassland Farming and Land Management Systems in Mountainous Regions*. (Gumpenstein, Austria, 2011). Gumpenstein, 2011. P. 39–51.
107. Troyer A.F. Background of U.S. hybrid corn: II. Breeding, climate, and food . A. F. Troyer .*Crop Science*. 2004. Vol. 44, № 2. P. 370-380.
108. Tse T.J., Wiens D.J., Reaney M.T. Production of bioethanol – A review of factors affecting ethanol yield. *Fermentation*. 2021. T. 7. №. 4. 268.
109. Tsialtas J.T., Maslaris N. Effect of N fertilization rate on sugar yield and non-sugar impurities of sweet sorghum grown under Mediterranean conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2005. №191.PP.330–339.
110. Tsyhansky V. Formation of corn productivity depending on the use of modern biological fertilizers in the Forest-steppe right bank. *Сільське господарство та лісівництво*. 2022. № 4 (27). С. 15-24. DOI: 10.37128/2707-5826-2022-4-2.
111. Turhollow A.F. Screening herbaceous lignocellulosic energy crops in temperate regions of the USA. *Bioresource Technology*. 1991. N 36. P. 247–252.
112. Usofzadeh M., Daneshvar M., Almodares A., Eisvand H. Effects of nitrogen fertilizer and plant growth regulator on stalk yield and bioethanol in sweet sorghum. *Iranian Journal of Plant Physiology*. 2013. №3. P. 711–716.
113. Utaliev A.A., Yakovleva L.V., Maslova E.A. Influence of humic preparations on productivity increase of cucurbits in arid farming conditions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2021. V. 843. P. 012040. doi: 10.1088/1755-1315/843/ 1/012040
114. Van Beilen J. B., Poirier Y. Production of renewable polymers from crop plants. *The Plant Journal*. 2008. Vol. 54, Iss. 4. P. 684–701. doi: 10.1111/j.1365-313X.2008.03431.x

115. Vanlooche A., Bernacchi C., Twine T. The impacts of *Miscanthus*×*giganteus* production on the Midwest US hydrologic cycle. *GCB Bioenergy*. 2010. № 2. P. 180–191.
116. Vogel K.P. Switchgrass. In: L.E. Moser et al., eds. *Warm-season (C4) Grasses / ASA-CSSA-SSSA*, Madison, WI, 2004. P. 561–588.
117. Von Cossel M., Pereira L.A., Lewandowski I. Deciphering substrate-specific methane yields of perennial herbaceous wild plant species. *Agronomy*. 2021. 11 (3). P. 451. doi: 10.3390/agronomy11030451.
118. Weiland P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003. № 109 (1–3). P. 263–274.
119. Wulschleger S.D. and Gunter L.E. Genetic diversity and long-term sustainability of yield in the bioenergy crop switchgrass. Environmental Sciences Division. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN, 1997.
120. Xue S., Kalinina O., Lewandowski I. Present and Future Options for *Miscanthus* Propagation and establishment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 49. P. 1233–1246.
121. Zahinaylo M.I., Levandovskii A.A., Tahantsova M.M., Havriliuk V.M. Sugar Corn: both food and medicine. *Quarantine and plant protection*. 2012. 4. P. 20 – 24.
122. Zegada-Lizarazu, W., Monti, A. Energy crops in rotation. A review. *Biomass and Bioenergy*, 2011. 35(1), 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.001>
123. Zhao Y.L., Dolat A., Steinberger Y. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Res*. 2009 Vol. 111, No. 1-2. P. 55-64.
124. Zub HW., Brancourt-Hulmel M. Agronomic and physiological performances of different species of *Miscanthus*, a major energy crop. *A review. Agronomy for Sustainable Development*. 2010. № 30. P. 201–214.
125. Zulauf C., Prutska O., Kirieieva E. and N. Pryshliak. Assessment of the potential for a bio fuels industry in Ukraine. *Problems and Perspectives in Management*. 2018. 16(4): 83–90. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.16\(4\).2018.08](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.16(4).2018.08)

126. Адаменко Т. Особливості погодних умов весняного періоду 2015 р. *Агроном*. 2015. № 2 (48). С. 18–19.
127. Андрієнко А.Л., Семеняка І.М., Андрієнко О.О. Вихід крохмалю і біоетанолу з посівів кукурудзи залежно від попередників та основного обробітку ґрунту. *Вісник аграрної науки*. 2025. №2 (853). С.31–41. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202502-04>
128. Бакланова Т.В., Гамаюнова В.В., Сидякіна О.В. Сучасні тенденції вирощування сорго в Україні та світі. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 134. С. 9–17. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.134.2>
129. Балан В.М., Сторожик Л.І. Вирощування цукрового сорго як біоенергетичної культури. *Цукрові буряки*. 2010. № 5 С. 14–15.
130. Баланюк С.І., Карбівська У.М., Сітник А.А. Перспективи вирощування енергетичних культур на низькопродуктивних ґрунтах Західного Лісостепу України. *Адаптація агровиробництва до змін клімату та грантової родючості: матеріали міжнар. наук.-прак. конф., с. Полігон, Миколаївський район, Миколаївська область, 9 жовтня 2025 р. / ДУ “Миколаївська державна сільськогосподарська дослідна станція ІКОСГ НААН”*. Полігон: Вид-во ІКОСГ, 2025. С. 15–17.
131. Беленіхіна А. Фактори підвищення урожайності проса: дослідження. *Агробізнес сьогодні*. 2012. № 6. С. 28–30.
132. Бойко М.О. Обґрунтування агротехнічних прийомів вирощування сорго зернового в умовах Півдня України. *Sciences of Europe: Global science center LP*. 2016. Vol. 4. №. 5 (5). P. 62–65.
133. Борзих О.І., Сергієнко В.Г., Шита О.В. Підвищення ефективності та безпечності агротехнологій за використання гумінових препаратів. *Вісник аграрної науки*. №12 (837). 2022. С. 12–20. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk 202211-02>
134. Браніцький Ю.Ю., Мазур О.В. Кількісні показники рослин проса лозовидного за різних технологічних прийомів вирощування. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2019. № 12. С. 28–43.

135. Бунецький В.О. Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пеллет або брикетів. *Вісн. ЦНЗ АПВ Харківської області*. 2011. №10. С. 328–340.

136. Вернера І.Є. Статистичний щорічник України. Державна служба статистики України. Київ, 2022. 438 с.

137. Вишнівський П.С., Можарівська І.А. Особливості вирощування енергетичних культур на малопродуктивних землях Полісся України. *Таврійський науковий вісник*. 2023. №129. С.27–32. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2023.129.4>

138. Віршовка В.М., Опанасенко О.Г., Перець С.В. Технологія вирощування міскантусу гігантського на енергетичні цілі в умовах осушуваних торфовищ Лівобережного Лісостепу. *Збірник наукових праць «Агробіологія»*. 2022. № 1. С. 6–14. DOI: 10.33245/2310-9270-2022-171-1-6-14

139. Вітвіцький В.В., Демчак І.М., Пивовар В.С. та ін. Типові норми продуктивності машин і витрати палива на сівбі, садінні та догляді за посівами. Київ : НДІ Укראгропромпродуктивність, 2005. 544 с.

140. Вовкодав В.В. Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур (зернові, круп'яні та зернобобові). К.: 2001. 356 с.

141. Вожегова Р.А., Лавриненко Ю.О., Марченко Т.Ю., Бояркіна Л.В., Шарій В.О., Біднина І.О. Порівняльний аналіз формування врожайності гібридів кукурудзи різних груп ФАО за краплинного зрошення. *Аграрні інновації*. 2023. №18. С. 24-31. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.18.3>

142. Вожегова Р.А., Лавриненко Ю.О., Марченко Т.Ю., Міщенко С.В., Пілярська О.О., Базиленко Є.О. Перспективні культури для біоенергетики України. *Аграрні інновації*. 2022. №11. С. 5–15. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.11.1>

143. Войтовська В.І., Любич В.В., Третякова С.О., Приходько В.О. Технологічна якість крохмалю різних гібридів кукурудзи і сортів сорго зернового за його біохімічною складовою. *Вісник Уманського НУС*. 2022. № 1. С. 76–80.

144. Войтовська В.І., Сторожик Л.І., Любич В.В., Яланський О.В. Технологічне оцінювання зерна різних сортів соризу (*Sorghum orysooidum*). *Plant Varieties Studying and protection*. 2022. Т. 18, № 1.. С. 50–56.
145. Вольвач О.В., Жигайло О.Л., Колосовська В.В., Ярмолінський О.Ю. Агрокліматична оцінка перспектив вирощування світчнрасу (*Panicum virgatum*) в Лісостепових областях за умов зміни клімату. *Екологічні науки*. 2022. № 3(42). С. 123 – 130. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.20>.
146. Гадзало Я.М., Роїк М.В., Кондратенко П.В., Адамчук В.В., Камінський В.Ф. та ін. Особливості технологічного забезпечення вирощування сільськогосподарських культур в умовах 2001 року в Степовій зоні України. Дніпропетровськ: Роял-Принт, 2011. 96 с.
147. Ганженко О.М. Цукрове сорго. *The Ukrainian Farmer*. 2012. №10. С.42–44.
148. Ганженко О.М., Гументик М.Я., Квак В.М. Технологія виробництва твердого біопалива з міскантусу. *Біоенергетика*. 2015. № 2. С. 13–17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Bioen_2015_2_6
149. Ганженко О.М., Курило В.Л., Гументик М.Я., та ін. Методичні рекомендації з технології вирощування і переробляння міскантусу гігантського. К.: ТОВ «ЦП «Компринт», 2016. 40 с.
150. Гелетуха Г.Г., Желізна Т.А., Драгнєв С.В., Гайдай О.І. Десять кроків України для відмови від російського природного газу. *Аналітична записка UABIO*. 2022. № 28. 47 с.
151. Гелетуха Г.Г., Желізна Т.А., Крамар В.Х., Кучерук П.П. Перспективи розвитку біоенергетики як інструмент заміщення природного газу в Україні. *Біоенергетична асоціація України*. 2015. http://uabio.org/img/files/docs/position_paper-uabio-12-ua.pdf
152. Герасименко Л.А. Вплив густоти стояння рослин на ріст, розвиток та врожайність сорго цукрового. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6 (86). С. 48–50.

153. Герасименко Л.А. Оптимізація елементів технології вирощування сорго цукрового для виробництва біопалива в умовах Лісостепу України : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук : 06.01.09. Київ, 2013. 20 с.

154. Гинга Д.Е., Вишнеvsька Л.В., Кравченко В.С. Удосконалення елементів технології вирощування кукурудзи на зерно у Правобережному Лісостепу України. *Таврійський науковий вісник*. 2025. № 143. Ч. 1. С. 67–72. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.1.8>

155. Голуб Г.А., Кухарець С.М. О.А. Марус, М.Ю. Павленко, К.М. Сера, В.В. Чуба. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві. К.: НУБіП України, 2016. 226 с.

156. Гонтарук Я. В. Шевчук Г. В. Напрями вдосконалення виробництва та переробки продукції АПК на біопаливо. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 36. Електронний журнал. <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1128/1086>

157. Гончарук І. В., Ємчик Т. В., Купчук І. М., Телекало Н. В., Гонтарук Я. В. Напрями вдосконалення вирощування та переробки кукурудзи на біопаливо. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 125. С. 25–32.

158. Городній М.М., Павлик Р.М. Вплив систематичного використання добрив в сівозміні на формування асиміляційного апарату посівів та продуктивність кукурудзи на силос. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2010. № 149. С. 54–59.

159. Господаренко Г.М., Любич В.В., Леонова К.П., Стоцький В.В. Вплив вапнування чорнозему опідзоленого та удобрення на врожайність кукурудзи. *Аграрні інновації*. 2022. № 13. С. 35–39.

160. Грабовський М.Б. Потенціал виробництва біогазу із силосної маси сорго цукрового та кукурудзи. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 106. С. 26–32.

161. Грабовський М.Б., Павліченко К.В., Козак Л.А., Качан Л.М. Енергетична ефективність вирощування гібридів кукурудзи для виробництва біогазу за використання макро- і мікродобрив. *Зернові культури*. 2022. Т. 6. №1. С. 100–107. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0212>

162. Григоренко Н. О. Цукрове сорго дає високі й стабільні врожаї зерна та зеленої маси за складних кліматичних умов. *Зерно і хліб*. 2011. № 3. С. 48–49.
163. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ : ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. 320 с.
164. Гументик М. Я., Бондар В. С. Економічна й енергетична ефективність вирощування біоенергетичних культур на біопаливо. *Біоенергетика*. 2018. № 1. С. 16–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Bioen_2018_1_5
165. Гументик М.Я. Агротехнічні прийоми вирощування проса прутоподібного *Panicum virgatum* L. *Біоенергетика*. 2014. № 1. С. 29–32.
166. Гументик М.Я. Оцінка ефективності перероблення біомаси енергетичних культур на біопаливо. *Біоенергетика*. 2016. № 2 (8). С. 25–28.
167. Гументик М.Я., Гайда Ю.І., Фучило Я.Д., Гнап І.В. Економічна ефективність інвестицій у вирощування біоенергетичних культур в зоні Лісостепу України. *Економічний аналіз*. 2018. Т.28. № 2. С. 21–29.
168. Гументик М.Я., Гончарук Г.С., Гументик В.М. Продуктивність біомаси міскантусу залежно від густоти садіння та маси ризомів в умовах Лісостепу України. *Таврійський науковий вісник*. 2020. №116. Ч.1. С.32–39. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.116.1.4>
169. Гументик М.Я., Радейко Б.М., Фучило Я.Д. та ін. Вирощування біоенергетичних культур : монографія / за ред. М.Я. Гументика. Київ : ТОВ «ЦП «Компринт», 2018. 179 с.
170. Дековець В.О., Кулик М.І. Енергетична ефективність удосконаленої технології вирощування міскантусу гіганського для отримання біомаси. *Аграрні інновації*. 2023. №20. С.28–33.
171. Дековець В.О., Кулик М.І., Галицька М.В. Біологізація технології вирощування міскантусу гіганського на біопаливо. *Аграрні інновації*. 2021. №10. С. 23–28. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.10.4>
172. Доронін А.В. Еколого-економічні аспекти виробництва альтернативних видів палива в Україні. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 4. С. 65–69.

173. Доронін В.А., Кравченко Ю.А., Дрига В.В., & Доронін В.В. Формування садивного матеріалу міскантусу в другому році вегетації залежно від елементів технології його вирощування. *Біоенергетика*. 2018. № 2(12). С. 28–31. <https://doi.org/10.47414/be.2.2018.229253>

174. Доронін В.А., Дрига В.В., Кравченко Ю.А., Доронін В.В. Способи підвищення виходу садивного матеріалу міскантусу гігантського. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2018. Вип. 26. С. 11–20.

175. Доронін В.А., Дрига В.В., Кравченко Ю.В., Доронін В.В. Особливості росту та розвитку міскантусу залежно від якості садивного матеріалу. *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2017. № 2. С. 19–24. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vumnuc_2017_2.

176. Доронін В.А., Кравченко Ю.А., Бусол М.В. і ін. Якість насіння світчгра залежно від способів його сортування. *Наукові праці ІБКіЦБ*, 2013. Вип. 19. С. 28–32.

177. Доронін В.А., Кравченко Ю.А., Бусол М.В., Доронін В.В., Мандровська С.М., Гончарук Г.С. Визначення схожості насіння проса прутоподібного (світчграсу) *Panicum virgatum* L. Київ: ІБКіЦБ НААН, 2015. 10 с.

178. Драгнев С.В., Железна Т.А., Гелетуша Г.Г. Можливості заготівлі побічної продукції кукурудзи на зерно для енергетичного використання в Україні. *Аналітична записка БАУ*. 2016. №16. 51 с. www.uabio.org/activity/uabio-analytics.

179. Дремлюк Г.К., Гамадій В.Л., Гамадій І.В. Основні елементи технології вирощування сорго. *Посібник українського хлібороба*. 2013. № 3. С. 274–277.

180. Дубровін В.О., Голуб Г.А., Драгнев С.В. та ін. Методика узагальненої оцінки технічно-досяжного енергетичного потенціалу біомаси. К.: ТОВ «Віолпринт», 2013. 25 с.

181. Дудка Т.В. Доцільність отримання біоетанолу із зерна кукурудзи. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2012. № 1. С. 44–47.

182. Думич В.В., Журба Г.І. Техніко-технологічні заходи для закладання енергоплантацій світчграсу в умовах Полісся України. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2013. Вип. 19. С.37–42.

183. Думич В.В., Журба Г.І., Курило В.Л. Динаміка росту світчграсу в ґрунтово-кліматичних умовах Полісся України. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2013. Вип. 19. С. 43–46.
184. Ермантраут Е.Р., Присяжнюк О.І., Шевченко І.Л. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica 6.0. Київ : ПоліграфКонсалтинг, 2007. 56 с.
185. Єремко Л.С., Кирлиця А.О. Формування продуктивності кукурудзи залежно від мінерального удобрення і густоти посіву. *Таврійський науковий вісник*. 2025. № 143. Ч. 1. С.98–105. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.1.12>
186. Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І., Роговський І.Л. Перспективи виробництва і споживання біопалива другого покоління в Україні. *Machinery and Energetics*. 2018. V. 9. № 2. Р. 61–66.
187. Забарний Г.М., Кудря С.О., Кондратюк Г.Г., Четверик Г.О. Термодинамічна ефективність та ресурси рідкого біопалива України. Київ: Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, 2006. 226 с.
188. Зінченко В.О. Міскантус гігантеус – реалії і можливості. *Наукові читання – 2013 : наук.-теорет. зб.. ЖНАЕУ*. Житомир: ЖНАЕУ. 2013. Т. 1. С. 71–74.
189. Зінченко В.О., Мартинюк Г.М., Зінченко О.В. Особливості росту міскантуса гігантеуса в умовах радіоактивного забруднення. *Наука. Молодь. Екологія*. 2009 : Зб. матеріалів V наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, 27–29 трав. 2009 р. Житомир, 2009. С. 138-140.
190. Іваніна В.В., Сипко А.О., Стрілець О.П. та ін. Вплив доз добрив на біоенергетичну продуктивність сорго цукрового. *Біоенергетика*. № 2. 2021. С.21–23. doi: 10.47414/be.2. 2021.244108
191. Каленська С.М., Гриннюк І.П. Особливості росту і розвитку рослин сорго залежно від видових, сортових особливостей та удобрення культури в умовах Правобережного Лісостепу України. *Зб. наук. праць Ін-ту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2013. Вип. 17. Т. 1. С. 359–363.

192. Каленська С.М., Найдено В.М. Якісний склад зерна сорго залежно від елементів технології вирощування. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 105. С. 82–89.

193. Каленська С.М., Рахметов Д.Б. та ін. Енергетичні та сировинні рослині ресурси. Київ: НУБіП України, 2022. 274 с.

194. Калетнік Г.М. Виробництво та використання біопалив: підручник, Вінниця: Консоль, 2015. 416 с.

195. Калетнік Г.М., Гончарук І.В. Економічні розрахунки потенціалу виробництва відновлювальної біоенергії у формуванні енергетичної незалежності агропромислового комплексу. *Економіка АПК*. 2020. № 9. С. 6–16.

196. Каражбей Г.М., Тегун С.В. Продуктивність сорго звичайного двокольорового (*SorghumbicolorL.*) залежно від рівня мінерального живлення та густоти стояння. *Зб. наук. пр. Ін-ту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН*. 2012. № 14. С. 67–70.

197. Карбівська У.М., Сітнік А.А. Адаптивні стратегії формування врожайності проса прутоподібного (*Panicum virgatum L.*) в умовах кліматичних змін Західного регіону України. *Актуальні питання розвитку сільського господарства: теорія і практика*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 9 жовтня 2025 р. / НААН, Інститут сільського господарства Карпатського регіону. Оброшине: Вид-во ІСГКР, 2025. С. 99–103.

198. Карбівська У.М., Сітнік А.А. Оптимізація удобрення як чинник підвищення врожайності та якості рослин сорго цукрового і кукурудзи в Західному регіоні України. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2025. Вип. 78 (1). С. 69–78. DOI [https://doi.org/10.32636/01308521.2025-\(78\)-1-6](https://doi.org/10.32636/01308521.2025-(78)-1-6)

199. Карбівська У.М., Сітнік А.А. Особливості росту та розвитку багаторічних енергетичних культур в умовах Прикарпаття. *Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України: вчора, сьогодні, завтра*: матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. конф., присвяченої ювілейним датам: 160-річчю Полтавського товариства сільського господарства, 105-річчю Полтавського державного аграрного університету, 90-річчю від дня

народження Героя України С. С. Антонця (1935–2022), м. Київ, 17–18 вересня 2025 р. / НААН, ННСГБ і ін; наук. ред. В.А. Вергунов. Вінниця: ТВОРИ С. 322–324.

200. Карбівська У.М., Сітник А.А. Продуктивність міскантусу залежно від елементів агротехнології на дерново-підзолистому ґрунті в умовах Прикарпаття. *Таврійський науковий вісник*. 2024. №137. С. 111–116. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.14>

201. Карбівська У.М., Сітник А.А. Методичні вказівки для самостійного вивчення дисципліни «Новітні біоенергетичні рослинні ресурси» для денної та заочної форм навчання здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти навчання зі спеціальності Н1 "Агрономія", ОНП "Агрономія". Івано-Франківськ. 2025. 30 с.

202. Кателевський В.М., Цапко Ю.Л. Міскантус – універсальна культура сьогодення. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2024. 9. С. 52–57.

203. Квак В.М. Вплив строків садіння та глибини загортання різомів міскантусу на його польову схожість. *Цукрові буряки*. 2012. № 6. С. 15-17.

204. Квітка Г. Кукурудза – «за» євроінтеграцію! *Пропозиція*. № 12 (222). 2013. С. 38–40.

205. Кириченко Л.В., Роженко В.П., Філоненко Л.І. та ін. Нове застосування цукрового сорго. *Агробізнес сьогодні*. 2011. № 23 (222). С. 25–26.

206. Климчук О. В. Виробництво біологічних видів палива з біомаси сільськогосподарських культур. *Зберігання та переробка зерна*. 2012. № 9 (159). С. 38–40.

207. Коваленко О.А., Чернова А.В. Вплив норм висіву насіння, біопрепаратів і мікродобрив на формування висоти рослин сортів і гібридів сорго цукрового в умовах півдня України. *Таврійський науковий вісник: науковий журнал*. Херсон: Гельветика, 2018. Вип. 101. С. 54–62.

208. Ковальчук В.П., Григоренко Н.О., Костенко О.І. Цукрове сорго – цукровмісна сировина та потенційне джерело енергії. *Цукрові буряки*. 2009. № 6. С. 6–7.

209. Коломієць Л. В. Продуктивність кукурудзи та сорго в сумісних посівах з іншими культурами в північному Степу України : автореф. дис...канд. с.-г. наук : 06.01.12. Київ, 2006. 18 с.

210. Корбанюк Р.А. Ефективність застосування гумінових препаратів у рослинництві. *Гумінові речовини і фітогормони в сільському господарстві*. Дніпропетровськ. 2010. С. 113.

211. Корнійчук О.В., Климчук О.В., Векленко Ю.А. Потенціал рослинницької галузі України у формуванні біопаливного виробництва. *Вісник аграрної науки*. 2022. №5 (830). С. 33–41. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk.202205-04>

212. Корсун С.Г., Довбаш Н.І. Трансформації в агроценозі кукурудзи під впливом важких металів: монографія. К. : Аграр. наука, 2018. 192 с.

213. Кравченко І. Й. Аспекти розвитку виробництва сільськогосподарської продукції та проміжних продуктів цукрового виробництва як сировини для переробки на біопаливо. *Інноваційна економіка*. 2014. № 5 (54). С. 107–110.

214. Кравчук В., Новохацький М., Кожушко М. На шляху до створення плантацій енергетичних культур. *Техніка та технології АПК*. 2013. № 2. С. 31-35.

215. Крайсвітній П.А., Рій О.В., Кулик М.І. Світчграс як енергоємна сировина для виробництва біопалива. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. Вінниця. 2012. Вип. 1 (57). С. 41–47.

216. Кудря С.О. та ін. Відновлювані джерела енергії. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

217. Кулик М. І., Сиплива Н. О., Рожко І. І. Урожайність та ефективність виробництва біомаси енергетичних культур залежно від елементів технології вирощування. *Таврійський науковий вісник*. 2019. Вип. 104. С. 148–159. <http://dspace.pdaa.edu.ua:8080/handle/123456789/8607>

218. Кулик М.І. Аналіз комплексного впливу агрозаходів на урожайність проса прутоподібного в умовах центрального Лісостепу України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. Вип. 3 (90). С. 74–86.

219. Кулик М.І. Вплив умов вирощування на врожайність фітомаси світчграсу (*Panicum virgatum* L.) другого року вегетації. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2013. № 2. С. 30–35. <https://doi.org/10.31210/visnyk2013.02.07>

220. Кулик М.І. та ін. Енергетичні культури: сортимент, біологія, екологія, агротехнологія: колективна монографія / за ред. док. с.-г. наук., проф. М.І. Кулика. Полтава: “Астроя”, 2023. 220 с.

221. Кулик М.І., Падалка В.В. Розвиток біоенергетики на основі рослинного енергетичного ресурсу (на прикладі Полтавської області). Управління стратегіями випереджаючого інноваційного розвитку : монографія. Суми : Триторія, 2020. С. 109–118.

222. Кулик М.І., Рожко І.І., Білявська Л.Г. Мінливість елементів продуктивності та врожайність насіння проса прутоподібного залежно від сорту. *Таврійський науковий вісник*. 2022. №125. С. 63–72. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125>.

223. Кургак В.Г. та ін. Біоенергетичний потенціал багаторічних трав'янистих фітоценозів України. *Наук. пр. Ін-ту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2013. Вип. 19. С. 63–68.

224. Кургак В.Г., Вільова В.М., Опанасенко О.Г. Технології вирощування багаторічних і однорічних енергетичних трав'янистих культур для виготовлення твердих видів палива (паспорт технологій) ННЦ «Інститут землеробства НААН». Чабани, 2018. 21 с.

225. Курило В.Л. та ін. Удосконалення елементів технології вирощування міскантусу в умовах Центрального Лісостепу України для виробництва твердого біопалива. *Наук. пр. Ін-ту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2016. Вип. 24. С. 77–85.

226. Курило В.Л., Рахметов Д.Б., Кулик М.І. Біологічні особливості та потенціал урожайності енергетичних культур родини тонконогових в умовах України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. Вип. 1(88). С. 11–17. DOI 10.31210/visnyk2018.01.01

227. Курило В.Л., Роїк М.В., Ганженко О.М. Біоенергетика в Україні: стан та перспективи розвитку. *Біоенергетика*. 2013. Вип. № 1. С. 5–10.
228. Кухарець С.М., Голуб Г.А. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива. *Вісник Житомир. нац. агроєкол. ун-ту: наук.-теорет. зб.* Житомир, 2012. № 1. Т. 1. С. 345–352.
229. Лавриненко Ю.О., Марченко Т.Ю., Забара П.П. Селекційні надбання та їх роль в стабілізації виробництва зерна кукурудзи в Україні. *Міжнародний тематичний науковий збірник «Зрошуване землеробство»*. 2019. Вип. 72. С. 160-174. <http://doi.org/10.32848/0135-2369.2019.72.21>
230. Ласло О.О. Застосування гуматів у системі удобрення кукурудзи як складова екологізації технології вирощування. *Таврійський науковий вісник*. 2023. №129. С. 299–305. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2023.129.39>
231. Леонова К.П., Моргун А.В., Коваленко А.М., Любич В.В. Технологічні параметри біоенергетики гібридів сорго цукрового за різної густоти стояння рослин у Правобережному Лісостепу. *Аграрні інновації*. 2022. № 14. С. 72–77.
232. Любич В.В., Пясецький П.І., Моргун А.В. Формування показників біоенергетики сортів сорго цукрового за різних строків сівби і збирання. *Вісник Уманського НУС*. 2022. № 2. С. 85–90.
233. Мазоренко Д. І., Мазнев Г. Є., Мельник С. І. та ін. Технологічні карти та витрати на вирощування сільськогосподарських культур з різним ресурсним забезпеченням. Харків : ХНТУСГ, 2006. 725 с.
234. Мазур В.А., Браніцький Ю.Ю., Поліщук І.С. Особливості вирощування проса лозовидного в умовах Лісостепу Правобережного. *Сільське господарство та лісництво*. 2017. №7 (Т.1). С.19–26.
235. Мазур В.А., Паламарчук В.Д., Поліщук І.С., Паламарчук О.Д. Новітні агротехнології у рослинництві: Підручник. Вінниця, 2017. 588 с.
236. Макаренко П.М., Калініченко О.В., Аранчій В.І.. Енергоєфективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти : колективна монографія. Полтава: ПП “Астрая”, 2019. 603 с.

237. Макаров Л.Х. Соргові культури: монографія. Херсон: Айлант, 2006. 264 с.
238. Макух Я.П. Особливості формування врожайності міскантусу гігантського за спільної вегетації з бур'янами. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2017. Вип. 25. С. 115-123.
239. Мандровська С. М. Світчграс (*Panicum virgatum* L.) – перспективний інтродуцент для виробництва біопалива в Україні. *Зб. наук. праць*. К.: ІБКіЦБ, 2013. Вип. 9. С. 82–85.
240. Мандровська С.М., Балан В.М. Продуктивність проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L.) залежно від норми висіву та сортових особливостей. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2015. Вип. 23. С. 44–49.
241. Маренич М. М., Капленко В. О., Коба К. В., Голуб О. Р. Особливості управління врожайністю кукурудзи в умовах нестійкого зволоження. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2019. № 4. С. 43–50.
242. Марчук О.О. Продуктивність сортів та гібридів сорго цукрового залежно від різних методів боротьби з бур'янами на удобреному фоні. *Зб. наукових праць Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. К. 2013. Вип. 17. Т. I. С. 201–205.
243. Медведовський О. К., Іваненко П. І. Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільськогосподарському виробництві. Київ : Урожай, 1988. 208 с.
244. Мельничук М.Д., Дубровін В.О., Мироненко В.Г. та ін. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. К.: Аграр Медіа Груп, 2011. 612 с.
245. Мойсієнко В. В. Пріоритетність та шляхи підвищення продуктивності зернової та силосної кукурудзи. *Вісник Житомирського національного агроекологічного ун-ту*. 2015. № 1 (1). С. 190–203.
246. Молдован Ж.А., Собчук С.І. Оцінка показників індивідуальної продуктивності рослин кукурудзи за допосівної обробки насіння та позакореневого

підживлення. *Зернові культури*. 2018. Т. 2. № 1. С. 101–108. Doi: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0014>

247. Моргун А.В., Пясецький П.І., Любич В.В. Продуктивність різних сортів і гібридів сорго цукрового за різних строків збирання. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2022. Вип. 101. С. 163–173.

248. Мороз О.В., Смірних В.М., Курило В.М. та ін. Світчграс як нова фітоенергетична культура. *Цукрові буряки*. 2011. № 3 (81). С.12–14.

249. Мороз О.В., Смірних В.М., Шопша Г.М. та ін. Сорго цукрове – як фітоенергетична культура. *Цукрові буряки*. 2010. № 5. С. 16–17.

250. Мулярчук О.І., Кобернюк О.Т. Вплив мінерального живлення на вихід біоетанолу сорго цукрового. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2017. № 26. Ч-1. С. 94–101.

251. Мусіч В.В., Присяжнюк О.І. Особливості формування продуктивності та якості біомаси проса прутоподібного на кислих ґрунтах. *Новітні агротехнології*. 2022. Т. 10. № 1. <https://doi.org/10.47414/na.10.1.2022.265661>

252. Нікітенко М.П., Аверечев С.В. Вирощування проса в умовах півдня України. *Таврійський науковий вісник*. 2020. №116. Ч.2. С. 47–55. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.116.2.7>

253. Олексій Л.М., Буряк І.М. Елементи технології вирощування сорго цукрового для виробництва біоетанолу в умовах Західного Лісостепу. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2020. Вип. 68 (1). С. 146–161.

254. Опанасенко О.Г. Бебех Ю.М., Перець С.В., Борисенко В.І. Технологічні аспекти вирощування енергетичних культур на осушуваних органогенних ґрунтах Північного Лісостепу. *Агробіологія*. 2024. № 2. С. 108–116.

255. Осадчук В.Д., Гунчак Т.І., Сандуляк Т.М. Особливості вирощування світчграсу як енергетичної культури в умовах Буковини. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2017. № 61. С. 102–112.

256. Осадчук В.Д., Семенчук В.Г., Гунчак Т.І., Сандуляк Т.М. Продуктивність міскантусу залежно від площі живлення в умовах Лісостепу західного. *Захист і карантин рослин*. 2018. Вип. 64. С. 128-133.

257. Павліченко К.В., Грабовський М.Б. Урожайність зеленої і сухої маси гібридів кукурудзи та вихід біогазу залежно від застосування макро- і мікродобрих. *Зрошуване землеробство*. 2022. Вип. 77. С. 79–85.

258. Паламарчук В.Д., Віннік О.В., Коваленко О.А. Вміст крохмалю у зерні кукурудзи та вихід біоетанолу залежно від умов вегетації та факторів технології вирощування. *Аграрні інновації*. 2021. № 5. С.143–156. doi: 10.32848/agrar.innov.2021.5.23

259. Паламарчук В.Д., Колісник О.М. Сучасна технологія вирощування кукурудзи для енергоефективного та екологічнобезпечного розвитку сільських територій: монографія. Вінниця: ТОВ Друк, 2022. 372 с.

260. Паламарчук В.Д., Кричковський В.Ю. Вплив строків сівби на зернову продуктивність гібридів кукурудзи придатних для виробництва біоетанолу. *Сільське господарство та лісництво*. 2024. №32. С. 15–26. 10.37128/2707-5826-2024-1-2

261. Паламарчук В.Д., Логоша Р.В., Кричковський В.Ю. Особливості вирощування та продуктивності міскантусу першого року вегетації як високоенергетичної культури. *Таврійський науковий вісник*. 2025. № 143. Ч. 2. С. 33–42.

262. Паламарчук В.Д., Скакун М.В. Вирощування силосної кукурудзи для виробництва біогазу та отримання дигестату. *Сільське господарство та лісництво*. 2025. №37. С. 13–26. DOI:10.37128/2707-5826-2025-2-2

263. Патица В.П., Тараріко О.Г., Дульнєв П.Г. Комбіноване добриво. *Аграрна наука – виробництву*. 2000. № 3. С. 4.

264. Перепелиця Н.М. Обліково-аналітичне забезпечення вирощування біоенергетичних культур. *Вісник аграрної науки*. 2018. №1 (778). С. 59–64.

265. Петриченко В.Ф., Лихочвор В.В. Рослинництво. Нові технології вирощування польових культур: підручник. 5-те, виправ., доповн. Львів: НВФ «Українські технології», 2020. 806 с.

266. Петров В. М. Організація виробництва та планування діяльності на підприємствах АПК : навч. Посібник. Харків : Майдан, 2016. 362 с.

267. Писаренко П.В., Курило В.Л., Кулик М.І. Агробіомаса та фітомаса енергетичних культур для виробництва біопалива. Розробка та вдосконалення енергетичних систем з урахуванням наявного потенціалу альтернативних джерел енергії: монографія. Полтава: ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2017. С. 258–266.

268. Полянський О.С., Дьяконов О.В., Скрипник О.С та ін. Напрями розвитку альтернативних джерел енергії: акцент на твердому біопаливі та гнучких технологіях його виготовлення : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. С. 7.

269. Попова О.П., Кулик М.І. Вплив позакореневої обробки посівів на врожайність біомаси сорго цукрового. *Аграрні інновації*. 2024. №24. С. 123–134. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.18>

270. Присяжнюк О. І., Климович Н. М., Полуніна О. В. та ін. Методологія і організація наукових досліджень у сільському господарстві та харчових технологіях. Київ : Нілан-ЛТД, 2021. 300 с.

271. Присяжнюк О. І., Малярєнко О. А., Lazdiņš А., Мусіч В. В., Гончарук О. М. Математичні моделі прогнозування врожайності біоенергетичних культур. *Новітні агротехнології*. 2024. Т. 12. № 3. <https://doi.org/10.47414/na.12.3.2024.317422>

272. Присяжнюк О.І., Гончарук О.М. Особливості формування продуктивності та якості біомаси міскантусу гіганського під впливом елементів агротехніки. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2022. Вип. 30. С.53–60.

273. Пришляк Н.В. Потенційні можливості вирощування біоенергетичної сировини на виробництво твердого біопалива. *Агросвіт*. 2021. №1–2. С. 33–45. DOI: 10.32702/2306 6792.2021.1–2.33

274. Пронько Л.М., Колесник Т.В. Умови та перспективи виробництва і реалізації поновлювальних джерел енергії в Україні. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. №1 (48). С. 185.

275. Пясецький П. І., Моргун А. В., Леонова К. П., Любич В. В. Вихід біоетанолу з урожаю стебел різних гібридів сорго цукрового за різної норми висіву. *Землеробство та рослинництво: теорія і практика*. 2022. № 3(5). С. 49–56.
276. Пясецький П.І., Моргун А.В., Любич В.В. Агробіологічні параметри рослин різних гібридів сорго цукрового залежно від норми висіву. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 127. С.132–138. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.127.17>
277. Радченко М.В., Глупак З.І., Данильченко О.М. Вирощування міскантусу в умовах північно-східної частини Лісостепу України. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2019. Вип. 1–2 (36–37). С.7–10.
278. Рахметов Д. Б., Вергун О. М., Рахметова С. О. *Panicum virgatum* L. – перспективний інтродуцент у Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НААН України. *Інтродукція рослин*. 2014. Вип. 3(63), С. 4–12.
279. Роїк М. В. та ін. Міскантус в Україні : монографія. Київ : ФОП Ямчинський О.В., 2019. 256 с.
280. Роїк М.В. Агроекологічні аспекти сталого розвитку біоенергетики. *Біоенергетика*, 2021. (1), 4–7. <https://doi.org/10.47414/be.1.2020.224906>
281. Роїк М.В. та ін. Економічні аспекти вирощування багаторічних енергетичних культур. *Біоенергетика*. 2019. № 1 (13). С. 4–8.
282. Роїк М.В., Ягольник О.Г. Агропромислові енергетичні плантації – майбутнє України. *Біоенергетика*. 2015. № 2. С. 4–7.
283. Романчук Л. Д., Василюк Т. П., Можарівська І. А. Ріст і розвиток сорго багаторічного в умовах Полісся України. *Вісник ЖНАЕУ*. 2013. № 2 (38), т. 1. С. 3–8.
284. Романчук Л. Д., Зінченко В. О., Василюк Т. П. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України. Житомир, 2014. 81 с.
285. Саблук П.Т., Мазоренко Д.І., Мазнев Г.Є. Технологічні карти та витрати на вирощування сільськогосподарських культур. Київ : ННЦ ІАЕ, 2004. 402 с.

286. Світовий експорт-імпорт сорго за країнами у 2021–2022 рр. Закордонна сільськогосподарська служба Міністерства сільського господарства США. URL: <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer>

287. Семенчук В.Г., Оліфірович В.О., Сандуляк Т.М. Вирощування міскантусу гігантського як сировини для виробництва твердих видів палива на схилених угіддях південно-західного Лісостепу. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 10 (823). С. 45–50.

288. Сиплива Н.О., Павленко О.В. Асортимент енергетичних культур придатних для поширення в Україні, як сировина для виробництва біопалива. Тези Міжнародної науково-практичної конференції.. Київ, НУБІП. 2017. С.138–140.

289. Сичук Л.В., Черевко Т.В., Ганченко О.М. Продуктивність гібридів сорго цукрового залежно від строків збирання в умовах Західного Полісся. *Біоенергетика*. 2022. №1-2 (19-20). С. 53–54.

290. Сінченко В.М., Гументик М.Я. та ін. Технології вирощування біоенергетичних культур. Київ: Компринт, 2024. 240 с.

291. Сінченко В.М., Ягольник О.О. Європейський досвід сталого виробництва біосировини на малопродуктивних землях в Україні. *Біоенергетика*. 2019. № 1 (13). С. 19–22.

292. Сітник А.А. Особливості формування продуктивності сорго цукрового в умовах Західного регіону України. *Український журнал природничих наук*. 2025. №12. С. 232–239. https://doi.org/10.32782/natural_journal.12.2025.23

293. Сітник А.А. Перспективи вирощування біоенергетичних культур в умовах Прикарпаття. *Історія освіти, науки і техніки в Україні: матеріали ХХ Всеукр. наук. конф. молодих учених та спец., присвяч. ювіл. датам від дня народж. видатних учених в галузі аграрних наук, зокрема: Георгія Миколайовича Висоцького (1865–1940); Левка (Лева) Платоновича Симиренка (1855–1920); Петра Івановича Прокоповича (1775–1850)*, Київ, 21–22 травня 2025 р. / НААН, ННСГБ, Ін-т історії аграр. науки, освіти та техніки; наук. ред. В.А. Вергунов. Вінниця: ТВОРИ, 2025. С. 168–170.

294. Сітник А.А. Продуктивність сорго цукрового залежно від елементів агротехнології в умовах Передкарпаття. *Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference, February 8–9, 2024*. FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, 2024. P. 188–190.

295. Сітник А.А., Карбівська У.М. Ефективність застосування добрив у вирощуванні міскантусу гігантського на дерново-підзолистих ґрунтах. *Інноваційні аспекти збереження і підвищення родючості ґрунтів у воєнний та повоєнний періоди: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 60-річчю тривалого стаціонарного дослідження Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН, м. Оброшине, 18 вересня 2025 р. Оброшине, Львів, 2025*. С. 210–212.

296. Сітник А.А., Карбівська У.М. Особливості формування продуктивності проса прутоподібного в умовах зміни клімату Західного регіону України. *Український журнал природничих наук*. 2025. №13. С. 310–317. DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.29>

297. Скачок Л.М., Квак В.М. Комплексна оцінка вирощування біоенергетичних культур залежно від різних систем удобрення. *Наукові праці Інституту Біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2016. Вип. 24. С. 86–92.

298. Слюсар І.Т., Камінський В.Ф., Соляник О.П., Сербенюк В.О. Продуктивність сільськогосподарських культур залежно від рівня їх удобрення на дренованих органогенних ґрунтах. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 11 (812). С. 5–15. 10.31073/agrovisnyk202011-01

299. Созанський М.А., Підліснюк І.В., Стаднік В.Є., Шаповал П.Й. Визначення вмісту важких металів у біомасі міскантусу гігантського, вирощеного на забруднених мілітарних територіях. *Біологічні студії*. 2017. Т. 11, № 3–4. С. 105–106.

300. Созінов О.О., Шпаар Д., Лісовий М.П. Альтернативне землеробство і зарубіжний досвід і перспективи в Україні. *Вісник аграр. науки*. 1997. № 8. С. 3–12.

301. Соколів С.П. Перспективи використання кукурудзи на зерно в якості біопалива. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2016. Вип. 173. С. 168–176.

302. Статистичний щорічник за 2021 р. Державна служба статистики України / За ред. І. Є. Вернера. К.: Держстат України, 2022. 447 с.

303. Степаненко М.В., Грабовський М.Б. Вплив системи удобрення на лінійні розміри рослин кукурудзи. *Аграрні інновації*. 2023. № 21. С. 104–109. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.21.16>

304. Стефановська Т.Р. та ін. Агрономічні аспекти вирощування міскантусу гігантського (*Miscanthus giganteus*) як сировини для виробництва твердого біопалива на забруднених внаслідок військової діяльності ґрунтах. *Біологічні студії*. 2017. Т. 11, № 3–4. С. 99–100 : http://nbuv.gov.ua/UJRN/bist_2017_11_3-4_86

305. Сторожик Л.І. Формування продуктивності сорго цукрового в умовах Східного Лісостепу України. *Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2018. Вип. 26. С. 91–104.

306. Сторожик Л.І., Музика О.В. Ефективність вирощування сорго цукрового для переробки на біопаливо. *Таврійський науковий вісник*. 2019. №108. С. 100–109.

307. Страпчук С. Виробництво та використання біоенергетичних ресурсів у сільському господарстві України на засадах сталості. *Економіка природокористування і сталий розвиток*. 2021. № 9 (28). С. 80–87. 10.37100/2616-7689.2021.9(28).11

308. Танчик С.П., Центило Л.В. Особливості удобрення кукурудзи за її вирощування на чорноземі типовому в Лісостепу України. *Рослинництво та ґрунтознавство*. 2017. № 269. С. 74–83.

309. Терещенко І.С., Сторожик Л.І. Якість, польова схожість насіння та фенольні профілі сучасних гібридів сорго цукрового. *Новітні агротехнології* 2023. Т. 11, № 3 С. doi: 10.47414/na.11.3.2023.288673

310. Ушкаренко В. О., Вожегова Р. А., Голобородько С. П., Коковіхін С. В. Методика польового дослідження: навч. посіб. Херсон: Грінь, 2014. 448 с.

311. Федорчук М.І., Коковіхін С.В., Каленська С.М., Рахметов Д.Б., Федорчук В.Г., Філіпова І.М., Пташинська О.В., Коваленко О.А., Дробітько А.В., Панфілова А.В. Науково-теоретичні засади та практичні аспекти формування еколого- безпечних технологій вирощування та переробки сорго в степовій зоні України : монографія. Херсон, 2017. 208 с.

312. Фурман В.М., Мороз О.С., Солодка Т.М., Люсак А.В. Вплив добрив на процеси формування та продуктивність кукурудзи на зелену масу. *Таврійський науковий вісник*. 2025. №142. Ч.2. С. 143–149. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.2.18>

313. Фурманець Ю.С., Фурманець М.Г. Вирощування міскантусу в умовах Західного Полісся. *Зернові культури*. 2020. Том 4. №2. С. 305–312. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0139>

314. Харитонов М. М., Бабенко М. Г., Мартинова Н. В. та ін. Комплексна екологічна оцінка створення енергетичних плантацій на рекультивованих землях: монографія. Дніпро: ЛІРА, 2020. 192 с.

315. Хіврич О.Б., Квак В.М., Каськів В.В. та ін. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6. С. 153–156.

316. Чайка Т.О., Яснолоб І.О. Еколого-соціо-економічні переваги вирощування енергетичних культур. *Економіка АПК*. 2017. № 12. С. 28–34.

317. Черевко Г., Шугало В. Сфери та переваги застосування біогазу у вирішенні енергетичних проблем. *Аграрна економіка*. 2017. Т.10, № 3-4. 2017. С. 127–132. <https://doi.org/10.31734/agrarecon2017.03.127>

318. Черенков А.В., Шевченко М.С., Дзюбецький Б.В. та ін. Соргові культури: технологія, використання, гібриди та сорти.. Дніпропетровськ : Роял Принт, 2011. 64 с.

319. Чернова А.В., Коваленко О.А., Корхова М.М. Урожайність зеленої маси сорго цукрового залежно від сортових особливостей, норм висіву, біопрепарату та мікродобрив за різних років дослідження. *Аграрні інновації*. 2020. №4. С. 136–142. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.4.20>

320. Черчель В. Ю., Дзюбецький Б. В., Кондратенко П. В. та ін. Програма вирощування кукурудзи в Україні в умовах зміни клімату. Дніпро: ДУ ІЗК НААН. 2021. 44 с.

321. Шевченко Н.В. Сортові ресурси проса в Україні. *Аграрні інновації*. 2024. №25. С. 102–107. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.15>

322. Ягольник О.О. Міскантус витримав удар і виграв перший раунд в Україні. *Біоенергетика*. 2015. № 2. С. 18–24.

323. Ямелинець Т.С. Біоенергетика на деградованих ґрунтах гірських частини Львівщини: потенціал і виклики. *Геохімія тезногенезу*. 2024. №38. <https://doi.org/10.32782/geotech2024.38.10>

324. Ямковий В. Як побудувати ефективну систему удобрення кукурудзи? *Пропозиція*. 2017. URL: <https://propozitsiya.com/ua/yak-pobuduvati-efektivnu-sistemu-udobrennya-kukurudzi>

325. Ясенецький В. Ефективність використання цукрового сорго на енергетичні та харчові потреби. *Техніка і технології АПК*. 2017. № 2 (89). С. 40–41.

326. Яснолоб І.О., Чайка Т.О., Горб О.О. Альтернативні джерела енергії у підвищенні енергоефективності та енергонезалежності сільських територій: колективна монографія. Полтава: Видавництво ПП «Астроя», 2019. 276 с.

327. Ястремська Л.С., Пришляк Р.І., Федонюк Ю.В. Міскантус – енергетична культура для отримання біопалива. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2017. № 1. http://nbuv.gov.ua/UJRN/peb_2017_1_3

ДОДАТКИ

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії Б:

1. Карбівська У.М., Сітник А.А. Продуктивність міскантусу залежно від елементів агротехнології на дерново-підзолистому ґрунті в умовах Прикарпаття. *Таврійський науковий вісник*. 2024. №137. С. 111–116.

DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.14>

URL: https://tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/137_2024/16.pdf

2. Сітник А.А. Особливості формування продуктивності сорго цукрового в умовах Західного регіону України. *Український журнал природничих наук*. 2025. №12. С. 232–239.

DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.23>

URL: <https://naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns/article/view/316>

3. Карбівська У.М., Сітник А.А. Оптимізація удобрення як чинник підвищення врожайності та якості рослин сорго цукрового і кукурудзи в Західному регіоні України. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2025. Вип. 78 (1). С. 69–78.

DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2025-\(78\)-1-6](https://doi.org/10.32636/01308521.2025-(78)-1-6)

URL: <https://journals.isgkr.science/index.php/phzt/article/view/404>

4. Сітник А.А., Карбівська У.М. Особливості формування продуктивності проса прутоподібного в умовах зміни клімату Західного регіону України. *Український журнал природничих наук*. 2025. №13. С. 310–317.

DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.29>

URL: <https://naturaljournal.zu.edu.ua/index.php/ujns/article/view/361>

Тези наукових доповідей

5. **Сітник А.А.** Продуктивність сорго цукрового залежно від елементів агротехнології в умовах Передкарпаття. *Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference, February 8–9, 2024.* FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, 2024. P. 188–190.

URL: [Conference-Proceedings-February-8-9-2024.pdf](#)

6. Karbivska U.M., Hryhoriv Ya. Ya., **Sitnyk A.A.** Impact of fertilization on the productivity of sugar sorghum in the conditions of the Carpathian. *Topical aspects of modern scientific research: The 4th International Scientific and Practical Conference, December 21–23, 2023.* CPN Publishing Group, Tokyo, Japan, 2023. P. 15–19.

URL: <https://surl.li/hoxdtg>

7. **Сітник А.А.** Перспективи вирощування біоенергетичних культур в умовах Прикарпаття. *Історія освіти, науки і техніки в Україні: матеріали XX Всеукр. наук. конф. молодих учених та спец., присвяч. ювіл. датам від дня народж. видатних учених в галузі аграрних наук, зокрема: Георгія Миколайовича Висоцького (1865–1940); Левка (Лева) Платоновича Симиренка (1855–1920); Петра Івановича Прокоповича (1775–1850), Київ, 21–22 травня 2025 р. / НААН, ННСГБ, Ін-т історії аграр. науки, освіти та техніки; наук. ред. В.А. Вергунов. Вінниця: ТВОРИ, 2025. С. 168–170.*

URL: file:///C:/Users/DELL/Desktop/zbirnik-konf-22_05_2025.pdf

8. Карбівська У.М., **Сітник А.А.** Особливості росту та розвитку багаторічних енергетичних культур в умовах Прикарпаття. *Науково-інноваційний розвиток агровиробництва як запорука продовольчої безпеки України: вчора, сьогодні, завтра: матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. конф., присвяченої ювілейним датам: 160-річчю Полтавського товариства сільського господарства, 105-річчю Полтавського державного аграрного університету, 90-річчю від дня народження Героя України С. С. Антонця (1935–2022), м. Київ, 17–18 вересня 2025 р. / НААН, ННСГБ і ін; наук. ред. В.А. Вергунов. Вінниця: ТВОРИ С. 322–324.*

URL: [konf_16_09_2025.pdf](#)

9. **Сітник А.А., Карбівська У.М.** Ефективність застосування добрив у вирощуванні міскантусу гігантського на дерново-підзолистих ґрунтах. *Інноваційні аспекти збереження і підвищення родючості ґрунтів у воєнний та повоєнний періоди*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 60-річчю тривалого стаціонарного дослідження Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН, м. Оброшине, 18 вересня 2025 р. Оброшине, Львів, 2025. С. 210–212.

URL: https://drive.google.com/file/d/1m3u0JSXWSMdTa5iOFPiC53Fxb-7_H3j2/view

10. **Карбівська У.М., Сітник А.А.** Адаптивні стратегії формування врожайності проса прутноподібного (*Panicum virgatum* L.) в умовах кліматичних змін Західного регіону України. *Актуальні питання розвитку сільського господарства: теорія і практика*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 9 жовтня 2025 р. / НААН, Інститут сільського господарства Карпатського регіону. Оброшине: Вид-во ІСГКР, 2025. С. 99–103.

URL: [ЗБІРНИК тез ПДСГДС 09.10.2025.pdf](#)

11. **Баланюк С.І., Карбівська У.М., Сітник А.А.** Перспективи вирощування енергетичних культур на низькопродуктивних ґрунтах Західного Лісостепу України. *Адаптація агровиробництва до змін клімату та грантової родючості*: матеріали міжнар. наук.-прак. конф., с. Полігон, Миколаївський район, Миколаївська область, 9 жовтня 2025 р. / ДУ “Миколаївська державна сільськогосподарська дослідна станція ІКОСГ НААН”. Полігон: Вид-во ІКОСГ, 2025. С. 15–17.

URL: <https://surl.li/lsrcto>

Методичні вказівки

12. **Карбівська У.М., Сітник А.А.** Методичні вказівки для самостійного вивчення дисципліни «Новітні біоенергетичні рослинні ресурси» для денної та заочної форм навчання здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти навчання зі спеціальності Н1 ”Агрономія”, ОНП ”Агрономія”. Івано-Франківськ. 2025. 30 с.

[URL:https://kag.cnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/27/2025/12/novitni-bioenerhetychni-roslynni-resursy-karbivska-sitnyk.pdf](https://kag.cnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/27/2025/12/novitni-bioenerhetychni-roslynni-resursy-karbivska-sitnyk.pdf)

Апробація результатів досліджень. Основні результати досліджень щорічно висвітлювалися в доповідях і обговорювалися на щорічних викладацько-аспіранських конференціях та наукових семінарах. Результати і висновки досліджень оприлюднено у виступах на міжнародній конференції: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates» (Dnipro, Ukraine. February 8-9, 2024); The 4th International scientific and practical conference “Topical aspects of modern scientific research” (Tokyo, Japan, December 21-23, 2023); XX всеукр. наук. конф. молодих учених та спец., присвяч. ювіл. датам від дня народж. видатних учених в галузі аграрних наук (м. Київ, 21–22 травня 2025 р.); міжнар. наук.-прак. конф. «Інноваційні аспекти збереження і підвищення родючості ґрунтів у воєнний та повоєнний періоди» (с. Оброшине, 2025); міжнар. наук.-прак. конф. «Актуальні питання розвитку сільського господарства: теорія і практика» (м. Івано-Франківськ, 2025 р.); міжнар. наук.-прак. конф. «Адаптація агровиробництва до змін клімату та ґрунтової родючості» (с-ще Полігон, Миколаївського району, Миколаївської області, 2025 р.).



Україна

ПРИВАТНЕ ФЕРМЕРСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО «ПОТОЧИЩЕ»

вул. Шевченка 28, с. Поточище, Коломийський район, Івано-Франківська область, Городенківська ОТГ, 78135, Україна
Ідентифікаційний код: 03752953, ІПН 037529509047, р/р UA383365030000026000300978420 в АТ «Ощадбанк»
pfgpotochyshe@ukr.net

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**результатів науково-дослідних робіт у виробництво**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи на тему «Особливості формування продуктивності біоенергетичних культур в умовах зміни клімату Західного регіону України» за спеціальністю 201°Агрономія, виконаної в Карпатському національному університеті імені Василя Стефаника аспірантом Сітником А.А. впроваджені в умовах ПФГ «Поточище» с. Поточище Коломийського району Івано-Франківської області.

Вид впроваджених результатів: отримано збільшення врожайності міскантусу гігантського та кукурудзи відповідно рекомендацій розроблених автором дисертації.

Рік та обсяг впровадження: 2024-2025 роки, площа 1 га.

Отриманий економічний ефект від впровадження: комплексний агрономічно-економічний та енергетичний аналіз доводить, що для біоенергетичного виробництва та стабільного функціонування енергетичних агросистем найбільш доцільними культурами є міскантус гігантський та кукурудза, які забезпечують найвищі рівні врожайності, прибутковості та енерговіддачі. Чистий прибуток становив 17–35 тис. грн/га у різних варіантах. Варіанти з мікродобривами показали найвище співвідношення «доходи/витрати» і перевищили 100 % рентабельності.

Директор ПФГ «Поточище»



Мирослав КОЗЛО



Міністерство освіти і науки України
КАРПАТСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТЕФАНИКА

вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018; код згідно з ЄДРПОУ 02125266
тел. (+380-342) 75-23-51; факс (+380-342) 53-15-74; e-mail office@cnu.edu.ua; сайт https://cnu.edu.ua

04.12.2015 № 03.09-29/15 На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційного дослідження здобувача освітньо-наукового ступеня доктора філософії Сітника Андрія Андрійовича за темою

«Особливості формування продуктивності біоенергетичних культур в умовах зміни клімату Західного регіону України» за спеціальністю Н1°Агрономія галузі знань Н Сільське, лісове, рибне господарство та ветеринарна медицина.

Матеріали дослідження Сітника Андрія Андрійовича щодо вивчення закономірностей формування продуктивності міскантусу гігантського, проса прутноподібного, сорго цукрового і кукурудзи залежно від удобрення та удосконалення елементів технології їх вирощування в умовах Західного регіону України використовуються в навчальному процесі Карпатського національного університету імені Василя Стефаника при викладанні навчальних дисциплін «Технологія вирощування і переробка енергетичних культур» та «Новітні біоенергетичні рослинні ресурси» на кафедрі лісового і аграрного менеджменту факультету природничих наук.

Проректор з науково-педагогічної роботи і міжнародної діяльності, кандидат хімічних наук, доцент



Лілія ТУРОВСЬКА

Декан факультету природничих наук

Віктор СЛУЧИК

Завідувач кафедри лісового і аграрного менеджменту

Віктор КЛІД