

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ВАСЬКІВСЬКИЙ БОГДАН СЕРГІЙОВИЧ

УДК: 631.53.048:633.15

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ ЗА
ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОЇ НОРМИ ВИСІВУ НАСІННЯ**

201 – Агрономія

(20 «Аграрні науки та продовольство»)

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 201 «Агрономія»

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

_____ Б. С. Васьківський

Науковий керівник:
Гарбар Леся Анатоліївна,
Кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Васьківський Б.С. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ ЗА ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОЇ НОРМИ ВИСІВУ НАСІННЯ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 201 «Агрономія» (20 – Аграрні науки та продовольство). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2025.

У дисертаційній роботі наведено теоретичне обґрунтування та результати трирічних польових досліджень (2023–2025 рр.) з визначення оптимальних норм висіву насіння гібриду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від зон продуктивності поля в умовах північної частини лівобережної України. Встановлено вплив норми висіву та зони продуктивності на фактичну густоту стояння рослин, тривалість міжфазних і вегетаційного періодів, біометричні та структурно-морфологічні показники, урожайність і якість зерна та побічної продукції. Проведено економічну та біоенергетичну оцінку технології вирощування кукурудзи за диференційованих норм висіву насіння, на її основі розроблено зонально-специфічні рекомендації для виробництва.

Проведено огляд та узагальнення наукової літератури вітчизняних і зарубіжних авторів щодо біоенергетичних основ оцінки агротехнологій, біологічних і агрономічних аспектів формування продуктивності кукурудзи залежно від норми висіву та густоти стояння рослин, еволюції концепції диференційованого висіву насіння та сучасних технологій точного землеробства. Визначено, що в умовах просторово-неоднорідних полів перехідної агроекологічної зони, реакція гібридів кукурудзи на норму висіву залежно від зони продуктивності через призму біоенергетичного аналізу залишається недостатньо дослідженою, що є актуальною науковою і виробничою проблемою.

Встановлено, що зона проведення досліджень характеризується вираженою агроландшафтною мозаїчністю з просторовим чергуванням

дерново-підзолистих ґрунтів, сірих лісових ґрунтів і опідзолених чорноземів у межах одного поля. Між виділеними зонами продуктивності зафіксовано достовірну диференціацію агрохімічних властивостей: рН змінювався від 4,93 у низькопродуктивній зоні до 6,30 у зоні високої, вміст гумусу – від 1,0 до 2,3 %, ємність катіонного обміну – від 5,03 до 11,07 смоль/кг. Твердість ґрунту у шарі 30–35 см у низькопродуктивній зоні перевищувала аналогічний показник високопродуктивної зони майже у 1,7 разу. Гідротермічні умови вегетаційних сезонів суттєво відрізнялися між роками: ГТК за вегетацію становив 1,05 у 2023 р., 0,55 – у посушливому 2024 р. та 0,96 – у 2025 р., що забезпечило широкий діапазон агрокліматичних сценаріїв для оцінки технології.

Фактична густина стояння рослин на момент збирання систематично відрізнялася між зонами продуктивності незалежно від норми висіву. Середнє відносне відхилення від планової норми становило 2,8 % у високопродуктивній зоні, 3,6 % – у середньопродуктивній і 5,8 % – у низькопродуктивній. Тривалість вегетаційного циклу кукурудзи визначалася насамперед зоною продуктивності: різниця між високо- і низькопродуктивною зонами становила 18,5 доби від сходів до воскової стиглості, тоді як між крайніми нормами висіву – лише 6,5 доби. У низькопродуктивній зоні спостерігалось прискорення перебігу вегетативних фаз і скорочення підперіоду наливу зерна в середньому на 9,2 доби порівняно з високопродуктивною зоною, що є проявом адаптивної реакції рослин на дефіцит вологи. Збільшення норми висіву від 65 до 85 тис. шт./га подовжувало інтервал між цвітінням волоті і від 9,2 до 13,4 доби.

Висота рослин у фазу цвітіння мала параболічну залежність від норми висіву з максимумом за 80 тис. шт./га, проте, вплив зони продуктивності був значно сильнішим: різниця між зонами становила 59,1 см проти 12,9 см між крайніми нормами висіву. Показники структури врожаю – маса 1000 зерен, кількість зерен у початку, натура зерна – суттєво диференціювалися між

зонами: різниця за масою 1000 зерен становила 45,8 г (15,7 %), за кількістю зерен у початку між крайніми комбінаціями зони і норми – 237 штук (52,9 %).

Урожайність зерна кукурудзи в середньому за роки досліджень становила 10,70 т/га у високопродуктивній зоні, 9,21 т/га – у середньопродуктивній і 7,42 т/га – низькопродуктивній. За результатами поліноміальної регресії встановлено зонально-специфічні оптимуми норм висіву: для високопродуктивної зони – 81,8 тис. шт./га (прогнозована врожайність 11,21 т/га), для середньопродуктивної – 75,9 тис. шт./га (9,56 т/га), для низькопродуктивної – 68,1 тис. шт./га (7,70 т/га). Коефіцієнти детермінації моделей перевищували 0,90 у більшості варіантів. Якісні показники зерна закономірно диференціювалися між зонами: вміст крохмалю зростав від низько- до високопродуктивної зони (68,9 – 70,8 – 72,1 %), тоді як вміст білка і жиру змінювалися у зворотному напрямку.

Економічна ефективність диференційованого висіву підтверджена для всіх трьох зон. Найвищий прибуток у високопродуктивній зоні забезпечила норма 80 тис. насінин/га – 44 925 грн/га (+14,8 % до контролю), у середньопродуктивній зоні – норма 75 тис. шт./га (35 219 грн/га), у низькопродуктивній – норма 70 тис. шт./га (26 849 грн/га, +6,6 % до контролю). Найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності зафіксовано у високопродуктивній зоні за норми 80 тис. шт./га – $K_{ee} = 8,39$. У середньопродуктивній зоні максимальний K_{ee} становив 7,04 за норми 75 тис. шт./га, у низькопродуктивній зоні – 5,69 за норми 70 тис. насінин/га. КФАР досягав максимуму у високопродуктивній зоні за норми 80 тис. насінин/га – 2,37 %. Збіг економічного і біоенергетичного оптимумів норм висіву в усіх зонах підтверджує структурну стійкість рекомендованих рішень незалежно від кон'юнктури ринку.

Ключові слова: кукурудза, гібрид, норма висіву, зона продуктивності, диференційований висів, урожайність, якість зерна, коефіцієнт енергетичної ефективності, біоенергетичний аналіз, точне землеробство.

SUMMARY

Vaskivskyi B.S. EFFICIENCY OF MAIZE CULTIVATION UNDER DIFFERENTIATED SEEDING RATES. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 201 “Agronomy” (20 – Agricultural Sciences and Food). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2025.

The theoretical justification and results of three-year field experiments (2023–2025) are presented in the dissertation, aimed at determining the optimal seeding rates for the maize hybrid DKS 3939 (FAO 320) in relation to field productivity zones under the transitional conditions between Polissia and Forest-Steppe in Chernihiv region, Ukraine. The influence of seeding rate and productivity zone on actual plant stand density, duration of inter-phase and growing periods, biometric and structural-morphological traits, grain yield and quality, and by-product quality was established. An economic and bioenergetic assessment of the differentiated seeding rate technology was conducted, and zone-specific production recommendations were developed.

A review and synthesis of domestic and international scientific literature was carried out regarding the bioenergetic principles of agrotechnology assessment, biological and agronomic aspects of maize productivity formation depending on seeding rate and plant density, the evolution of the variable-rate seeding concept, and modern precision agriculture technologies. It was established that the response of maize hybrids to seeding rate depending on productivity zone, as evaluated through bioenergetic analysis, remains insufficiently studied under spatially heterogeneous fields of transitional agro-ecological zones, representing a relevant scientific and practical problem.

The study area was found to exhibit pronounced agro-landscape heterogeneity with spatial alternation of sod-podzolic soils, grey forest soils, and podzolized chernozems within a single field. Significant differentiation of agrochemical properties was recorded between productivity zones: soil pH ranged from 4.93 in the low zone to 6.30 in the high zone, humus content from 1.0 to 2.3%, and cation

exchange capacity from 5.03 to 11.07 cmol/kg. Soil resistance to penetration at 30–35 cm depth in the low productivity zone was approximately 1.7 times higher than in the high productivity zone. Hydrothermal conditions varied substantially between seasons: the hydrothermal coefficient during the growing period was 1.05 in 2023, 0.55 in the drought year of 2024, and 0.96 in 2025, providing a wide range of agroclimatic scenarios for technology evaluation.

Actual plant stand density at harvest systematically differed between productivity zones regardless of seeding rate. Mean relative deviation from the planned seeding rate was 2.8% in the high productivity zone, 3.6% in the medium zone, and 5.8% in the low zone. Growing season duration was primarily determined by productivity zone: the difference between high and low productivity zones reached 18.5 days from emergence to dough stage, while between extreme seeding rates it was only 6.5 days. In the low productivity zone, acceleration of vegetative phases and reduction of the grain-filling period by an average of 9.2 days compared to the high productivity zone were observed, reflecting an adaptive drought-escape response. Increasing seeding rate from 65 to 85 thousand plants/ha extended the anthesis-silking interval from 9.2 to 13.4 days, increasing the risk of incomplete pollination at above-optimal densities.

Plant height at silking showed a parabolic relationship with seeding rate, with a maximum at 80 thousand plants/ha, but the influence of productivity zone was significantly stronger: the difference between zones was 59.1 cm compared to 12.9 cm between extreme seeding rates. Yield structure indicators - 1,000-grain weight, number of kernels per ear, test weight - showed pronounced differentiation between zones: the difference in 1,000-grain weight reached 45.8 g (15.7%), and in kernel number per ear between extreme zone-rate combinations - 237 kernels (52.9%).

Mean grain yield over the study years was 10.70 t/ha in the high productivity zone, 9.21 t/ha in the medium zone, and 7.42 t/ha in the low zone. Polynomial regression analysis established zone-specific optimal seeding rates: 81.8 thousand plants/ha for the high productivity zone (projected yield 11.21 t/ha), 75.9 thousand plants/ha for the medium zone (9.56 t/ha), and 68.1 thousand plants/ha for the low

productivity zone (7.70 t/ha). Coefficients of determination exceeded 0.90 in most variants. Grain quality indicators showed consistent zonal differentiation: starch content increased from the low to the high productivity zone (68.9 - 70.8 - 72.1%), while protein and fat content showed the opposite trend.

Economic efficiency of differentiated seeding was confirmed for all three zones. The highest profit in the high productivity zone was achieved at 80 thousand plants/ha - 44,925 UAH/ha (+14.8% compared to the control), in the medium zone - at 75 thousand plants/ha (35,219 UAH/ha), and in the low productivity zone - at 70 thousand plants/ha (26,849 UAH/ha, +6.6% compared to the control). The highest energy efficiency coefficient was recorded in the high productivity zone at 80 thousand plants/ha - EEC = 8.39 (very high efficiency). In the medium zone, the maximum EEC was 7.04 at 75 thousand plants/ha (high efficiency), and in the low productivity zone - 5.69 at 70 thousand plants/ha (medium efficiency). The radiation use efficiency coefficient reached its maximum in the high productivity zone at 80 thousand plants/ha - 2.37%. The coincidence of economic and bioenergetic optima for all productivity zones confirms the structural stability of the recommended solutions regardless of grain market conditions.

Keywords: maize, hybrid, seeding rate, productivity zone, variable-rate seeding, grain yield, grain quality, energy efficiency coefficient, bioenergetic analysis, precision agriculture.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Васьківський Б. С., Гарбар Л. А. Вплив елементів живлення на формування зон продуктивності кукурудзи. Аграрні інновації. 2025. № 30. С. 7–11. (Васьківським Б. С. проведено польові дослідження, здійснено агрохімічний аналіз ґрунту, кореляційний аналіз та картування зон продуктивності, підготовлено статтю до друку. Гарбар Л. А. здійснено наукове керівництво, методичний супровід закладання досліду та опрацювання наукових джерел).
2. Harbar L., Vaskivskyi B. Dynamics of biometric indicators of maize plants under the influence of sowing rates and field productivity zones. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 2025. Vol. 21 (4). P. 81–91. (Васьківським Б. С. проведено польові спостереження, здійснено вимірювання біометричних показників рослин, проведено статистичну обробку даних, оформлено статтю. Гарбар Л. А. здійснено наукове керівництво та методичний супровід проведення досліджень).
3. Harbar L., Vaskivskyi B. Formation of maize grain quality indicators under the influence of seeding rates and field productivity zones. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 2026. Vol. 22 (1). P. 54–65. (Васьківським Б. С. проведено лабораторні аналізи якості зерна, здійснено аналіз та узагальнення експериментальних даних, підготовлено статтю до друку. Гарбар Л. А. здійснено наукове керівництво, методичний супровід лабораторних досліджень та часткове опрацювання наукових джерел).
4. Harbar L., Vaskivskyi B. Justification for the delineation of field productivity zones based on long-term monitoring of maize yield and satellite data. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 2026. Vol. 22 (2). P. 51–64. (Васьківським Б. С. проведено геоінформаційний аналіз багаторічних карт урожайності та супутникових

індексів, здійснено кластерний аналіз і верифікацію меж зон продуктивності, підготовлено статтю. Гарбар Л. А. здійснено наукове керівництво та методичний супровід досліджень).

Тези наукових конференцій

5. Васьківський Б. С., Гарбар Л. А. Перспективи диференційованого висіву кукурудзи. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, секція 2: Післявоєнне відновлення рослинних ресурсів та екологічна безпека країни, Київ, 25 трав. 2023. Київ, 2023. С. 70–73. (Васьківським Б. С. підготовлено тези, проведено аналіз літературних джерел. Гарбар Л. А. здійснено наукове керівництво та підготовку тез до публікації).

6. Васьківський Б. С., Гарбар Л. А. Вплив норм висіву та зон продуктивності на висоту рослин кукурудзи. Продовольча безпека України. Збереження та відновлення ґрунтових і рослинних ресурсів : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 22–23 трав. 2025. НУБіП України, 2025. С. 60–63. (Васьківським Б. С. проведено польові вимірювання висоти рослин, здійснено аналіз даних, підготовлено тези. Гарбар Л. А. здійснено методичний супровід та підготовку тез до публікації).

7. Васьківський Б. С., Гарбар Л. А. Вплив змінних норм висіву на продуктивність гібридів кукурудзи. Вклад наукових інвестицій у розвиток агропромислового комплексу в умовах обмеженого ресурсного забезпечення : матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих вчених і спеціалістів, Дніпро, 04 квіт. 2025. НААН, ДУ Інститут зернових культур. Дніпро, 2025. 263 с. (Васьківським Б. С. проведено аналіз реакції гібридів на змінні норми висіву, підготовлено тези до публікації. Гарбар Л. А. здійснено наукове керівництво та методичний супровід).

8. Васьківський Б. С., Гарбар Л. А. Вплив вологозабезпеченості та густоти рослин кукурудзи на тривалість вегетації. Сучасні підходи до вирощування, переробки і зберігання продукції рослинництва : матеріали

доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених, Миколаїв, 19–20 берез. 2026. Миколаїв: МНАУ, 2026. (Васьківським Б. С. проведено фенологічні спостереження, здійснено аналіз впливу вологозабезпеченості на тривалість вегетаційного періоду, підготовлено тези. Гарбар Л. А. здійснено наукове керівництво та методичний супровід досліджень

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ БІОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ ТА НАУКОВІ ОСНОВИ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ВИСІВУ НАСІННЯ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ) ..	21
1.1. Концепція біоенергетичної ефективності та її роль у формуванні енергозберігаючих технологій	21
1.2. Біологічні основи та агрономічні аспекти формування продуктивності кукурудзи залежно від норми висіву та густоти стояння рослин.....	33
1.3. Еволюція концепції диференційованого висіву насіння (VRS), від наукової ідеї до виробничої практики.....	46
1.4. Сучасні інструменти точного землеробства для підвищення біоенергетичної ефективності виробництва зерна кукурудзи.....	52
Висновки до першого розділу.....	57
Список літератури до першого розділу.....	60
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	73
2.1. Ґрунтово-кліматичні умови зони проведення досліджень.....	73
2.2. Характеристика гібридів кукурудзи, схема досліду, варіанти норм висіву	91
2.3. Основні агротехнічні заходи у досліді.....	96
2.4. Методи визначення біометричних показників і розрахунків ефективності	97
2.5 Методика визначення зон продуктивності поля	102
Висновки до другого розділу	104
Список літератури до другого розділу	106
РОЗДІЛ 3. АГРОЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОСТУ І РОЗВИТКУ КУКУРУДЗИ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗОНИ ПРОДУКТИВНОСТІ ПОЛЯ ТА НОРМИ ВИСІВУ НАСІННЯ.....	114
3.1. Фактична густина стояння рослин кукурудзи залежно від норм висіву та зон продуктивності на момент збору врожаю	114
3.2. Вплив норм висіву та зон продуктивності поля на тривалість міжфазних періодів кукурудзи залежно від погодних умов вирощування дослідних років.....	120
3.3. Вплив норм висіву та зон продуктивності поля на висоту рослин кукурудзи.....	136
3.4. Оцінка впливу норми висіву та зони продуктивності на структурно- морфологічні показники врожаю кукурудзи	148

Висновки до третього розділу.....	158
Список літератури до третього розділу	160
РОЗДІЛ 4. ПРОДУКТИВНІСТЬ, ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ	162
4.1. Вплив норми висіву насіння та зон продуктивності поля на продуктивність гібриду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320).....	164
4.2. Вплив норм висіву та зон продуктивності поля на якісні показники зерна та побічної продукції	175
4.3. Математичне моделювання впливу елементів технології на формування урожайності	242
Висновки до четвертого розділу	253
Список літератури до четвертого розділу	255
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ТА БІОЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ ЗА ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИХ НОРМ ВИСІВУ НАСІННЯ	260
5.1. Аналіз економічної ефективності технології вирощування кукурудзи за диференційованого висіву насіння	261
5.2. Оцінка біоенергетичної ефективності технології вирощування кукурудзи за диференційованого висіву насіння	265
Висновки до п'ятого розділу	268
ВИСНОВКИ	270
РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ	274
ДОДАТКИ	275

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПК – агропромисловий комплекс
 АСІ – anthesis-silking interval (інтервал між цвітінням волоті і початку)
 ВВЕ – вихід валової енергії
 ГДж – гігаджоуль
 ГІС – геоінформаційна система
 ГТК – гідротермічний коефіцієнт
 ЗЗР – засоби захисту рослин
 КЕЕ – коефіцієнт енергетичної ефективності
 КФАР – коефіцієнт використання фотосинтетично активної радіації
 МДж – мегаджоуль
 НБУ – Національний банк України
 НІР – найменша істотна різниця
 ПДВ – податок на додану вартість
 САТ – сума активних температур
 СЕВ – сукупні енергетичні витрати
 ТЗ – точне землеробство
 ФАР – фотосинтетично активна радіація
 ФАО (FAO) – Food and Agriculture Organization of the United Nations
 (Продовольча і сільськогосподарська організація ООН)
 CV – coefficient of variation (коефіцієнт варіації)
 ЕСа – apparent soil electrical conductivity (електропровідність ґрунту)
 Еприб – енергетичний прибуток
 Ев – енергія урожаю (вихід валової енергії)
 Ео – антропогенні енерговитрати
 Кее – коефіцієнт енергетичної ефективності
 NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (нормалізований різницевий
 вегетаційний індекс)

ВСТУП

Сучасне сільськогосподарське виробництво функціонує в умовах одночасного тиску кількох глобальних викликів: зростання вартості енергоносіїв і агрохімікатів, кліматичної нестабільності з посиленням посушливих явищ, необхідності скорочення екологічного навантаження і водночас забезпечення продовольчої безпеки. В Україні ці виклики набувають особливої гостроти - країна є одним із найбільших світових виробників і експортерів зерна кукурудзи, і ефективність кукурудзівництва безпосередньо визначає стан агропромислового комплексу. За таких умов нарощування валового виробництва зерна лише за рахунок розширення площ або підвищення інтенсивності технологій є недостатньою і економічно вразливою стратегією. Альтернативою є підвищення ефективності використання ресурсів на вже наявних площах через адаптивні, просторово диференційовані агротехнологічні рішення.

Актуальність теми. Кукурудза є провідною зерновою культурою України за площею посіву і валовим виробництвом. Водночас традиційна технологія вирощування кукурудзи передбачає застосування єдиної рівномірної норми висіву насіння по всьому полю незалежно від його просторової неоднорідності. Це є принципово оптимальним рішенням, оскільки реальні поля, особливо в перехідних агроєкологічних зонах, характеризуються вираженою внутрішньо польовою варіабельністю ґрунтових властивостей, рельєфу, водного режиму і рівня природної родючості. Різні ділянки одного поля мають різний ресурсний потенціал і тому потребують різної норми висіву для реалізації максимальної продуктивності.

Концепція диференційованого висіву насіння залежно від зон продуктивності поля має наукове обґрунтування і підтверджена міжнародними дослідженнями. Однак більшість наявних робіт оцінюють ефект диференційованого висіву через урожайність і економічну ефективність, тоді як його вплив на біоенергетичні показники – коефіцієнт енергетичної ефективності (K_{ee}), енергетичний прибуток, коефіцієнт використання

фотосинтетично активної радіації (КФАР) – залишається практично невивченим. Саме біоенергетичний аналіз дозволяє оцінити стійкість агрономічного рішення незалежно від цінової кон'юнктури і є важливим інструментом обґрунтування ресурсоощадних технологій.

Особливої актуальності ця проблема набуває для умов, де високопродуктивна просторова мозаїчність ґрунтового покриву, поєднання ґрунтів різного механічного складу і родючості на одному полі формують виражену внутрішню польову диференціацію умов вирощування кукурудзи. Наукових досліджень, які б комплексно оцінювали норми висіву кукурудзи в розрізі зон продуктивності з урахуванням як агрономічних, так і біоенергетичних критеріїв для цього регіону, практично не проводилося.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертації Б. С. Васківського є частиною науково-дослідної роботи кафедри рослинництва Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою «Стале виробництво продукції рослинництва для забезпечення продовольчої, енергетичної безпеки за ефективного використання природних ресурсів» (номер державної реєстрації 0123U102166), співвиконавцем якої був здобувач.

Мета і завдання досліджень. Наукове обґрунтування зонально диференційованих норм висіву насіння кукурудзи залежно від продуктивного потенціалу ділянок поля та оцінка їхньої агрономічної, економічної і біоенергетичної ефективності.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

- провести аналіз наукової літератури щодо біоенергетичних основ оцінки агротехнологій, біологічних і агрономічних засад формування продуктивності кукурудзи залежно від норми висіву та еволюції концепції диференційованого висіву;
- охарактеризувати ґрунтово-кліматичні умови зони проведення досліджень і встановити просторову диференціацію агрохімічних і фізичних властивостей ґрунту між зонами продуктивності дослідного поля;

- вивчити вплив норми висіву та зони продуктивності на фактичну густоту стояння рослин кукурудзи на момент збирання врожаю;
- встановити залежність тривалості міжфазних і вегетаційного періодів кукурудзи від норми висіву та зони продуктивності поля в різні за гідротермічними умовами роки;
- дослідити вплив досліджуваних факторів на біометричні і структурно-морфологічні показники рослин гібриду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320);
- визначити урожайність і якісні показники зерна та побічної продукції кукурудзи залежно від норми висіву і зони продуктивності поля;
- встановити математичні закономірності реакції урожайності на норму висіву в різних зонах продуктивності і визначити зонально-специфічні оптимуми густоти стояння рослин;
- розрахувати економічну ефективність диференційованих норм висіву залежно від зони продуктивності поля;
- провести біоенергетичну оцінку технології вирощування кукурудзи за диференційованих норм висіву за показниками E_o , E_v , $E_{приб}$, $K_{ее}$ і $K_{ФАР}$;

Об'єкт досліджень: процеси росту, розвитку, формування урожайності та якості зерна гібриду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву насіння та зони продуктивності поля.

Предмет досліджень: гібрид кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320); зони продуктивності поля; норми висіву насіння; біометричні показники, урожайність та якість зерна кукурудзи; економічна та біоенергетична ефективність диференційованих норм висіву в системі точного землеробства.

Методи дослідження. У процесі досліджень використовували загальнонаукові та спеціальні методи: польовий – для вивчення росту, розвитку та формування продуктивності кукурудзи залежно від досліджуваних факторів; лабораторний вимірювально-ваговий – для визначення

біометричних і якісних показників продукції; геоінформаційний – для виділення зон продуктивності поля на основі багаторічних карт урожайності, агрохімічних карт та кластерного аналізу в середовищі QGIS; статистичний - дисперсійний аналіз із оцінкою достовірності різниць між варіантами за НІР₀₅; математичного моделювання – поліноміальна регресія для встановлення оптимальних норм висіву в кожній зоні продуктивності; порівняльно-розрахунковий – для визначення економічної та біоенергетичної ефективності; графічне і табличне відображення результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у науковому обґрунтуванні зонально диференційованих норм висіву насіння кукурудзи як інструменту одночасного підвищення агрономічної, економічної та біоенергетичної ефективності виробництва зерна в умовах просторово-неоднорідних полів перехідної агроекологічної зони.

Уперше:

- провести аналіз наукової літератури щодо біоенергетичних основ оцінки агротехнологій, біологічних і агрономічних засад формування продуктивності кукурудзи залежно від норми висіву та еволюції концепції диференційованого висіву;
- охарактеризувати ґрунтово-кліматичні умови зони проведення досліджень і встановити просторову диференціацію агрохімічних і фізичних властивостей ґрунту між зонами продуктивності дослідного поля;
- вивчити вплив норми висіву та зони продуктивності на фактичну густоту стояння рослин кукурудзи на момент збирання врожаю;
- встановити залежність тривалості міжфазних і вегетаційного періодів кукурудзи від норми висіву та зони продуктивності поля в різні за гідротермічними умовами роки;
- дослідити вплив досліджуваних факторів на біометричні і структурно-морфологічні показники рослин гібриду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320);

- визначити урожайність і якісні показники зерна та побічної продукції кукурудзи залежно від норми висіву і зони продуктивності поля;
- встановити математичні закономірності реакції урожайності на норму висіву в різних зонах продуктивності і визначити зонально-специфічні оптимуми густоти стояння рослин;
- розрахувати економічну ефективність диференційованих норм висіву залежно від зони продуктивності поля;
- провести біоенергетичну оцінку технології вирощування кукурудзи за диференційованих норм висіву за показниками E_o , E_v , $E_{приб}$, $K_{ее}$ і $K_{ФАР}$;

Удосконалено:

- технологію вирощування кукурудзи шляхом диференціації норм висіву насіння залежно від зон продуктивності поля, виділених на основі геоінформаційного аналізу багаторічних карт урожайності та агрохімічних карт;
- методологічний підхід до оцінки ефективності норм висіву через систему біоенергетичних показників (E_o , E_v , $E_{приб}$, $K_{ее}$, $K_{ФАР}$ поряд із традиційними економічними критеріями).

Набули подальшого розвитку:

- наукові підходи до агрономічного обґрунтування диференційованого висіву насіння кукурудзи в системах точного землеробства на просторово-неоднорідних полях.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами узагальнення польових, лабораторних та аналітичних досліджень 2023–2025 років для отримання високих, стабільних та економічно вигідних урожаїв зерна кукурудзи. Обґрунтовано та рекомендовано зонально диференційовані норми висіву насіння гібриду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320): 80 тис.

насінин/га для зони високої продуктивності, 75–76 тис. насінин/га для зони середньої продуктивності та 68–70 тис. насінин/га для зони низької продуктивності поля. Результати досліджень пройшли виробничу перевірку в ТОВ «ЧІМК» (Чернігівський район, Чернігівська область) впродовж 2023–2025 рр., що підтверджено відповідними довідками про впровадження результатів досліджень (Додаток А).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є особистим дослідженням автора; схема і програма досліджень розроблені здобувачем разом із науковим керівником. Автором здійснено пошук та аналіз вітчизняних і зарубіжних наукових джерел за темою дисертаційної роботи, проведено польові та лабораторні дослідження, фенологічні й біометричні спостереження, виконано геоінформаційний аналіз із виділення зон продуктивності, проаналізовано та узагальнено експериментальні дані, сформульовано висновки і рекомендації виробництву, опубліковано наукові статті за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Впродовж 2023-2025 рр. основні матеріали, положення та проміжні результати наукових досліджень доповідались на засіданнях кафедри рослинництва Національного університету біоресурсів і природокористування України та науково-практичних конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Продовольча безпека України. Збереження та відновлення ґрунтових і рослинних ресурсів» (м. Київ, 22-23 травня 2025 року); II Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих вчених і спеціалістів «Вклад наукових інвестицій у розвиток агропромислового комплексу в умовах обмеженого ресурсного забезпечення» (Дніпро, 04 квітня 2025 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Післявоєнне відновлення рослинних ресурсів та екологічна безпека країни. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу» (м. Київ, 25 трав. 2023 р.).

Публікації. За результатами наукових досліджень, які відображені у дисертаційній роботі, опубліковано 4 наукових праць, в тому числі: 4 статті у вітчизняних наукових фахових виданнях та 4 тез конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, 5 розділів, висновків, рекомендацій виробництву, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 39 таблиць, 45 рисунків та додатків. У дисертації список використаних літературних джерел налічує 200 найменувань, у тому числі 180 – латиницею та 18 – кирилицею, з яких 6 посилань на електронні ресурси.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ БІОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ ТА НАУКОВІ ОСНОВИ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ВИСІВУ НАСІННЯ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

1.1. Концепція біоенергетичної ефективності та її роль у формуванні енергозберігаючих технологій

Чому виник інтерес до енергетичного аналізу агротехнологій? Відповідь простіша, ніж здається. Нафтова криза 1973 року і ембарго країн ОПЕК спричинили різке зростання цін на паливо і поставили під сумнів стійкість «зеленої революції», яка, попри зовнішній тріумф агрономічної науки, насправді трималася на дешевій викопній енергії. Урожайність зростала, але разом із нею зростала і залежність від пального, мінеральних добрив, пестицидів та важкої техніки – тобто від різних форм перетвореної енергії. Саме тоді Pimentel із колегами опублікували роботу, що стала класикою галузі. Вони розраховали енергетичний баланс виробництва кукурудзи і показали, що на кожную витрачену одиницю енергії система повертає близько 2,8 одиниць у вигляді продовольства. Водночас вони поставили принципове запитання: що станеться, якщо вартість енергоносіїв зросте вдвічі і більше? Вся економіка виробництва перебудовується – і це не лише фінансова вразливість, а структурна залежність від ресурсу, доступність якого не є гарантованою (Pimentel et al., 1973).

Тут важливо зупинитися і осмислити принциповий момент. Економічний аналіз дає чітку відповідь на питання прибутковості, однак прибутковість є функцією цін, а ціни на енергоносії, як показав 1973 рік, здатні змінитися за лічені тижні. Технологія, яка була рентабельною вчора, може стати збитковою завтра не через агрономічні причини, а через зміну кон'юнктури паливного ринку. Саме це обумовило потребу в більш стабільному вимірнику ефективності. Таким вимірником стала енергія. Це не означало відмови від

фінансового аналізу – до нього просто додали ще один аналітичний зріз: співвідношення вкладеної і отриманої енергії.

Hülsbergen із співавторами (Hülsbergen et al., 2001) у тривалому польовому досліді продемонстрували, як ця логіка реалізується на практиці. Вони запровадили систему показників – вхід і вихід енергії, чистий енергетичний вихід, енергоємність продукції, співвідношення виходу до входу – і простежили їхню динаміку впродовж 32 років залежно від системи удобрення. Виявилося, що озима пшениця за помірного удобрення підвищила чистий енергетичний вихід на 86% за понад два десятиліття, тоді як енергоємність продукції знизилася на 45%. Тобто та сама культура на тому самому полі стала енергетично ефективнішою – не внаслідок дворазового зростання врожайності, а завдяки раціональнішому використанню ресурсів. Пізніше ці ідеї були узагальнені у монографії «Food, Energy, and Society» (Pimentel & Pimentel, 2008). Сучасне землеробство неможливо адекватно оцінити лише через економічні показники, оскільки вони є функцією цін, що змінюються. Енергія є більш стабільною одиницею для порівняння технологій між собою та між країнами.

Згодом інтерес до цієї проблематики дещо послабився – нафта знову подешевшала, агрохімія стала рутиною, а мінеральні добрива перетворилися на просту статтю витрат. Однак нині інтерес повернувся з нових причин: зміна клімату, вуглецевий слід, залежність від імпортного природного газу для синтезу азотних добрив, енергетичні санкції та волатильність ринків. Martin із співавторами (Martin et al., 2020) у методологічному огляді прямо зазначають, що енергія одночасно є стратегічним компонентом економіки і термодинамічною змінною для опису екосистем. Саме тому енергетичний аналіз знову актуальний як «спільна мова» між економічною і екологічною оцінкою агротехнологій.

Необхідно також окреслити місце біоенергетичного аналізу серед суміжних інструментів оцінки. Оцінка життєвого циклу (LCA – life cycle assessment) є ширшим підходом, що охоплює не лише енергію, а й емісії

парникових газів, токсичність, вплив на водойми, землекористування та ресурсне виснаження. Біоенергетичний аналіз фокусується вужче – на співвідношенні вкладеної і отриманої енергії. Це різні інструменти для різних аналітичних завдань, і жоден із них не замінює економічного аналізу – вони взаємно доповнюють одне одного (Martin et al., 2020). Konieczna із співавторами (Konieczna et al., 2021) ілюструють цю логіку на практичному матеріалі. У дослідженні тринадцяти польських ферм, що вирощують силосну кукурудзу, вони розрахували енергетичну ефективність різних технологій і показали, що найбільший вплив на підсумковий коефіцієнт енергетичної ефективності мають два чинники – добрива і пальне. Тобто саме ті складові, які безпосередньо не спостерігаються у полі, але формують більшу частину енергетичного «рюкзаку» вирощування.

Більша частина енерговитрат у сучасному рослинництві є прихованою – вона не виникає безпосередньо в полі. Паризька дослідницька група (Paris et al., 2022) у великому огляді по відкритому полю ЄС навела конкретну структуру: виробництво добрив формує близько 50% усіх енерговитрат, витрати дизельного пального – 31%, насіння і пестициди – 5%, решта (зрошення, зберігання, сушіння) – близько 8%. Тобто більше половини енергетичного навантаження технології виникає ще до того, як техніка виїхала в поле. Якщо оцінювати технологію лише за витратами дизельного пального на гектар, залишається невидимою більш ніж дві третини реальної енергетичної картини.

Важливою є також різниця між прямою і непрямою енергією. Пряма енергія – це паливо, електроенергія і тепло, що безпосередньо витрачаються у виробничому процесі. Непряма – це енергія, «вбудована» у ресурси: у тонну азотних добрив, у літр гербіциду, у кілограм насіння. У більшості досліджень з кукурудзи непряма енергія формує 60–65% від загальних витрат (Moitzi et al., 2021) – тобто переважну частину енергетичного навантаження технології.

Таким чином, біоенергетичний аналіз виник не як академічна мода чи термінологічне нововведення, а як практична відповідь на конкретне питання:

наскільки стійкою є технологія, якщо ресурс, на якому вона базується, починає дорожчати або зникати? Це питання є актуальним і нині – більшою мірою, ніж у 1973 році, оскільки до нього додалися кліматичні зобов'язання, геополітичні ризики енергетичної залежності та необхідність обґрунтовувати агрономічні рішення не лише економічною ефективністю, а й ширшою системою показників сталості виробництва.

Перш ніж рахувати, потрібно домовитись про термінологію. Це, мабуть, найбільша практична проблема в енергетичному аналізі. Різні автори використовують схожі поняття з різними назвами, а іноді однакові назви – з різним змістом. Тому перед тим, як перейти до результатів, варто чітко визначити, що саме ми маємо на увазі під кожним показником і як ці поняття співвідносяться з методикою, прийнятою в цій роботі. Будь-який енергетичний баланс – це зіставлення двох величин: скільки енергії вкладено у виробництво і скільки енергії отримано у продукті. Звучить просто. Але деталі, як завжди, мають значення.

Перша величина – це антропогенні енерговитрати (E_o , ГДж/га). Це вся енергія, яку людина цілеспрямовано вкладає у вирощування культури. А саме, паливо для техніки, мінеральні добрива, засоби захисту рослин, насіння, амортизація техніки, жива праця. Hülsbergen et al. (2001), які одними з перших систематизували методику енергетичного балансу для польових культур, включали до цього показника саме такий перелік складових. Hossein et al. (2024) у дослідженні кукурудзи в Ірані дотримуються схожого підходу, додатково виокремлюючи витрати на сушіння зерна як окрему статтю. Це важливо, бо сушіння може формувати значну частку загального балансу залежно від вологості збирання. Ключова особливість показника E_o у контексті диференційованого землеробства полягає ось у чому. Якщо норма висіву змінюється між зонами продуктивності поля, E_o теж змінюється, але не пропорційно і не лінійно. Витрати на насіння зростають зі збільшенням норми висіву, однак усі інші статті залишаються практично незмінними. Це означає, що енергетична «вартість» підвищення норми висіву відносно невелика, і вся

увага зосереджується на тому, чи дає ця додаткова енергія приріст урожаю. У зонах з різним ресурсним потенціалом відповідь на це питання різна. Важлива деталь стосується структури E_o . Більша частина антропогенної енергії є непрямою. Вона не спалюється безпосередньо в полі, а «вбудована» у ресурси заздалегідь. Тонна аміачної селітри несе в собі значний енергетичний еквівалент. Наприклад, енергію, витрачену на синтез аміаку, грануляцію, пакування, транспортування. Те саме стосується гербіцидів, фунгіцидів, насіння. Kosemani & Bamgboye (2021) для кукурудзи в Нігерії показали, що непряма енергія становила 63,56% від загальних витрат, тоді як пряма – лише 36,44%. Moitzi et al. (2021) у шестирічному досліді в Паннонському регіоні отримали схожу ситуацію. Непряма енергія становила 60–64% залежно від системи обробітку. Це означає, що рішення щодо системи удобрення впливає на E_o набагато сильніше, ніж, наприклад, вибір між більш або менш економічним трактором.

Друга величина – це енергія, акумульована в урожаї (E_v , ГДж/га). Це теплотворна здатність продукції, помножена на її кількість з гектара. Для кукурудзи на зерно E_v розраховується як сума енергії основної продукції (зерна) і побічної (стеблостою, якщо остання також враховується у балансі). Саме E_v є тим показником, який найсильніше реагує на зміну норми висіву залежно від зони продуктивності. У зоні з високим ресурсним потенціалом збільшення густоти стояння рослин супроводжується приростом урожаю і, відповідно, зростанням E_v . У зоні з обмеженим ресурсним забезпеченням та сама норма висіву може давати зворотний ефект. Конкуренція між рослинами посилюється, урожайність падає, і E_v знижується попри формально однаковий або навіть більший E_o . Це і є енергетичне обґрунтування принципу диференційованого висіву. Jankowski et al. (2020) у тривалому польовому досліді по кукурудзі зафіксували, що енергетичний вихід біомаси коливався від 197 до 290 ГДж/га залежно від року і варіанту технології. І це лише між роками, без урахування просторової варіабельності поля.

Центральний показник аналізу – коефіцієнт енергетичної ефективності (Kee). Він розраховується як відношення енергії урожаю до антропогенних енерговитрат: $Kee = E_v / E_o$

Тобто скільки одиниць енергії ми отримуємо на кожну витрачену антропогенну одиницю. У літературі цей показник зустрічається під різними назвами – energy use efficiency, energy ratio, output/input ratio, але суть одна (Hülsbergen et al., 2001; Hossein et al., 2024; Kosemani & Bamgboye, 2021). Пряме порівняння числових значень Kee між різними дослідженнями потребує обережності. Результат залежить від того, що саме включено до E_o і як розраховується E_v . Наприклад, Hossein et al. (2024) для кукурудзи отримали $Kee = 4,41$, тоді як Kosemani & Bamgboye (2021) – лише 2,46. Різниця майже двократна, але пояснюється вона насамперед різними методичними підходами і різним складом статей витрат. У цій роботі прийнята така шкала оцінки Kee: значення менше 4 характеризує технологію як неефективну; 4-6 – середньоєфективну; 6-8 – високоефективну; понад 8 – дуже високоефективну з точки зору використання антропогенної енергії. Ця шкала дозволяє не лише зафіксувати абсолютне значення показника, а й змістовно інтерпретувати різницю між зонами продуктивності та варіантами норм висіву. Саме тут криється аналітичний потенціал Kee для задачі диференціації. Якщо в різних зонах поля Kee суттєво відрізняється при однаковій нормі висіву – це сигнал, що ресурсний потенціал зони не відповідає застосованій технології. І навпаки: якщо варіювання норми висіву всередині однієї зони змінює Kee – ми бачимо енергетичний «відгук» посіву на густоту стояння. Саме такий підхід дозволяє обґрунтувати оптимальну норму не лише через урожайність і прибуток, а й через ефективність використання вкладеної антропогенної енергії.

Різниця між E_v і E_o – це енергетичний прибуток ($E_{пріб} = E_v - E_o$, ГДж/га). Він показує абсолютну величину «чистої» енергії, отриманої з гектара понад витрачену. У літературі цей показник також зустрічається як net energy gain або net energy output. Hülsbergen et al. (2001) показали, що озима пшениця за помірного удобрення підвищила net energy output на 86% за двадцять з

лишком років. І це без зміни площі, лише за рахунок оптимізації системи живлення. Для аналізу диференційованого висіву Еприб важливий з іншої причини. Кее – це відносний показник. Він може бути однаковим при дуже різних абсолютних значеннях E_v і E_o . Еприб же відображає реальний «енергетичний виграш» з гектара. Зона з вищим ресурсним потенціалом, де реалізується більша урожайність, природно дає і більший Еприб. Навіть якщо Кее не є найвищим серед усіх варіантів. Тому обидва показники доцільно розглядати у комплексі.

Окрім Кее і Еприб, в аналізі використовують ще кілька похідних показників, кожен з яких відповідає на своє конкретне питання. Енергетична продуктивність (*energy productivity*) – кількість продукції, отриманої на одиницю витраченої антропогенної енергії, у кг/МДж або т/ГДж. Зручна для порівняння між культурами або варіантами технологій у натуральних одиницях. Питома енергомісткість (*specific energy*) – зворотний показник, вказує, скільки МДж або ГДж витрачається на виробництво одного кілограма або тонни продукції. Hossein et al. (2024) для кукурудзи отримали 4,88 МДж/кг. Цей показник особливо чутливий до варіантів норм висіву. Якщо в певній зоні збільшення густоти дає менший приріст урожаю, ніж зростання витрат на насіння, питома енергомісткість зростає і технологія стає «важчою». Енергоємність (*energy intensity*) – енергія, витрачена на одиницю площі або на зерновий еквівалент. Hülsbergen et al. (2001) відстежували цей показник у тривалому досліді і встановили, що за двадцять з лишком років *energy intensity* знизилась на 45%. При тому, що урожайність зросла лише на 59%. Тобто ефективність використання ресурсів зростала швидше, ніж сам урожай. Hulmani et al. (2022) у дослідженні зимової кукурудзи в Індії зафіксували принципово важливу закономірність. Максимальна урожайність і максимальний Кее не збіглися. Вищий рівень удобрення давав більший E_v , але *energy productivity* і Кее були вищими при помірному рівні добрив. Схожа логіка цілком застосовна і до норми висіву. Певна густина може давати

найвищу урожайність, але не найвищу енергетичну ефективність, особливо якщо ресурсний потенціал зони обмежений.

Окремо варто згадати показник, який виходить за межі суто антропогенного балансу, а саме коефіцієнт використання фотосинтетично активної радіації (КФАР, %). На відміну від K_{ee} , який оцінює ефективність витраченої людиною енергії, КФАР показує, наскільки ефективно посів перетворює сонячну енергію в біомасу. Ці два показники відповідають на різні питання і разом дають ширше розуміння, відповідаючи на питання: «де обмеження, в антропогенних ресурсах чи у самому фотосинтетичному потенціалі посіву?». З точки зору диференційованого висіву КФАР може слугувати додатковим індикатором відповідності густоти стояння умовам конкретної зони. Занадто рідкий посів залишає частину ФАР невикористаною через недостатнє покриття ґрунту. Надмірне загушення може знижувати ефективність кожної окремої рослини, навіть якщо загальне перехоплення ФАР зростає. Оптимальна норма висіву – це та, при якій обидва показники, і K_{ee} , і КФАР, наближаються до свого максимуму одночасно.

Перше і найважливіше рішення в будь-якому енергетичному аналізі – де провести межу системи. Що саме ми включаємо до E_o ? Лише те, що фізично відбувається на полі, тобто витрати пального на обробіток, сівбу, захист, збирання? Чи ще й енергію, витрачену на виробництво добрив на хімічному заводі, синтез пестицидів, виготовлення насіння, виробництво техніки? А сушіння і зберігання зерна після збирання? Martin et al. (2020) у великому методологічному огляді підкреслюють відсутність чіткого визначення меж системи. Дослідження, що враховують лише польові операції, і дослідження, що включають повний ланцюг від виробництва ресурсів до воріт господарства (cradle to farm gate), отримують принципово різні значення E_o і, відповідно, різні K_{ee} . Hülsbergen et al. (2001) чітко розмежовують прямі витрати (паливо, електроенергія, праця) і непрямі (добрива, пестициди, насіння, знос техніки) саме для того, щоб зробити межі системи прозорими і відтворюваними. Підхід cradle to farm gate, добре показаний у LCA-дослідженні кукурудзи Hossein et

al. (2024), охоплює всі входи до моменту виробництва однієї тонни зерна і дозволяє побачити повну енергетичну ситуацію, включно з тим, що відбувається за межами поля. Саме тому некоректно порівнювати К_е між дослідженнями, не з'ясувавши попередньо, які межі системи прийняті у кожному з них. Для задачі диференційованого висіву це питання меж має і конкретний практичний вимір. Якщо сушіння включено до Е_о, варіанти з вищою вологістю зерна при збиранні автоматично отримують більші витрати, навіть при однаковій урожайності. А вологість збирання, як відомо, може різнитися між зонами продуктивності через відмінності у строках досягання. Тому рішення про включення або виключення сушіння – це не технічна дрібниця, а методичний вибір, що впливає на порівнянність варіантів.

Друге ключове рішення – які енергетичні еквіваленти використовувати для перерахунку фізичних ресурсів в енергетичні одиниці. Це питання теж не таке однозначне, як здається. Азотні добрива – це найбільша стаття непрямих витрат у більшості досліджень. Вони оцінюються по-різному залежно від джерела і методики. Для різних форм азоту значення варіюють у широкому діапазоні. Jankowski et al. (2020) у польському досліді зафіксували, що мінеральне удобрення формувало 72–73% від загального Е_о. Саме через це вибір еквівалента для азоту суттєво впливає на підсумковий К_е. Насіння кукурудзи, особливо гібридне, також має відносно високий енергетичний еквівалент через енергоємність процесу виробництва. Батьківські лінії, контрольоване запилення, кондиціонування, обробка – все це накопичується в еквіваленті на кілограм (Hosseini et al., 2024). Для варіантів із різними нормами висіву ця стаття є якраз тією, що і відрізняє варіанти між собою, тому точність її оцінки особливо важлива. Загальний висновок тут простий – зміна енергетичного еквівалента навіть для однієї статті витрат може помітно зрушити підсумковий К_е. Саме тому у методичному розділі важливо чітко фіксувати всі прийняті еквіваленти.

Третє рішення – що включати до Е_в. Для кукурудзи на зерно питання формулюється так: чи рахувати лише зерно, чи ще й соломі і стеблостій? Якщо

побічна продукція залишається на полі, то аргументів для її включення менше. Якщо збирається і використовується, то вона реально несе в собі енергію і має бути врахована. Martin et al. (2020) зазначають, що включення внутрішніх біомасових потоків, зокрема пожнивних решток, суттєво змінює підсумкову енергетичну ефективність і переводить аналіз із суто «секторального» у системний. Для задачі диференційованого висіву це питання теж не нейтральне. Різні норми висіву дають різне співвідношення зерна і вегетативної маси. Якщо побічна продукція врахована, варіанти з більшою вегетативною масою отримують «бонус» до Ев. Це слід мати на увазі при інтерпретації результатів. Варто чесно сказати про те, чого біоенергетичний аналіз не вміє. Він добре вимірює «енергетичну віддачу» технології, але не описує її екологічних наслідків у повному обсязі. Два варіанти технології з однаковим К_е можуть суттєво відрізнитися за вуглецевим слідом, впливом на водойми, ризиком ерозії. Для цього потрібний LCA – ширший інструмент, що охоплює весь спектр екологічних категорій впливу. Holka & Bieńkowski (2020) у дослідженні різних систем обробітку ґрунту під кукурудзою показали, що скорочення витрат пального (позитивне з енергетичної точки зору) не завжди означає зменшення вуглецевого сліду. Через зміни в емісіях ґрунту та секвестрацію вуглецю. А Martin et al. (2020) прямо вказують, що енергетичний аналіз і LCA відповідають на різні питання і мають розглядатися як взаємодоповнюючі, а не конкуруючі підходи. У цій роботі методологія розрахунку Е_о, Е_в і К_е детально описана у другому розділі. Тут важливо лише зафіксувати головне – результати біоенергетичного аналізу завжди є функцією прийнятих методичних рішень. Саме тому у подальшому порівнянні варіантів норм висіву між зонами продуктивності всі розрахунки виконані за єдиною методикою, що забезпечує внутрішню порівнянність результатів.

Кукурудза – культура особлива з точки зору енергетики. Не в тому сенсі, що вона якась унікальна біологічно, а в тому, що вона акумулює в собі майже всі чинники, які роблять біоенергетичний аналіз справді необхідним. Висока потреба в азотних добривах, значні витрати пального на обробіток і збирання,

дороге гібридне насіння з енергоємним виробництвом, і, що особливо важливо для нашої теми, часто значні витрати на сушіння зерна, що прямо залежать від норми висіву та умов зони продуктивності. Paris et al. (2022) у великому огляді по ЄС показали, що виробництво добрив формує близько 50% усіх енерговитрат у відкритому полі, дизельне паливо – 31%, насіння і пестициди – 5%. Кукурудза в цьому відношенні типовий представник інтенсивного рільництва, де кожна з цих статей виражена максимально. Moitzi et al. (2021) у шестирічному польовому досліді в Паннонському регіоні зафіксували таку структуру витрат: добрива становили 36% загальних енерговитрат, а сушіння зерна – близько 22%. Разом це майже 60% Ео, і жодна з цих статей не пов'язана з обробітком ґрунту чи іншими польовими операціями безпосередньо. При цьому No-tillage система показала найвищу енергетичну ефективність саме за рахунок скорочення витрат пального, тоді як добрива і сушіння залишалися стабільними незалежно від системи обробітку. Ці дані добре ілюструють, де насправді «живе» основна частина Ео у кукурудзяному виробництві. Kosemani & Bamgbaye (2021) змоделювали структуру витрат для кукурудзи в Нігерії і отримали дещо іншу ситуацію. Добрива – 45,36%, паливо – 35,90%, техніка – 10,72%, насіння – 3,61%, гербіциди – 3,88%, жива праця – 0,53%. Підсумковий Кее склав лише 2,46. За прийнятою у цій роботі шкалою це відповідає неефективній технології. Але тут важливо не поспішати з висновками. Низький Кее в нігерійському випадку пояснюється насамперед значною часткою палива і техніки у структурі витрат за відносно невисокої урожайності, а не якимось принциповим недоліком самої кукурудзи як культури. Hossein et al. (2024) у LCA-дослідженні кукурудзи отримали значно кращий результат. Кее – 4,41, енергетична продуктивність – 0,20 кг/МДж, питома енергомісткість – 4,88 МДж/кг. При цьому частка непоновлюваної енергії становила 83,97% від загального Ео. Прямі витрати формували 61,59% Ео, непрямі – 38,41%, що дещо відрізняється від паннонського і нігерійського прикладів і знову підкреслює, що структура витрат суттєво залежить від регіональної специфіки технології. Jankowski et al. (2020) у тривалому

польському досліді з вирощування кукурудзи на біогаз зафіксували загальні енерговитрати на рівні 24,4–25,5 ГДж/га, вихід енергії біомаси – від 197 до 290 ГДж/га, а К_е – у діапазоні 7,7–11,3 залежно від року. Це вже категорія дуже високої ефективності. Але тут принципово інша функціональна одиниця, тобто вся надземна біомаса, а не лише зерно. І саме тому ці цифри не можна напряду порівнювати з результатами зернових досліджень – це ще один наочний приклад того, як методичні рішення формують підсумковий К_е.

Прямих якісних досліджень К_е зернової кукурудзи в умовах України порівняно небагато. Bazaluk et al. (2021) провели енергетичну оцінку вирощування сорго в умовах Південної України і показали, що культура може бути перспективною для посушливих регіонів саме через нижчі вимоги до водних ресурсів порівняно з кукурудзою. Це не кукурудза, але методично цінне джерело. Воно демонструє, що енергетичний аналіз польових культур в умовах України є і виконуваним, і інформативним. Vogomaz et al. (2025) розглядали вплив густоти стояння рослин і удобрення на урожайність і елементи структури гібридів кукурудзи для біопаливного напряду в Україні. Вони показали, що при густоті 60–80 тис. рослин/га і комплексному мікроелементному удобренні на фоні N100P31 спостерігалися достовірні прирости урожайності від 40 до 47% залежно від гібриду. Зміна густоти стояння змінює не лише урожайність, а й всю енергетичну арифметику: і Е_в через приріст продукції, і Е_о через зміну витрат на насіння, і побічно через вологість зерна при збиранні. І ось тут ми підходимо до ключової ідеї цього розділу. Норма висіву сама по собі не найбільша стаття Е_о. Витрати на насіння кукурудзи у більшості досліджень не перевищують 3–5% від загального Е_о (Kosemani & Bamgboye, 2021; Paris et al., 2022). Норма висіву – це важіль, який одночасно торкається кількох ключових змінних. По-перше, вона визначає урожайність, а отже і Е_в. По-друге, через урожайність і динаміку досягання вона впливає на вологість зерна при збиранні, а вологість – на витрати на сушіння, які у структурі Е_о можуть сягати 22% (Moitzi et al., 2021). По-третє, через густоту стояння норма висіву впливає на ефективність використання

внесених добрив. У зоні з обмеженим ресурсним потенціалом надмірна кількість рослин посилює конкуренцію, знижує засвоєння азоту кожною рослиною і зменшує енергетичну «віддачу» від найбільшої статті E_0 . Це означає, що в умовах просторово-варіабельного поля, де різні зони суттєво відрізняються за ресурсним потенціалом, єдина фіксована норма висіву не може бути оптимальною одночасно для всіх зон ні з точки зору урожайності, ні з точки зору K_{ee} . Високопродуктивна зона може ефективно засвоїти збільшену густоту, конвертуючи додаткові ресурси у приріст E_v . Низькопродуктивна зона при тій самій нормі витрачає E_0 на насіння, але не отримує відповідного приросту $E_v - K_{ee}$ падає. Середньопродуктивна зона, як правило, найбільш чутлива до відхилення від оптимуму в обидва боки. Саме цю логіку і покликаний перевірити цей дослід. Оцінювати норму висіву лише через урожайність і прибуток недостатньо. Ці показники залежать від поточних цін і не відображають структурної ефективності технології. Біоенергетичний аналіз дозволяє поставити питання інакше: «яка норма висіву в кожній зоні продуктивності забезпечує найкраще перетворення антропогенної енергії у врожай».

1.2. Біологічні основи та агрономічні аспекти формування продуктивності кукурудзи залежно від норми висіву та густоти стояння рослин.

Кукурудза — культура з принципово іншою архітектурою продуктивності, ніж більшість зернових. Це треба розуміти на самому початку, бо саме звідси випливає вся логіка управління густотою.

У пшениці чи ячменю недостатня кількість рослин частково компенсується кущінням. Одна рослина здатна сформувати кілька продуктивних стебел і таким чином добрати втрачену площу живлення. Кукурудза цього не вміє. Точніше вміє, але у дуже обмеженому обсязі. Вона моностебельна, і кожна рослина, як правило, формує один основний качан. Саме тому кількість рослин на гектарі прямо і майже без компенсації визначає

потенціал урожаю. Скільки рослин – стільки качанів, скільки качанів – такий і урожай (D'Andrea et al., 2022; Beyrer et al., 2021). Це і є причина, чому норма висіву в кукурудзі – не просто технічний параметр, а стратегічне агрономічне рішення. Але є і зворотна сторона. Зі збільшенням кількості рослин на одиниці площі неминуче зростає внутрішньовидова конкуренція. Рослини починають ділити між собою світло, воду, азот і простір кореневої системи, і на кожную з них дістається менше (Beyrer et al., 2021). У посівах із невисокою забезпеченістю ресурсами це відчувається раніше і різкіше. У добре забезпечених умовах – пізніше і м'якше. Але межа є завжди. Особливо критичним є період навколо цвітіння. Саме тут вирішується, скільки зерен буде закладено в качані. D'Andrea et al. (2022) детально показали механізм. Якщо в цей час рослина відчуває дефіцит асимілянтів або азоту – через надмірну конкуренцію з сусідами – знижується ріст качана, погіршується синхронність між викиданням пилку і появою приймочок, і в підсумку частина зав'язей не запилюється або абортуються. Результат видно безпосередньо в структурі урожаю. Коротший качан, менше зерен, більший «лисий» кінець. Звідси головна теза, яка пронизує всю логіку роботи з густотою: збільшення кількості рослин корисне лише до певної межі. До цієї межі додаткові рослини дають приріст урожаю з площі. Після неї вони створюють більший стрес для кожної окремої рослини, ніж той приріст продуктивної площі, який вони забезпечують (Beyrer et al., 2021; Yin et al., 2025). Де саме ця межа – залежить від гібриду, року, ґрунту, забезпечення азотом і водою. І саме тому вона не може бути однаковою для різних зон продуктивності одного поля.

Реакція структури врожаю кукурудзи на підвищення густоти – одна з найбільш документованих закономірностей в агрономії. І вона досить передбачувана, хоча її масштаб суттєво варіює між гібридами і умовами. Типова ситуація виглядає так. Зі збільшенням кількості рослин на гектарі зменшуються довжина качана, кількість зерен у качані, маса зерна з качана і маса 1000 зерен. Mandic et al. (2024) у трирічному досліді з чотирма густотами (від 50 до 79 тис. рослин/га) підтвердили цю закономірність чітко. Найнижчі

показники довжини качана, кількості зерен і маси 1000 зерен були зафіксовані саме при максимальній густоті. Xu et al. (2023) отримали схожу ситуацію і додали важливий морфологічний аспект. Зі збільшенням густоти зростала висота прикріплення качана і зменшувалась механічна міцність стебла. Обидва чинники підвищують ризик вилягання. Зниження індивідуальної продуктивності рослини ще не означає зниження урожайності з площі. До певної межі компенсація через збільшення кількості рослин працює. Навіть якщо кожна рослина формує менший качан, їх більше на гектарі, і сумарна врожайність зростає. Mandić et al. (2024) підтвердили саме це. При максимальній густоті урожайність з площі була найвищою попри найнижчі показники окремих структурних елементів. Компенсація через кількість рослин перекривала втрати індивідуальної продуктивності. Але є і поріг. Надмірна густота вже не компенсує. Крива урожаю набуває параболічного характеру, тобто спочатку зростає, потім стабілізується і починає знижуватись. Xu et al. (2023) зафіксували саме таку динаміку. При густоті 75–82,5 тис. рослин/га урожайність була найвищою, а при подальшому загущенні до 97,5 тис. – найнижчою. Окремо варто сказати про фізіологію наливу зерна. Yang et al. (2024) показали, що при збільшенні густоти знижується теоретична максимальна маса 100 зерен, максимальна і середня швидкість наливу, а також суха речовина рослини після запилення. Пік швидкості наливу наставав приблизно на 22-й день після запилення незалежно від густоти, але при загущенні він був нижчим за амплітудою. Тобто рослини «намагаються» налити зерно в той самий термін, але із меншою інтенсивністю. Zhu et al. (2021) деталізували ще один аспект. Зерна у різних позиціях качана неоднаково чутливі до густоти. Верхні зерна, ті, що формуються останніми, є найбільш вразливими. Вони мають нижчу швидкість наливу, менший кінцевий розмір і швидше зневоднюються після фізіологічної стиглості. При загущенні саме верхня частина качана «страждає» найбільше. Звідси і характерний «лисий» кінець при високих густотах у стресових умовах.

Для задачі диференційованого висіву ця закономірність має пряме практичне значення. У зоні з обмеженим ресурсним потенціалом поля завищена норма висіву прискорює перехід через оптимум. Компенсація через кількість рослин вичерпується раніше, а втрати індивідуальної продуктивності стають більш виразними. У зоні з високим потенціалом оптимум зміщується праворуч, тобто вища густота ще залишається в зоні приросту врожайності.

Важливо розуміти, що дані навіть двадцятирічної давнини про «оптимальну густоту» сьогодні можуть бути неактуальними. Сучасні гібриди – це інші рослини з точки зору реакції на загушення. Що саме змінилося? По-перше, архітектура розміщення листків. Сучасні гібриди мають більш вертикальне розташування листків, що зменшує взаємне затінення при загущенні і дозволяє ефективніше використовувати ФАР навіть у щільних посівах (Xu et al., 2024). По-друге, *stay-green* – здатність підтримувати активний фотосинтез після цвітіння довше, ніж це роблять «звичайні» лінії. Chibane et al. (2024) показали, що *stay-green* збільшує масу зерна і вміст сухої речовини, затримуючи старіння листків, але важливо, що цей ефект залежить від фону середовища. У стресових умовах *stay-green* все одно «спрацьовує», але його вклад у кінцеву урожайність менший. Тобто це не «магічна» ознака, яка знімає будь-які обмеження густоти, а властивість, що розширює толерантний діапазон за сприятливих умов. По-третє, міцніше стебло – це ознака, яка безпосередньо визначає стійкість до вилягання при загущенні. Shah et al. (2021) у великому огляді виокремили дві головні проблеми інтенсивних посівів: вилягання стебел і абортів зерен. Обидві пов'язані з єдиним механізмом – конкуренцією за вуглеводи між вегетативними і генеративними органами при загущенні. Рослина, яка змушена витратити більше ресурсів на підтримання довгого та тонкого стебла в тіні сусідів, має менше асимілянтів для наливу зерна. Kunduru et al. (2025) розробили детальну фенотипову базу для характеристики стійкості стебла до вилягання. І це саме по собі свідчить, що проблема залишається актуальною навіть для сучасної селекції. Lei et al. (2025) у метааналізі 1974 польових дослідів у Китаї за 2000–2023 роки

показали: підвищення густоти до оптимального рівня, в середньому на 49% вище за поточну фермерську практику, дає приріст урожайності 16,28%. Але цей ефект реалізується лише в комбінації з регіонально адаптованими агрозаходами, такими як точне зрошення, обробіток ґрунту і регулятори росту. Якщо підвищувати густоту ізольовано, без підтримки інших факторів, приросту немає або він мінімальний. Xu et al. (2024) підтвердили це в польовому досліді. Обприскування регулятором росту на стадії 15 листка при густоті 90 тис./га підвищило урожайність на 5,62% порівняно з контролем через оптимізацію архітектури намету, зниження абортів і затримку старіння листків. Практичний висновок із цього блоку для задачі диференційованого висіву – сучасні гібриди розширили діапазон допустимих густот, але не скасували принцип залежності оптимуму від умов зони. Навпаки, висока генетична толерантність до загушення означає, що у зонах з хорошим ресурсним потенціалом варто пробувати вищі норми. Але у зонах з обмеженими ресурсами навіть толерантний гібрид матиме нижчий оптимум густоти.

Якщо в попередньому блоці йшлося про генетичні можливості рослини, то тут – про те, що дозволяє або обмежує ці можливості ззовні. Принцип *resource capture* формулюється просто: рослина може ефективно використати більшу площу живлення лише тоді, коли ресурси для цього є. Yin et al. (2025) у метааналізі чітко показали, що збільшення густоти до 75–90 тис. рослин/га підвищує врожайність на 13,3%, WUE на 16,7%, і IWP на 16,7%, але найбільший ефект спостерігається на суглинних і пілуватих ґрунтах в умовах сухого напівгумідного клімату. Тобто сама по собі висока густота ще не гарантує результату. Потрібен відповідний ресурсний фон (Yin et al., 2025). Рекомендоване поєднання для максимальної реалізації потенціалу: 75–90 тис. рослин/га, зрошення 200–400 мм, азот 200–300 кг/га, фосфор і калій від 200 кг/га. У посушливих або ресурсно обмежених умовах ситуація різко змінюється. Flynn et al. (2023) показали, що при дефіциті води навіть помірно висока доступність азоту в ґрунті може пригнічувати урожайність і ріст пагонів

у супереч інтуїтивному очікуванню. Рослина за браку води не може засвоїти азот так само ефективно, як при достатньому зволоженні, а надлишок нітратів у ґрунті посилює ризик шкідливих втрат. Тобто оптимум густоти і оптимум удобрення не можна розглядати окремо від водозабезпечення. Вони утворюють єдину систему. Lai et al. (2023) у досліді з крапельним зрошенням і різними комбінаціями густоти та азоту виявили, що оптимальне поєднання (100 тис. рослин/га і 180 кг/га азоту) забезпечило максимальну урожайність через покращення популяційного фотосинтезу і швидкості наливу зерна. Важливо, що підвищення норми азоту до 240 кг/га вже не давало додаткового ефекту – існує насичення взаємодії «густина × азот». Chen et al. (2026) підтвердили цю ідею з іншого боку. При загущенні до 90 тис. рослин/га механічні властивості стебла погіршувалися, але оптимальна норма азоту (N = 180 кг/га) частково компенсувала цей ризик через підвищення активності ензимів, відповідальних за синтез лігніну і целюлози. Тобто азот – це не лише живлення, а й фактор стійкості при загущенні. Yin et al. (2025) також показали важливий регіональний патерн. Ефект підвищення густоти найбільший у зрошуваних районах Північно-Західного Китаю і на Великій Китайській рівнині, а найменший – у гірських і південних районах з обмеженою сонячною радіацією. Це знову повертає нас до ідеї, що оптимальна густина завжди є функцією конкретного агроекологічного середовища.

Практичний висновок для диференційованого підходу – не існує «середньої норми», яка однаково добре спрацює на полі з різними зонами продуктивності. Зона з вищим рівнем природного зволоження, кращою структурою ґрунту і більшим запасом доступного азоту може реалізувати потенціал вищої густоти. Зона з дефіцитом цих ресурсів не може, і спроба застосувати ту саму норму призведе лише до посилення стресу і зниження ефективності кожної рослини.

Українські дослідження загалом підтверджують ті самі закономірності, що і світова література. Але є важливі регіональні нюанси, які не можна просто перенести з китайського метааналізу чи паннонського досліді. Для умов

Лісостепу Shakalii et al. (2024) дослідили реакцію гібридів різних FAO-груп на строки сівби і густоту стояння на Полтавщині. Вони показали, що оптимальний строк сівби – третя декада квітня, і реакція на густоту суттєво залежала від FAO-групи. Ранньостиглі гібриди поведилися інакше, ніж пізньостиглі. Максимальна реалізація потенціалу спостерігалась при різних поєднаннях строків і густот. Не тільки зона продуктивності поля, а й генетика гібриду визначає, яка норма висіву є оптимальною. Для умов Північного Степу AksyoNov & Kotchenko (2024) провели дослід із п'ятьма середньоранніми гібридами при густотах 40, 60 і 80 тис. рослин/га в аридних умовах. Результати виявилися показово різними: гібрид SY Rotango взагалі не реагував приростом урожаю на підвищення густоти. Гібриди DB Khotyn, SY Scorpius і SY Chorintos мали максимум при 60 тис. рослин/га. Тільки Adevey демонстрував параболічну реакцію з максимумом при 80 тис./га. Тобто в степових умовах оптимум густоти – 60-80 тис. рослин/га, і він різний для різних гібридів навіть у межах одного регіону. Для умов Західного Лісостепу Bomba et al. (2025) дослідили два гібриди з різними групами стиглості при густотах від 70 до 90 тис. рослин/га. Ранньостиглий Почаївський 190 MB показав максимум урожайності 110,3 ц/га при 80 тис. рослин/га. Середньоранній DN Хотриця – 115,0 ц/га при 70 тис. рослин/га. Обидва гібриди при загущенні демонстрували подовження вегетаційного періоду і зниження маси зерна на рослину, але їхній оптимум по площі різнився на 10 тис. рослин/га. Це наочно ілюструє, що навіть у межах одного господарства і одного поля вибір гібриду і вибір норми висіву – взаємопов'язані рішення. Разом ці три роботи складають певну регіональну ситуацію для України, але в ній є очевидна прогалина. По-перше, даних саме для умов Чернігівського регіону Лівобережного Лісостепу в поєднанні густоти стояння і продуктивності поля практично немає. По-друге, жодне з наведених досліджень не розглядає норму висіву через призму біоенергетичного аналізу. Всі вони оцінюють урожайність і іноді економіку, але не Кее. По-третє, і це ключове для нашої роботи, жодне не розглядає диференційований висів між зонами продуктивності одного поля як

самостійний предмет дослідження. Оцінка того, як різні норми висіву в різних зонах поля відображаються не лише на врожайності, а й на К_е і КФАР, – це саме той аспект, який залишається поза увагою наявної літератури і який є центральним питанням цього дослідження.

Перш ніж говорити про те, як норма висіву впливає на К_е, варто розібратися, з чого взагалі складається Е_о у кукурудзяному виробництві і чому ця структура не є сталою. Jin et al. (2020) у дослідженні кукурудзи в штаті Делавер показали, що азотні добрива і польові операції (паливо і техніка) формують основну частину сукупного енергетичного сліду виробництва. Але конкретні пропорції суттєво залежать від регіону, рівня врожайності та інтенсивності менеджменту. Jantalia et al. (2021) підтвердили це для Бразилії. Добрива, гербіциди і паливо домінували у витратах незалежно від регіону, але кукурудза другого сезону виробляла 9,9 МДж на кожен витрачений МДж, тоді як першого – лише 8,7 МДж. Та сама культура, та сама країна, але різний К_е через різну інтенсивність і умови сезону.

Biswas et al. (2025) у дворічному польовому досліді в Індії продемонстрували, що максимальний вихід енергії і максимальна energy productivity можуть досягатися при різних режимах зрошення і живлення. Тобто оптимум за одним показником не гарантує оптимуму за іншим. Chary et al. (2025) підійшли до тієї самої ідеї з іншого боку. Заміна 25% мінерального NPK нано-ДАФ не знизилу врожайності, але зменшила споживання енергії і викиди, тобто зменшення енергоємних входів може покращити К_е без пропорційної втрати Е_в. Структура Е_о у кукурудзі визначається насамперед системою удобрення і паливними витратами, тоді як насіння – відносно мала частка. Але саме зміна норми висіву через насіння і вплив на врожайність, вологість та ефективність добрив робить її важелем з непропорційно великим ефектом на підсумковий К_е.

Е_в у кукурудзі – це не лише зерно. І це важливо розуміти, бо включення або виключення побічної продукції принципово змінює підсумковий баланс. Cantrell et al. (2014) виміряли енергетичну цінність різних фракцій рослини

методом калориметрії. Стебла виещ місця прикріплення початку мали найвищу теплотворну здатність, у середньому 18,8 МДж/кг сухої маси, а середнє по рослині – 18,28 МДж/кг. Залежно від умов вегетації і рівня біомаси, збирання надземної маси могло забезпечити від 30 до 168 ГДж/га. Тобто управління пожнивними рештками – це реальна змінна у формулі Ев, а нетехнічна деталь. Ambrosio et al.. (2017) пов'язали цю ідею безпосередньо з густотою і азотом. У їхньому досліді вужче міжряддя не змінювало врожайності зерна, але змінювало продуктивність залишкової біомаси і її біоенергетичний потенціал. Азот збільшував і врожайність зерна, і масу решток, і теплотворну здатність біомаси одночасно. Miranda et al. (2021) і García-Mateos et al. (2025) уточнили ще один аспект – різні фракції решток неоднорідні за енергетичною цінністю, і сортова належність гібриду впливає на їхні теплотехнічні характеристики. Forage-типи виявилися найбільш придатними для термальної конверсії. Ruiz et al. 2025) показали масштабну ситуацію у Кукурудзяному поясі США. За 1980–2020 роки вуглецевий вхід від решток зріс на 46%, переважно через зростання врожайності, а не площ. Тобто підвищення продуктивності автоматично збільшує потенційний Ев через рештки, але водночас ускладнює управління ними.

Для задачі диференційованого висіву це означає – зона з вищою врожайністю формує більший Ев як по зерну, так і по побічній масі. Норма висіву, яка максимізує врожайність у цій зоні, одночасно максимізує і потенційний Ев. За умови, що методика розрахунку включає обидві фракції. Liu et al. (2023) дали чітку відповідь на це питання для умов Північнокитайської рівнини. Вони порівнювали ферми з різними поєднаннями врожайності і ефективності використання азоту. ферми з високим урожаєм і високим NUE (nitrogen use efficiency, ефективність використання азоту) підвищували і net energy, і Кее. Але ферми з високим урожаєм і низьким Кее збільшували net energy, але знижували Кее. Тобто можна мати великий Ев і при цьому поганий Кее – якщо Ео зростає швидше, ніж Ев.

Juárez Hernández et al. (2019) підтвердили цю логіку на мексиканських даних. Низьковитратні системи показували кращі коефіцієнти ефективності (output/input від 17 до 12,0), але нижчу абсолютну продуктивність. Високо контрольовані зрошувані системи досягали вищого абсолютного net energy при середніх показниках ефективності. Grassini et al. (2012) у класичній роботі PNAS показали протилежний приклад. Добре збалансовані інтенсивні технології здатні одночасно забезпечувати високий енергетичний прибуток і відносно невеликий кліматичний слід на одиницю продукції. Якщо кожна додаткова одиниця вкладеної енергії генерує пропорційний або більший приріст Ев. Silva et al. (2024) і Li et al. (2021) розширили цю логіку у бік LCA, скорочення витрат пального і добрив знижує E_o , але може супроводжуватися змінами в ґрунтових емісіях і секвестрації вуглецю, що впливає на ширшу енергетичну і кліматичну ситуацію. Li et al. (2021) прямо сформулювали – енергетична ефективність, не задача одноцільової оптимізації, а частина ширшого компромісу між водою, їжею й енергією. Для норми висіву логіка та саам – густота, яка максимізує урожайність, може не збігатися з густотою, яка максимізує K_{ee} . Особливо якщо вища врожайність досягається ціною вищої вологості зерна і, відповідно, більших витрат на сушіння.

Silva et al. (2021) в енергетичному аналізі сушіння зерна кукурудзи показали, що навіть невелика різниця у вологості зерна при збиранні суттєво змінює питомі енерговитрати на одну тонну висушеного продукту. Сушіння – термодинамічно витратний процес, і його ефективність далека від ідеальної. Частина корисної енергії незворотно деградує вже в сушарці. Gao et al. (2021) розкрили біофізичний механізм. Вологість зерна після фізіологічної стиглості встановлює рівновагу з атмосферними умовами в полі через процес dry-down, і швидкість цього процесу залежить від гібриду, температури і вологості повітря. Тобто рання вологість зерна при збиранні – не лише технологічне рішення, а й функція генотипу і погоди. Li et al. (2021) показали, що режим сушіння суттєво впливає на питомі енерговитрати. Змінно-температурна система з рекуперацією тепла знижувала загальне споживання порівняно зі

стандартними режимами. Li et al. (2020) в ексергоекономічному аналізі підтвердили, що вологість зерна при збиранні змінює не лише E_o , а й економіку технології, і ці два виміри можуть давати різні рекомендації щодо оптимального режиму. Fu et al. (2023) продемонстрували, що енергоощадні технології сушіння з конденсаційною рекуперацією можуть суттєво скоротити «енергетичний штраф» за збирання вологого зерна. Різні зони продуктивності можуть формувати зерно з різною вологістю при збиранні через відмінності у строках досягання, мікрокліматі і реакції гібриду на густоту. Отже, однакова врожайність у двох зонах при різній вологості збирання дасть різний E_o і, відповідно, різний K_{ee} . Ігнорувати сушіння у структурі E_o при аналізі норм висіву означає систематично спотворювати порівняння між варіантами.

Якщо E_o і E_v змінюються залежно від зони продуктивності логічним є питання: «чи може диференційований підхід до норми висіву покращити K_{ee} на рівні поля в цілому?». Dahal et al. (2020) у дослідженні зрошуваної кукурудзи на Великих рівнинах США показали, що рівномірні і зонально диференційовані стратегії управління азотом і водою давали однаковий урожай, але диференційована за допомогою віддаленого зондування стратегія досягала кращого використання азоту. Тобто просторова варіабельність управління дозволяє зберегти врожай при скороченні витрат, що безпосередньо покращує K_{ee} . Schillaci et al. (2021) підтвердили це для азоту в умовах Північної Італії. Змінна норма підживлення $\pm 30\%$ від стандарту не знизила врожайності, але зменшила перевитрати ресурсів у частині поля. Gallardo-Romero et al. (2023) запропонували методичну основу для виділення зон управління. Sentinel-2, дані врожайного монітора і машинне навчання (k-means) дозволяють ідентифікувати просторові патерни продуктивності і формувати зони для диференційованого застосування ресурсів. McNutt et al, (2019) змоделювали економічну і екологічну перевагу змінних норм висіву і азоту на польовому рівні. Середній ROI зростав, а нітратне вимивання в частині сценаріїв знижувалося, хоча екологічні переваги не були універсальними. Mayer et al. (2026) показали найбільш прямий зв'язок

між просторово диференційованим управлінням і Ео. Змінна норма зрошення на 15-га ділянці в Італії скоротила витрати води і енергії приблизно на 20% без втрати врожаю і при цьому знизила вологість зерна при збиранні. Сукупно ці роботи формують переконливу ситуацію. Просторово диференційоване управління нормою висіву, азотом і водою здатне покращити К_е на рівні поля порівняно з рівномірними нормами. Насамперед через усунення перевитрат ресурсів у низькопотенційних зонах і більш повну реалізацію потенціалу у високопотенційних.

То ж де саме розходяться оптимуми урожайності, ресурсної ефективності та К_е? Meng et al. (2022) показали, що вища густина підвищує ефективність використання світлової енергії посівом, але лише за умови достатнього азотного живлення. Без азоту загущення знижує ефективність використання світла попри збільшення перехоплення ФАР. Hernández et al. (2021) уточнили водний вимір. Транспіраційна ефективність зростає при вищій густоті або вищому рівні азоту, але це не означає, що максимум ефективності транспірації збігається з максимумом К_е. Djaman et al. (2022) у досліді з шістьма густотами і сімома строками сівби ідентифікували практичний оптимум 88 тис. рослин/га для максимуму врожайності і ефективності використання води. Залежність використання води від густоти не є лінійною. Tian et al. (2024) для двох гібридів і чотирьох норм азоту у Цзиліні встановили, що помірна густина з помірним азотом дає найкраще поєднання врожайності і використання води. Надлишок будь-якого з факторів погіршує ресурсну ефективність. Zhao et al. (2026) підтвердили це. При 75 тис. рослин/га і 180 кг/га N досягався максимальний урожай 13,55 т/га і найкращі механічні властивості стебла. Надмірне загущення знижувало активність ензимів лігніну і погіршувало стійкість. Lindsey et al. (2018) у 125 дрібно ділянкових дослідях в Огайо і Іллінойсі показали важливу річ. Економічний оптимум норми висіву систематично нижчий за агрономічний, бо вартість додаткового насіння не завжди компенсується граничним приростом врожаю. Це пряма аналогія до біоенергетичного оптимуму. Витрати енергії на насіння при

підвищенні норми можуть не окупатися відповідним приростом E_v . Особливо у зонах з обмеженим ресурсним потенціалом. Підсумок цього пункту можна сформулювати у вигляді кількох взаємопов'язаних тез:

По-перше, максимум урожайності, максимум K_{ee} , максимум використання води і максимум економічного прибутку – це чотири різні точки на кривій «густота – ефект». Вони можуть збігатися, але часто не збігаються. Zhang et al. (2025) у мета аналізі 1951 пари даних із 160 робіт по Китаю підтвердили, що оптимальна для врожайності густина відрізняється між регіонами і, як правило, вища за поточну фермерську практику на 25–50%. Але «оптимальна для врожайності» – це не те саме, що «оптимальна для K_{ee} ».

По-друге, зони продуктивності поламають різні оптимуми густоти для кожного з цих критеріїв. Рівномірна норма висіву по всьому полю це завжди компроміс, який для частини поля є оптимальним і за врожайністю, і за K_{ee} одночасно.

По-третє, сушіння зерна є і тією прихованою змінною, яка пов'язує агрономічні рішення (норму висіву, строки збирання, вологість) із енергетичним балансом. Різні зони поля з різними нормами висіву можуть давати різну вологість зерна при збиранні. Це безпосередньо змінює E_o без зміни польових агрозаходів. Bahmutsky et al. (2024) у системному огляді LCA точного землеробства підкреслюють, що переваги диференційованого управління треба оцінювати не лише через приріст врожаю, а через інтеграцію енергетичних, екологічних і економічних індикаторів. Getahun et al. (2024) додають, що GPS-навігація, VRT і дані дистанційного зондування дають технічну основу для реалізації такого підходу на рівні господарства. Але методологічна база для оцінки біоенергетичного виміру диференційованого висіву кукурудзи залишається розробленою недостатньо. Саме це і визначає наукову актуальність цього дослідження – оцінити, як диференційовані норми висіву у різних зонах продуктивності поля впливають не лише на врожайність і економіку, а й на K_{ee} і КФАР. Тобто на ефективність перетворення антропогенної та сонячної енергії у врожай кукурудзи.

1.3. Еволюція концепції диференційованого висіву насіння (VRS), від наукової ідеї до виробничої практики

Ідея про те, що різні ділянки одного поля потребують різної норми висіву, здається очевидною. Але лише якщо є інструменти для того, щоб цю різницю побачити і використати. Саме поява GPS, GIS і врожайних моніторів наприкінці 1980-х – на початку 1990-х років створила технічну передумову для постановки питання: «чи варто сіяти по-різному в різних частинах поля?».

Контекст, у якому це питання виникло, важливий. Протягом XX століття норми висіву кукурудзи в Кукурудзяному поясі США зросли з близько 30 тис. рослин/га у 1930-х до приблизно 70 тис./га у 2010-х – паралельно зі зростанням рівня удобрення і зрошення. Mansfield & Mumm (2014) у вступній частині свого скринінгового дослідження добре показують цю тенденцію. Приріст норм висіву відображав не лише агрономічну логіку, а й селекційний тиск у бік гібридів, толерантних до загущення. Але чим вища середня норма, тим більша ціна помилки у полях зі значною просторовою варіабельністю. Першу системну економічну оцінку ідеї диференційованого висіву зробили Bullock et al. (1998). На матеріалі 170 полів Кукурудзяного поясу протягом шести років вони розраховали, що економічно оптимальна рівномірна норма становить близько 67 900 рослин/га, і що оптимум зростає приблизно на 1200 рослин/га на кожну додаткову тонну потенційної врожайності. Теоретично, якби виробник мав повну інформацію про варіабельність поля, диференційований висів міг би дати додатково близько 12,83 дол./га. Але при частковій інформації, яка реально доступна на той час, цей виграш скорочувався до символічних 0,15 дол./га. Висновок дослідження однозначний: диференційований висів економічно не доцільний, доки вартість отримання якісної просторової інформації не знизиться суттєво. Ця робота задала рамку для всіх подальших досліджень і сформулювала головне обмеження, яке наступні двадцять років намагалися подолати. Паралельно розвивалася ідея зон управління як компромісу між точковим і рівномірним підходом. Khosla et

al. (2002) на зрошуваній кукурудзі в Колорадо показали, що поділ поля на зони продуктивності і диференційоване внесення азоту залежно від зони дає до 51 дол./га додаткового прибутку без втрати врожаю. Принципово важливо, що автори наголосили: зони мають визначатися за рівнем продуктивності, а не за абсолютними значеннями врожайності. Бо саме відносний потенціал зони, а не її абсолютні показники є правильною основою для диференційованих рішень. Ця концепція зон продуктивності згодом стала методологічним фундаментом і для диференційованого висіву. Перший польовий експеримент, який цілеспрямовано тестував взаємодію «густота $\times$ гібрид $\times$ ландшафт», провели Shanahan et al. (2004) у Колорадо протягом 1997–1999 років. Вони показали, що економічно оптимальна густота змінювалася приблизно на 5 000 рослин/га між високопродуктивними і низькопродуктивними зонами поля, а просторова варіабельність врожайності на 47–95% пояснювалася рельєфом і яскравістю ґрунту. Потенційна економія на насінні від диференційованого підходу становила близько 6,25 дол./га – невелика, але реальна. Що важливіше, ця робота дала кількісне підтвердження того, що різниця в оптимальній густоті між зонами існує і є стабільною між роками. Концептуальне обрамлення всьому цьому напрямку дали Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer (2004), які сформулювали ідею точного землеробства як «заміни фізичних ресурсів інформацією і знаннями». Замість того, щоб вносити більше добрив або сіяти більше насіння по всьому полю, краще знати, де скільки потрібно. На кейсі диференційованого внесення азоту в Аргентині вони показали, що такий підхід залишається прибутковим навіть при суттєвому обмеженні загального рівня внесення ресурсів. Це перевело розмову про VRS з чисто технологічної площини в площину сталого землеробства.

Поки практики шукали відповідь на питання «чи вигідний диференційований висів», науковці накопичували пояснення того, чому єдина норма принципово не може бути оптимальною на гетерогенному полі. Tokatlidis & Koutroubas (2004) сформулювали фундаментальну проблему сучасних гібридів у вигляді чіткого парадоксу. Селекція протягом десятиліть

збільшувала врожайність на одиницю площі, але не за рахунок підвищення продуктивності однієї рослини, а за рахунок підвищення толерантності до загущення. Тобто сучасний гібрид «навчився» добре переносити конкуренцію з сусідами. Це зробило його врожайність сильно залежною від густоти і, відповідно, від середовища, яке цю густоту підтримує або обмежує. Оптимальна норма висіву такого гібриду «прив'язана» до конкретного ресурсного потенціалу поля, і диференційований висів є технологічною відповіддю на цю залежність. Tokatlidis (2013) розвинув цю ідею, додавши кліматичний вимір. На матеріалі 11 сезонів в умовах богарного середземноморського клімату він показав, що для того самого гібриду оптимальна густота коливалася від 4,56 до 10,2 рослин/м², а потенційна врожайність – від 1890 до 8980 кг/га. Помилка у виборі фіксованої норми в несприятливий рік могла призводити до втрат, що наближаються до 100% від можливого приросту. Це підтверджує практичну значущість урахування варіабельності умов вирощування. Mansfield & Mumm (2014) показали генетичний вимір тієї самої проблеми. У скринінгу 32 американських гібридів на шести рівнях густоти від 47 до 133 тис. рослин/га виявилось, що лише п'ять гібридів толерували найвищі густоти без суттєвих втрат урожайності. Реакція на густоту виявилася гібрид-специфічною і залежала від середовища, тобто мала виражений компонент $G \times E$ взаємодії. Це дало генетичне обґрунтування для ідеї не просто зональних норм висіву, а гібрид-специфічного диференційованого висіву. Assefa et al. (2016) підвели кількісний підсумок під усім цим масивом спостережень. У метааналізі 124 374 спостережень із 22 штатів США і двох провінцій Канади за 2000–2014 роки вони виявили чотири принципово різних типи кривих «врожайність-густина» – спадний, постійний, зростаючий і постійно зростаючий. Густина максимальної врожайності суттєво залежала від продуктивного середовища і групи стиглості гібриду. Пізньостиглі гібриди досягали максимуму при нижчих густотах, але давали вищу абсолютну врожайність. Короткостиглі ж – навпаки. Ця робота дала формальну кількісну основу для рішень про диференційований висів і

показала, що «єдиної правильної норми» в принципі не існує. У той самий період ідея VRS поширювалася географічно. Peake et al. (2008) в Австралії використали модель APSIM для оптимізації густоти на фоні різних стратегій зрошення і типів ґрунту. Оптимум коливався від 5 до 9 рослин/м² залежно від доступної вологи. Важливо, що автори показали, що моделювання може замінити багаторічні польові дослідження при пошуку зон і специфічних норм – методологічна ідея, яка стала актуальною в епоху цифрового землеробства. Hörbe et al. (2013) у Бразилії провели перший масштабний польовий VRS-експеримент у Південній Америці. У двох сезонах на полях з трьома виділеними зонами продуктивності вони показали, що зниження норми висіву у низькопродуктивній зоні давало приріст врожаю 1,20 і 1,90 т/га з економічним ефектом 19,8% і 28,7% відповідно. У високопродуктивній зоні підвищення норми давало 0,89 і 0,94 т/га. Середньопродуктивна зона не потребувала змін відносно базової норми. Найбільший вигаиш від диференційованого висіву приходить не тільки від підвищення норми у кращих зонах, а від її зниження у найгірших, де надлишкове насіння витрачається без відповідного приросту врожаю.

До кінця 2010-х років VRS перейшла з фази «доведення концепції» у фазу систематизації методології і масштабних виробничих оцінок. Munna et al. (2020) у великому огляді в *Advances in Agronomy* зробили детальний методологічний синтез. Вони чітко розмежували два підходи: map-based VRS, де норма висіву задається заздалегідь на основі картографічних даних (ґрунт, рельєф, попередні врожайності), і sensor-based VRS, де норма коригується в режимі реального часу за показниками сенсорів у полі. Практичний sensor-based VRS, на їхню думку, вимагає багатовимірної системи злиття даних (data fusion), яка інтегрує текстуру ґрунту, електропровідність, вміст органічної речовини, рельєф і дані дистанційного зондування в єдину динамічну рекомендацію. Šarauskis et al. (2022) систематизували 92 методології VRS у європейському контексті і дійшли важливого практичного висновку – середня окупність VRS у Європі починається з ферм площею не менше 150 га. Це не

означає, що менші ферми не можуть виграти, але маргінальна вигода стає значимою лише при достатньому масштабі, що дозволяє розподілити фіксовані витрати на отримання і обробку просторових даних. Для України, де середній розмір агропідприємства суттєво варіює, це важливий орієнтир. Truter et al. (2026) провели наймасштабніше на сьогодні on-farm дослідження ефективності VRS: 19 комбінацій у чотирьох провінціях ПАР протягом 2020/21–2023/24 сезонів. Оптимальна змінна норма висіву дала в середньому +1,57 т/га порівняно зі статус-кво виробника. У 89% комбінацій VRS виявилася кращою за рівномірний підхід. Але величина ефекту сильно залежала від опадів, базового потенціалу врожайності і просторової гетерогенності поля. У полях з незначною варіабельністю переваги VRS були мінімальними. Цей висновок добре поєднується з більш ранніми американськими даними і формує реалістичну ситуацію – VRS працює, але не скрізь і не завжди однаково.

Щодо України, то ситуація специфічна. Поодинокі публікації стосуються переважно загальної наукової бази щодо густоти і гібридів без прив'язки до зонального диференційованого підходу. Польових VRS-експериментів у вітчизняній літературі практично немає. Технічна база для точного землеробства в Україні розвивається, GPS-наведення і врожайні монітори поступово впроваджуються у великих господарствах, але prescription seeding як системна практика залишається поодиноким явищем у малих фермерських господарствах.

Однак ситуацію не можна вважати однозначно оптимістичною. Наукова дискусія навколо VRS далека від завершення. І саме ця незавершеність формує простір для нових досліджень. Licht et al. (2016) у дев'яти site-years в Айові, одному з найкращих кукурудзяних регіонів світу, отримали результат, який охолодив надмірний ентузіазм щодо VRS. Дослідникам у трьох із дев'яти комбінацій вдалося ідентифікувати осмислений оптимум норми висіву, що залежав від просторових змінних. У чотирьох комбінаціях взаємодії між нормою висіву і ґрунтовими або топографічними параметрами взагалі не

виявилося. Головна причина – погодна мінливість між роками. Та сама ґрунтова зона в різні сезони реагувала на густоту по-різному, що робило статичні зональні рекомендації ненадійними. Хороший дизайн зон не гарантує стабільного ефекту VRS, якщо зони не враховують річну кліматичну мінливість. Lowenberg-DeBoer & Erickson (2019) у масштабному огляді глобального впровадження технологій точного землеробства показали, що VRS адаптується значно повільніше за GPS, монітори врожайності і навіть диференційоване внесення добрив. Чотири головні бар'єри: непостійна агрономічна реакція між роками, висока вартість якісної просторової інформації, відсутність комерційно надійних інструментів для прийняття рішень і маргінальна вигода у відносно однорідних полях. Автори підкреслюють, що попередні оцінки рівня впровадження VRS були завищеними. Реальні темпи впровадження технології виявилися нижчими за прогнозовані.

Питання стабільності зон між роками залишається відкритим. Truter et al. (2026) і Munna et al. (2020) обидва підкреслюють, що ефект VRS виражений лише у полях з вираженою і стабільною просторовою гетерогенністю. Скільки зон оптимально – дві, три чи п'ять, залежить від конкретного поля і від того, наскільки ці зони відтворюються між сезонами. Гібрид-специфічність реакції на густоту додає ще один вимір складності. Mansfield & Mumm (2014) і Assefa et al. (2016) показали, що реальні переваги VRS суттєво зростають при правильному підборі гібриду до зони, тобто ідеальний сценарій передбачає не лише різні норми висіву, а й різні гібриди в різних зонах. Це технологічно і логістично значно складніше, ніж просто змінити щільність висіву. Нарешті, Bullock et al. (1998) ще у своїй піонерській роботі сформулювали питання, яке залишається актуальним: різниця між агрономічним і економічним оптимумом норми висіву визначається ціною насіння і ціною зерна. Коли ціна насіння зростає, а ціна зерна падає – економічний оптимум зміщується донизу відносно агрономічного. У цій дисертації додається третій вимір – біоенергетичний оптимум, тобто та норма висіву, при якій досягається

найкраще співвідношення E_v/E_o незалежно від поточних цін. Жодне з опрацьованих нами джерел не оцінювало ефект диференційованого висіву через цей критерій. Саме це є дослідницькою прогалиною, яку заповнює наша робота. Економічний і екологічний виміри VRS досліджені, LCA-підходи застосовуються (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Munna et al., 2020; Šarauskis et al., 2022; Truter et al., 2026), але питання про те, як різні норми висіву в різних зонах продуктивності впливають на співвідношення E_v і E_o , залишається без відповіді.

Розвиток концепції VRS пройшов кілька послідовних етапів. Від економічної гіпотези (Bullock et al., 1998) через перші польові feasibility-дослідження (Shanahan et al., 2004) і масштабні метааналізи (Assefa et al., 2016) до виробничих оцінок у реальних умовах (Truter et al., 2026). Це технологія зі змінною ефективністю, яка працює найкраще там, де є виражена просторова гетерогенність поля, якісна інформаційна основа і відповідний масштаб господарства. Але сама по собі ідея диференційованого висіву не може існувати без ширшого технологічного контексту. Prescription maps, врожайні монітори, електромагнітне картування ґрунту, NDVI із супутника, ISOBUS-сумісні сівалки – все це разом утворює систему точного землеробства, у рамках якої VRS є лише одним із інструментів.

1.4. Сучасні інструменти точного землеробства для підвищення біоенергетичної ефективності виробництва зерна кукурудзи

Точне землеробство – це не набір гаджетів і не синонім цифровізації. Це управлінська філософія, яка ґрунтується на одній простій ідеї. Різні ділянки поля потребують різного обсягу ресурсів, і застосування однакових норм скрізь – це завжди або недовитрата в одних місцях, або перевитрата в інших. Finco et al. (2023) формулюють це чітко. Точне землеробство – це система управління просторовою і часовою варіабельністю ґрунту та посіву з метою оптимізації використання ресурсів і підвищення стійкості виробництва.

Ключове слово тут – оптимізація, а не максимізація. Зв'язок між точним землеробством і Кее прямий і логічний. Ео складається з кількох великих статей – добрива, паливо, насіння, засоби захисту рослин. Якщо рівномірна норма висіву означає, що в низькопродуктивній зоні насіння витрачається понад оптимум, ця частина Ео не повертається приростом Ев. Кее падає. Якщо ж норма знижена там, де ресурсний потенціал обмежений, і підвищена там, де він реалізується повніше, загальний баланс Ев/Ео по полю покращується без зміни загальної площі чи технології. Саме це і є енергетичний аргумент на користь диференційованого висіву.

Lassoued et al. (2021) підкреслюють, що сучасне точне землеробство працює не лише через техніку, а через дані і підтримку управлінських рішень. Сенсори, карти, аналітичні платформи і своєчасна інформація разом формують систему, де агрономічне рішення ухвалюється не за середніми показниками поля, а за реальними умовами кожної його зони. Meemken et al. (2024) додають важливе застереження – цифрові інструменти мають сенс лише тоді, коли вони реально покращують керованість ресурсів і прозорість наслідків, а не просто генерують дані заради даних. Для Кее це означає, що цінність точного землеробства вимірюється не кількістю карт, а тим, наскільки точніше розподілена антропогенна енергія між зонами поля.

Перш ніж диференціювати норму висіву, треба знати, де саме поле неоднорідне і в чому ця неоднорідність виражається. Саме тут починається практична реалізація ідеї зонування. Найпоширенішим інструментом для виділення зон є вимірювання електропровідності ґрунту. Mazur et al. (2022) на трьох кукурудзяних полях у центральній Польщі показали, що електропровідність ґрунту і супутникові індекси вегетації на ґрунті разом добре відображають просторовий розподіл фосфору, калію, магнію і реакції ґрунту. Ці властивості – саме те, що визначає ресурсний потенціал зони і, відповідно, її здатність реалізувати вищу густоту посіву. Тобто карта електропровідності – це не абстракція, а практичний інструмент виділення зон для диференційованого висіву. Gamma-радіометричне картування –

альтернативний і дедалі популярніший підхід. Pätzold et al. (2020) пояснюють логіку так: гамма-сигнал, зареєстрований над поверхнею ґрунту, пов'язаний з мінералогічним складом і текстурою, тому він дає непряму, але просторово детальну інформацію про ґрунтові властивості. Перевага перед електропровідністю – менша залежність від поточної вологості ґрунту. Enesi et al. (2024) пішли далі і показали, що після калібрування гамма-сигналу на польові виміри можна будувати детальні карти рН і катіонного складу, які безпосередньо перетворюються у карти потреби у вапнуванні – від нуля до шести тонн на гектар у межах одного поля. Тобто гамма-картування – це вже не дослідницький інструмент, а готовий ланцюжок від вимірювання до агрономічного рішення. Супутникові дані доповнюють ситуацію в часовому вимірі. Якщо електропровідність і гамма відображають відносно стабільні ґрунтові властивості, то індекси вегетації з супутника показують, як посів реагує на ці умови в конкретний сезон. Mazur et al. (2022) використовували супутникові знімки голого ґрунту для уточнення зон поряд із ґрунтовими вимірюваннями. Поєднання двох інформаційних шарів дає стабільніші і агрономічно змістовніші зони, ніж кожен із них окремо. Безпілотні літальні апарати з багатоспектральними камерами займають особливу нішу. Zhang et al. (2025) в огляді сучасних застосувань таких систем показують, що вони забезпечують просторову роздільність, недосяжну для супутників середнього розрізнення – кілька сантиметрів на піксель замість десяти метрів. Це дає змогу бачити варіабельність всередині зон, виявляти локальні аномалії розвитку посіву і оперативно коригувати зональні межі. Для задачі диференційованого висіву безпілотники особливо корисні при уточненні меж зон перед сівбою наступного сезону – на основі спостережень за поточним посівом.

Жоден із цих інструментів сам по собі не дає повної картини. Ефективне зонування кукурудзяного поля спирається на комбінацію ґрунтових і рослинних показників – електропровідності, гамма-сигналу супутникових і аерофотознімків, даних врожайного монітора попередніх років. Чим більше

незалежних інформаційних шарів узгоджуються між собою, тим стабільнішими і агрономічно надійнішими є виділені зони.

Карта зон продуктивності і карта рекомендованих норм висіву – це ще не диференційований висів. Між картою і реальним розподілом насіння в ґрунті стоїть ціла технічна система, від надійності якої залежить, чи буде реалізована агрономічна ідея. He et al. (2019) описали архітектуру системи керування змінною нормою висіву для кукурудзяної сівалки: мережа CAN-bus, незалежне керування кожним висівним апаратом, алгоритм компенсації запізнення між командою і фактичним висівом. У лабораторних випробуваннях система забезпечувала точне відтворення карти-завдання при різних швидкостях руху і різних цільових нормах. Але польова реальність складніша – на поворотах, де зовнішні ряди сівалки рухаються швидше за внутрішні, виникає похибка у фактичній нормі висіву кожного ряду. He et al. (2021) вирішили саме цю проблему. Система компенсації поворотів розраховує фактичну швидкість кожного ряду від одного GPS-приймача і коригує швидкість відповідного висівного апарату. Польові випробування показали суттєве покращення рівномірності висіву у зонах поворотів. При ширині захвату сівалки 12 рядів різниця у швидкості крайніх рядів на повороті може досягати 20–30%, і без компенсації карта-завдання виконується з систематичною помилкою саме на головках полів. Chen et al. (2022) представили сівалку з електроприводом на протоколі CANopen – стандарті промислової мережевої комунікації, що забезпечує інтеграцію моніторингу, керування двигунами і контролю якості висіву в єдину розподілену архітектуру. Wang et al. (2022) пішли далі і розробили систему з подвійним замкненим контуром керування і нечіткою логікою, яка забезпечує швидшу реакцію двигуна і меншу похибку між заданою і фактичною швидкістю навіть при зміні робочої швидкості агрегату. Сівалка може точно виконувати карту-завдання не лише при стабільному прямолінійному русі, а й при прискореннях і сповільненнях, які неминучі в реальних умовах поля. Roccatello et al. (2025) розглядають ширший інфраструктурний вимір – без сумісності форматів даних

між різними пристроями і платформами, від ґрунтового сенсора до сівалки, від польового комп'ютера до хмарного сервісу, масштабування диференційованого висіву залишається технічно обмеженим. Стандарти комунікації – це не технічна деталь. Це необхідна умова для того, щоб карта, побудована на основі ґрунтових даних, реально керувала сівалкою в полі. Ефект диференційованого висіву залежить не лише від якості карти зон і правильності агрономічного рішення, а й від того, наскільки точно технічна система реалізує цю карту в полі. Помилки на рівні машини систематично знижують різницю між варіантами і можуть маскувати реальний агрономічний ефект зонування.

Finco et al. (2023) на прикладі виробництва пшениці в Італії показали, що диференційоване управління азотом дає одночасно економічний і агроекологічний ефект – через скорочення надлишкових витрат у зонах з нижчим потенціалом. Точне землеробство найбільш виправдане там, де просторова неоднорідність поля реальна і агрономічно значима. У відносно однорідному полі диференціація витрат нічого не дає – всі зони однаково реагують на ресурс, і додаткові витрати на зонування не окупляться. Riccoli et al. (2025) підтверджують цей принцип на прикладі диференційованого внесення органічних добрив. Змінна норма внесення дає найбільший ефект саме там, де реальна просторова неоднорідність реакції системи на ресурс. Якщо поле однорідне – перевага над рівномірним внесенням мінімальна. Ця логіка повністю застосовна до норми висіву. Диференційований висів окупається там, де різниця між зонами в ресурсному потенціалі є реальною і достатньо вираженою, щоб змінити оптимальну густоту. В Україні точне землеробство розвивається, але нерівномірно. Hrynevych et al. (2022) у рецензованому огляді, присвяченому саме українським тенденціям, показують, що інструменти цифрового землеробства входять в агробізнес насамперед через великі господарства, де масштаб дозволяє окупити первинні вкладення. Ключовий бар'єр – не технологічний, а організаційний. Готовність до кооперації і обміну даними між учасниками ринку суттєво визначає темп поширення точного землеробства. Серед доступних в Україні комерційних

платформ варто відзначити EOSDA Crop Monitoring і OneSoil – сервіси, які дозволяють будувати карти зон продуктивності на основі супутникових даних, відстежувати індекси вегетації і формувати карти змінних норм внесення у зручному для виробника інтерфейсі. Ці платформи вже фактично перекладають наукові концепції зонування у мову повсякденних агрономічних рішень.

Для K_{ee} диференційований висів дає ефект через кілька каналів одночасно. По-перше, скорочення витрат насіння у низькопродуктивних зонах безпосередньо зменшує E_o без зниження E_v – бо у цих зонах надлишкове насіння все одно не конвертується у врожай. По-друге, правильна густина у кожній зоні покращує ефективність використання внесених добрив – рослини краще засвоюють азот, коли конкуренція між ними відповідає ресурсному потенціалу зони. По-третє, оптимальна густина може впливати на вологість зерна при збиранні, а через неї – на витрати на сушіння, які є значною статтею E_o . Усі три канали разом означають, що диференційований висів – це не просто агрономічний інструмент, а інструмент управління K_{ee} на рівні поля.

Висновки до першого розділу

Проведений аналіз наукової літератури дозволяє сформулювати такі узагальнення.

1. Біоенергетичний аналіз виник як практична відповідь на залежність інтенсивного землеробства від викопної енергії і залишається актуальним інструментом оцінки технологій в умовах зростання вартості енергоносіїв, кліматичних зобов'язань і потреби у сталому виробництві. На відміну від економічного аналізу, який залежить від поточних цін, енергетичний баланс дозволяє порівнювати технології у стабільних фізичних одиницях і виявляти структурні вразливості задовго до того, як вони стають фінансовими.
2. Система біоенергетичних показників включає антропогенні енерговитрати (E_o), енергію урожаю (E_v), коефіцієнт енергетичної ефективності ($K_{ee} =$

Ев/Ео), енергетичний прибуток ($E_{\text{приб}} = E_v - E_o$) та коефіцієнт використання фотосинтетично активної радіації (КФАР).

3. Кукурудза є культурою з високою залежністю від енергоємних ресурсів: виробництво добрив формує найбільшу частку E_o , за ним ідуть витрати пального і сушіння зерна. Непрямі витрати, пов'язані насамперед із добривами, стійко переважають над прямими у більшості досліджень. Норма висіву безпосередньо визначає лише відносно невелику частку E_o через витрати на насіння, але опосередковано впливає на урожайність, вологість зерна при збиранні і ефективність використання добрив. А отже, на підсумковий Кее значно більшою мірою, ніж можна очікувати від її прямого енергетичного внеску.

4. Кукурудза має обмежену компенсаційну здатність, і оптимальна густота стояння рослин визначається балансом між приростом продуктивної площі від збільшення кількості рослин і наростанням конкурентного стресу між ними. Цей оптимум не є універсальним. Він залежить від генотипу гібриду, забезпечення водою і азотом, ґрунтових умов і кліматичних особливостей року. Сучасні гібриди розширили толерантний діапазон густоти, але не скасували принципу залежності оптимуму від ресурсного потенціалу середовища.

5. Просторова варіабельність поля означає, що зони з різним ресурсним потенціалом мають різні оптимуми густоти. Єдина рівномірна норма висіву завжди є компромісом, який для частини поля є оптимальним, а для частини – навпаки. Диференційований висів, обґрунтований аналізом зон продуктивності, дозволяє наблизитися до зонального оптимуму без зміни загальної технології вирощування.

6. Еволюція концепції диференційованого висіву підтвердила агрономічну обґрунтованість ідеї, але виявила і її обмеження. Ефект не є постійним між роками і полями, залежить від якості зонування і точності технічної реалізації. Найбільший виграш досягається через зниження норми висіву у низькопродуктивних зонах, а не лише через її підвищення у кращих.

7. Картування урожайності, агрохіманаліз ґрунту, супутникові і аерофотознімки, електроприводні сівалки з незалежним керуванням рядами формують технічну основу для практичної реалізації диференційованого висіву. Водночас жодне з відомих досліджень не оцінювало ефект диференційованого висіву кукурудзи через K_{ee} і КФАР як основні критерії. Саме це визначає наукову новизну і практичну актуальність цієї роботи.

Список літератури до першого розділу

1. AksyoNov I. V., Kotchenko M. V. Response of maize hybrids on increasing plant density in the agroceNosis in the Northern Steppe of Ukraine. *Grain Crops*. 2024. Vol. 8, № 1. P. 119–126. DOI: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0321>
2. Ambrosio R., Pauletti V., Barth G., Povh F. P., Silva D. A., Blum H. Energy potential of residual maize biomass at different spacings and nitrogen doses. *Ciência e AgrotecNologia*. 2017. Vol. 41, № 6. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416009017>.
3. Assefa Y., Prasad P. V. V., Carter P., Hinds M., Bhalla G., Schon R., Jeschke M., Paszkiewicz S., Ciampitti I. A. Yield responses to planting density for U.S. modern corn hybrids: a synthesis-analysis. *Crop Science*. 2016. Vol. 56, № 5. P. 2802–2817. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0215>.
4. Bahmutsky S., Grassauer F., Arulnathan V., Pelletier N. A review of life cycle impacts and costs of precision agriculture for cultivation of field crops. *Sustainable Production and Consumption*. 2024. Vol. 52. P. 347–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.010>.
5. Bazaluk O., Havrysh V., Fedorchuk M., Nitsenko V. Energy assessment of sorghum cultivation in Southern Ukraine. *Agriculture*. 2021. Vol. 11, № 8. Article 695. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11080695>.
6. Beyrer T. A., Winans E. T., Below F. E. Managing density stress to close the maize yield gap. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Article 767465. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.767465>.
7. Biswas S., Das R., Dutta D. Irrigation and primary nutrients' performance on winter maize productivity, profitability, energetics, and carbon footprint in Gangetic plains of India. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02896-x>.
8. Bogomaz S., Zayka K., Didur I., Mazur O., Mazur O., Tsyhanskyi V. Effects of plant density and fertilisation on yield structure and yield elements of

maize hybrids for biofuel production. *Journal of Ecological Engineering*. 2025. Vol. 26, № 6. P. 352–364. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/202943>.

9. Bomba M., Lytvyn O., Mazurak I., Andrushko M., Bomba M. Yield of corn hybrids depending on the density of agrophytoceNosis. *Visnyk of Lviv National Environmental University. AgroNomy*. 2025. Vol. 29. P. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroNomy2025.29.086> (див. також україномовну версію нижче)

10. Bongiovanni R., Lowenberg-DeBoer J. Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*. 2004. Vol. 5, № 4. P. 359–387. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>.

11. Bullock D. G., Bullock D. S., Nafziger E. D., Doerge T. A., Paszkiewicz S. R., Carter P. R., Peterson T. A. Does variable rate seeding of corn pay? *AgroNomy Journal*. 1998. Vol. 90, №6. P. 830–836. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000060019x>.

12. Cantrell K. B., Novak J. M., Frederick J. R., Karlen D. L., Watts D. W. Influence of corn residue harvest management on grain, stover, and energy yields. *BioEnergy Research*. 2014. Vol. 7. P. 590–597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9433-9>.

13. Chary G. R., Rajkumar B., Krupashankar M. R. Combined application of naNo-DAP and conventional fertilizers improved agroNomic and ecoNomic performance of rainfed maize, nutrient and energy use efficiency. *Frontiers in AgroNomy*. 2025. Article 1723814. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1723814>.

14. Chen J., Zhang H., Pan F., Du M., Ji C. Control system of a motor-driven precision No-tillage maize planter based on the CANopen protocol. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, №7. Article 932. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12070932>.

15. Chibane N., Revilla P., Yannam V. R. R., Marcet P., Covelo E. F., Ordas B. Impact of irrigation, nitrogen fertilization, and plant density on stay-green and its

effects on agroNomic traits in maize. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. Article 1399072. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1399072>.

16. D'Andrea K. E., Parco M., Maddonni G. A. Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: II. Growth per plant, biomass partitioning to apical and sub-apical ears during the critical period and kernel setting. *Field Crops Research*. 2022. Vol. 284. Article 108557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108557>.

17. Dahal S., Phillippi E., Longchamps L., Khosla R., Andales A. Variable rate nitrogen and water management for irrigated maize in the western US. *AgroNomy*. 2020. Vol. 10, №10. Article 1533. DOI: <https://doi.org/10.3390/agroNomy10101533>.

18. Dhanapala S., Nilmalgoda H., Gunathilake M. B., Rathnayake U., Wimalasiri E. M. Energy balance assessment in agricultural systems; an approach to diversification. *AgriEngineering*. 2023. Vol. 5, №2. P. 950–964. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5020059>.

19. Djaman K., Allen S., Djaman D. S., Koudahe K., Irmak S., Puppala N., Darapuneni M. K., Angadi S. V. Planting date and plant density effects on maize growth, yield and water use efficiency. *Environmental Challenges*. 2022. Vol. 6. Article 100417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100417>.

20. EOSDA Crop Monitoring. URL: <https://eos.com/products/crop-monitoring/> (дата звернення: 10.05.2026).

21. Enesi R. O., Dyck M. F., Thilakarathna M. S., Strelkov S. E., Gorim L. Y. Calibrated SoilOptix® estimates of soil pH and exchangeable cations in three agricultural fields in western Canada. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, №17. Article e37106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37106>.

22. Finco A., Bentivoglio D., Belletti M., Chiaraluce G., Fiorentini M., Ledda L., Orsini R. Does precision techNologies adoption contribute to the ecoNomic and agri-environmental sustainability of Mediterranean wheat production? *AgroNomy*. 2023. Vol. 13, №7. Article 1818. DOI: <https://doi.org/10.3390/agroNomy13071818>.

23. Flynn N. E., Comas L. H., Stewart C. E., Fonte S. J. High N availability decreases N uptake and yield under limited water availability in maize. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 14335. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40459-0>.
24. Fu D., Wu W., Wang G., Xu H., Han F., Liu Z. Novel method of increased efficiency corn drying on a fixed bed by condensation. *Foods*. 2023. Vol. 12, №5. Article 1027. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12051027>.
25. Gallardo-Romero D. J., Apolo-Apolo O. E., Martínez-Guanter J., Pérez-Ruiz M. Multilayer data and artificial intelligence for the delineation of homogeneous management zones in maize cultivation. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, №12. Article 3131. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15123131>.
26. Galindo F. S., Strock J. S., Pagliari P. H. Nutrient Accumulation Affected by Corn Stover Management Associated with Nitrogen and Phosphorus Fertilization. *Agriculture*. 2021. Vol. 11, №11. Article 1118. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11111118>.
27. Gao S., Ming B., Li L., Yin X., Xue J., Wang K., Xie R., Li S. Relationship and distribution of in-field dry-down and equilibrium in maize grain moisture content. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2021. Vol. 304–305. Article 108409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108409>.
28. García-Mateos R., Miranda M. T., Arranz J. I., Romero P., Sepúlveda F. J., Cuellar-Borrego S. Comparative analysis of energy viability of crop residue from different corn varieties. *Materials*. 2025. Vol. 18, №7. Article 1683. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18071683>.
29. Getahun S., Kefale H., Gelaye Y. Application of precision agriculture technologies for sustainable crop production and environmental sustainability: a systematic review. *The Scientific World Journal*. 2024. Article 2126734. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>.
30. Grassini P., Eskridge K. M., Cassman K. G. High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. *Proceedings of the National*

Academy of Sciences. 2012. Vol. 109, №4. P. 1074–1079. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1116364109>.

31. He X., Ding Y., Zhang D., Yang L., Cui T., Zhong X. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part I: Design and laboratory experiment. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 162. P. 318–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.012>.

32. He X., Zhang D., Yang L., Cui T., Ding Y., Zhong X. Design and experiment of a GPS-based turn compensation system for improving the seeding uniformity of maize planter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 187. Article 106250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106250>.

33. Hernández M. D., Alfonso C., Echarte M. M., Cerrud A., Echarte L. Maize transpiration efficiency increases with N supply or higher plant densities. *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 250. Article 106816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106816>.

34. Holka M., Bieńkowski J. Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and Non-inversion tillage systems. *AgroNomy*. 2020. Vol. 10, №12. Article 1877. DOI: <https://doi.org/10.3390/agroNomy10121877>.

35. Hörbe T. A. N., Amado T. J. C., Ferreira A. O., Alba P. J. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture*. 2013. Vol. 14, №4. P. 450–465. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9308-7>.

36. Hossein H. Y., Azizpanah A., Namdari M., Shirkhani H. Environmental life cycle assessment of corn production in tropical regions. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 20036. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70923-4>.

37. Hrynevych O., Blanco Canto M., Jiménez García M. Tendencies of precision agriculture in Ukraine: disruptive smart farming tools as cooperation drivers. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, №5. Article 698. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12050698>.

38. Hülsbergen K.-J., Feil B., Biermann S., Rathke G.-W., Kalk W.-D., Diepenbrock W. A method of energy balancing in crop production and its application

in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2001. Vol. 86, №3. P. 303–321. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00286-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00286-3).

39. Hulmani S., Salakinkop S. R., Somangouda G. Productivity, nutrient use efficiency, energetic, and ecoNomics of winter maize in south India. *PLOS ONE*. 2022. Vol. 17, №7. Article e0266886. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266886>.

40. Jantalia C. P., Sarkis L. F., Boddey R. M., Alves B. J. R., Urquiaga S., Silva E. P., Guareschi R. F. Energy efficiency in maize crops in different regions of Brazil. *Semina: Ciências Agrárias*. 2021. Vol. 42, №4. P. 2271–2290. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n4p2271>.

41. Jankowski K. J., Dubis B., Sokólski M. M., Załuski D., Bórawski P., Szempliński W. Productivity and energy balance of maize and sorghum grown for biogas in a large-area farm in Poland: An 11-year field experiment. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 148. Article 112326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112326>.

42. Jin E., Al Fahel N., Mondal P., Li H., Archer C. L. Energy footprint of food: the case of corn production in Delaware. *Food and Energy Security*. 2020. Vol. 9, №3. Article e222. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.222>.

43. Juárez-Hernández S., Usón S., Sheinbaum Pardo C. Assessing maize production systems in Mexico from an energy, exergy, and greenhouse-gas emissions perspective. *Energy*. 2019. Vol. 170. P. 199–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.161>.

44. Khosla R., Fleming K., Delgado J. A., Shaver T. M., Westfall D. G. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2002. Vol. 57, №6. P. 513–518. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224561.2002.12457486>.

45. Konieczna A., Roman K., Roman M., Śliwiński D., Roman M. Energy efficiency of maize production technology: evidence from Polish farms. *Energies*. 2021. Vol. 14, №1. Article 170. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14010170>.

46. Kosemani B. S., Bamgboye A. I. Modelling energy use pattern for maize (*Zea mays* L.) production in Nigeria. *Cleaner Engineering and TechNology*. 2021. Vol. 2. Article 100051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100051>.
47. Kunduru B., Bokros N. T., Tabaracci K., Kumar R., Brar M. S., Stubbs C. J., Oduntan Y., DeKold J., Bishop R., Woomer J., Verges V., McDonald A. G., McMahan C. S., DeBolt S., Robertson D. J., Sekhon R. S. High-density pheNotype data of intermediate pheNotypes associated with stalk lodging resistance in maize. *Scientific Data*. 2025. Vol. 12. Article 1721. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-025-06008-2>.
48. Lai Z., Kou H., Fan J., Yang R., Xu X., Zhang F., Li S. Optimized planting density and nitrogen rate increased grain yield and water-nitrogen use efficiency of two maize cultivars under mulched drip fertigation. *Water*. 2023. Vol. 15, №1. Article 163. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15010163>.
49. Lassoued R., Macall D. M., Smyth S. J., Phillips P. W. B., Hesseln H. Expert insights on the impacts of, and potential for, agricultural big data. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, №5. Article 2521. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052521>.
50. Lei R., Wang Y., Zhou J., Xiang H. Tap maize yield productivity in China: a meta-analysis of agroNomic measures and planting density optimization. *AgroNomy*. 2025. Vol. 15, №4. Article 861. DOI: <https://doi.org/10.3390/agroNomy15040861>.
51. Li B., Li C., Huang J., Li C. Exergoeconomic analysis of corn drying in a Novel industrial drying system. *Entropy*. 2020. Vol. 22, №6. Article 689. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22060689>.
52. Li B., Zeng Z., Zhang X., Zhang Y. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, №6. Article 2772. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11062772>.
53. Li J., Cui J., Sui P., Yue S., Yang J., Lv Z., Wang D., Chen X., Sun B., Ran M., Chen Y. Valuing the synergy in the water-energy-food nexus for cropping

systems: a case in the North China Plain. *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 127. Article 107741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107741>.

54. Licht M. A., Lenssen A. W., Elmore R. W. Corn (*Zea mays* L.) seeding rate optimization in Iowa, USA. *Precision Agriculture*. 2016. Vol. 17, №6. P. 765–779. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9464-7>.

55. Lindsey A. J., Thomison P. R., Nafziger E. D. Modeling the effect of varied and fixed seeding rates at a small-plot scale. *AgroNomy Journal*. 2018. Vol. 110, №6. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0426>.

56. Liu P., Ren B., Zhao B., Zhang J., He Q., Liu Y., Zhao Y., Zhang L., Li G., Han K., Ren H., Wang H. Improving the net energy and energy utilization efficiency of maize production systems in the North China Plain. *Energy*. 2023. Vol. 274. Article 127340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127340>.

57. Lowenberg-DeBoer J., Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *AgroNomy Journal*. 2019. Vol. 111, №4. P. 1552–1569. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>.

58. Mandic V., Djordjevic S., Brankov M., Zivkovic V., Lazarevic M., Keskic T., Krnjaja V. Response of yield formation of maize hybrids to different planting densities. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, №3. Article 351. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030351>.

59. Mansfield B. D., Mumm R. H. Survey of plant density tolerance in U.S. maize germplasm. *Crop Science*. 2014. Vol. 54, №1. P. 157–173. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0252>.

60. Martin T. T. C., van der Werf L. J. G., Debaeke P., Bockstaller C., Doré T. Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *AgroNomy for Sustainable Development*. 2020. Vol. 40. Article 29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2>.

61. Mayer A., Ortuani B., Crema A., Boschetti M., Facchi A. Water and energy savings using variable rate sprinkler irrigation on a large maize farm in Northern Italy. *Agricultural Water Management*. 2026. Vol. 325. Article 110184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110184>.

62. Mazur P., Gozdowski D., Wójcik-Gront E. Soil electrical conductivity and satellite-derived vegetation indices for evaluation of phosphorus, potassium and magnesium content, pH, and delineation of within-field management zones. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, №6. Article 883. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12060883>.
63. McNutt G., Heaton E., Archontoulis S., Licht M., VanLoocke A. Using a crop modeling framework for precision cost-benefit analysis of variable seeding and nitrogen application rates. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2019. Vol. 3. Article 108. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00108>.
64. Medina-Cuéllar S. E., Tirado-González D. N., Portillo-Vázquez M., Orozco-Cirilo S., López-Santiago M. A., Vargas-Canales J. M., Medina-Flores C. A., Salem A. Z. M. Optimal Nitrogen Fertilization to Reach the Maximum Grain and Stover Yields of Maize (*Zea mays* L.): Tendency Modeling. *AgroNomy*. 2021. Vol. 11, №7. Article 1354. DOI: <https://doi.org/10.3390/agroNomy11071354>.
65. Meemken E.-M., Becker-Reshef I., Klerkx L., Kloppenburg S., Wegner J. D., Finger R. Digital inNovations for monitoring sustainability in food systems. *Nature Food*. 2024. Vol. 5, №8. P. 656–660. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01018-6>.
66. Meng C., Wang Z., Cai Y., Du F., Chen J., Xiao C. Effects of planting density and nitrogen (N) application rate on light energy utilization and yield of maize. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, №24. Article 16707. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416707>.
67. Miranda M. T., García-Mateos R., Arranz J. I., Sepúlveda F. J., Romero P., Botet-Jiménez A. Selective use of corn crop residues: energy viability. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, №7. Article 3284. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11073284>.
68. Moitzi G., Neugschwandtner R. W., Kaul H.-P., Wagentristl H. Comparison of energy inputs and energy efficiency for maize in a long-term tillage experiment under PanNonian climate conditions. *Plant, Soil and Environment*. 2021. Vol. 67, №5. P. 299–306. DOI: <https://doi.org/10.17221/67/2021-PSE>.

69. Munnaf M. A., Haesaert G., Van Meirvenne M., Mouazen A. M. Site-specific seeding using multi-sensor and data fusion techniques: a review. *Advances in AgroNomy*. 2020. Vol. 161. P. 241–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.08.001>.
70. OneSoil Platform. URL: <https://onesoil.ai/> (дата звернення: 10.05.2026).
71. Paris B., Vandorou F., Balafoutis A. T., Vaiopoulos K., Kyriakarakos G., MaNolakos D., Papadakis G. Energy use in open-field agriculture in the EU: A critical review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 158. Article 112098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112098>.
72. Pätzold S., Leenen M., Heggemann T. W. Proximal mobile gamma spectrometry as tool for precision farming and field experimentation. *Soil Systems*. 2020. Vol. 4, №2. Article 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems4020031>.
73. Peake A. S., Robertson M. J., Bidstrup R. J. Optimising maize plant population and irrigation strategies on the Darling Downs using the APSIM crop simulation model. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 2008. Vol. 48, №3. P. 313–325. DOI: <https://doi.org/10.1071/EA06108>.
74. Piccoli I., Grillo F., Furlanetto I., Ragazzi F., Obber S., Bonato T., Meneghetti F., Ferlito J., Saccardo L., Morari F. On-farm experimentation of anaerobic digestate distribution methods for advancing circular ecoNomy in the agroecosystem. *Precision Agriculture*. 2025. Vol. 26. Article 81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-025-10275-9>.
75. Pimentel D., Hurd L. E., Bellotti A. C., Forster M. J., Oka I. N., Sholes O. D., Whitman R. J. Food production and the energy crisis. *Science*. 1973. Vol. 182, №4111. P. 443–449. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.182.4111.443>.
76. Pimentel D., Pimentel M. H. Food, energy, and society. 3rd ed. CRC Press / Taylor & Francis Group, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420046687>.

77. Roccatallo E., PagaŃo A., Levorato N., Rumor M. State of the art in internet of things standards and protocols for precision agriculture with an approach to semantic interoperability. *Network*. 2025. Vol. 5, №2. Article 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/network5020014>.
78. Ruiz A., CastellaŃo M. J., Ferela A., TrifuNovic S., Eudy D. M., Gambin B. L., Danalatos G. J. N., Della Chiesa T., Northrup D., Archontoulis S. V. Large increases in maize residue carbon inputs in the US Corn Belt from 1980 to 2020. *Communications Earth & Environment*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-03078-3>.
79. Schillaci C., Tadiello T., Acutis M., Perego A. Reducing topdressing N fertilization with variable rates does Not reduce maize yield. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, №14. Article 8059. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13148059>.
80. Shah A. N., Tanveer M., Abbas A., Yildirim M., Shah A. A., Ahmad M. I., Wang Z., Sun W., Song Y. Combating dual challenges in maize under high planting density: stem lodging and kernel abortion. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Article 699085. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699085>.
81. Shakalii S. M., Bahan A. V., Yurchenko S. O., Marenych M. M., Liashenko V. V., Chetveryk O. O., Shokalo N. S., Zubenko V. V. Formation of grain yield in corn hybrids of different FAO groups depending on sowing dates and plant density. *AgroNomy Research*. 2024. Vol. 22, №3. P. 1284–1296. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.24.076>.
82. Shanahan J. F., Doerge T. A., Johnson J. J., Vigil M. F. Feasibility of site-specific management of corn hybrids and plant densities in the Great Plains. *Precision Agriculture*. 2004. Vol. 5, №3. P. 207–225. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000032762.72510.10>.
83. Silva G. M., Ferreira A. G., Coutinho R. M., Maia C. B. Energy and exergy analysis of the drying of corn grains. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 163. P. 1942–1950. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.116>.
84. Silva G. R., Liska A. J., Bayer C. Life cycle greenhouse gas emissions in maize No-till agroecosystems in southern Brazil based on a long-term experiment.

Sustainability. 2024. Vol. 16, №10. Article 4012. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16104012>.

85. Šarauskis E., Kazlauskas M., Naujokienė V., Bručienė I., Steponavičius D., Romanekas K., Jasinskas A. Variable rate seeding in precision agriculture: recent advances and future perspectives. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, №2. Article 305. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020305>.

86. Tian L., Shen Z., Zhao X., Zhang F., Hou W., Gao Q., Wang Y. Interactive effects of planting density and nitrogen application rate on plant grain yield and water use efficiency of two maize cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*. 2024. Vol. 57, №21. P. 4221–4237. DOI: <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2024.21.005>.

87. Tokatlidis I. S. Adapting maize crop to climate change. *AgroNomy for Sustainable Development*. 2013. Vol. 33, №1. P. 63–79. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0108-7>.

88. Tokatlidis I. S., Koutroubas S. D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Research*. 2004. Vol. 88, №2–3. P. 103–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.11.013>.

89. Truter K. J., Glas H., Delport M., Otterman H., Meyer F. H., Swanepoel P. A. Assessing seeding rate management strategies for maize production in South Africa. *Precision Agriculture*. 2026. Vol. 27. Article 37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-026-10335-8>.

90. Wang W., Wu K., Zhang Y., Wang M., Zhang C., Chen L. The development of an electric-driven control system for a high-speed precision planter based on the double closed-loop fuzzy PID algorithm. *AgroNomy*. 2022. Vol. 12, №4. Article 945. DOI: <https://doi.org/10.3390/agroNomy12040945>.

91. Xu L., An Z., Chen S., Zhang H., Jin X., Wang P. Effect of planting density on stem strength and ear characters of maize. *Journal of Henan Agricultural Sciences*. 2023. Vol. 52, №8. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.15933/j.cnki.1004-3268.2023.08.002>.

92. Xu T., Wang D., Si Y., Kong Y., Shao X., Geng Y., Lv Y., Wang Y. Plant growth regulators enhance maize (*Zea mays* L.) yield under high density by optimizing caNopy structure and delaying leaf senescence. *AgroNomy*. 2024. Vol. 14, №6. Article 1262. DOI: <https://doi.org/10.3390/agroNomy14061262>.
93. Yang M., Wang B., Lu H., Cheng J., Su Y., Zhao S., Zhang X., Cheng C., Qin G. Effects of planting density on grain filling characteristics and dry matter accumulation of maize. *Journal of Agriculture*. 2024. Vol. 14, №8. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.11923/j.issn.2095-4050.cjas2023-0153>.
94. Yin G., Fan X., Sun J., Hou W., Ma N., Gu J., Wang Y., Zhou M. Effects of increasing maize planting density on yield, water productivity and irrigation water productivity in China: a comprehensive meta-analysis incorporating soil and climatic factors. *Agricultural Water Management*. 2025. Vol. 317. Article 109671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109671>.
95. Zhang M., Zhao X., Han X., Chen Y., Dang P., Siddique K. H. M., Qin X., Xue J. Optimizing planting density for enhanced maize yield and resource use efficiency in China. A meta-analysis. *AgroNomy for Sustainable Development*. 2025. Vol. 45. Article 29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01027-0>.
96. Zhang S., Wang X., Lin H., Dong Y., Qiang Z. A review of the application of UAV multispectral remote sensing technology in precision agriculture. *Smart Agricultural Technology*. 2025. Vol. 12. Article 101406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101406>.
97. Zhu Y.-L., Wang C.-G., Yang M., Zheng X.-H., Zhao C.-F., Zhang R.-H. Response of grain filling and dehydration characteristics of kernels located in different ear positions in the different maturity maize hybrids to plant density. *Acta AgroNomica Sinica*. 2021. Vol. 47, №3. P. 507–519. DOI: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2021.03024>.
98. Аксьонов І. В., Кочченко М. В. Реакція гібридів кукурудзи на збільшення густоти рослин в агроценозі в умовах Північного Степу України. *Зернові культури*. 2024. Т. 8, № 1. С. 119–126. DOI: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0321>.

99. Бомба М., Литвин О., Мазурак І., Андрушко М., Бомба М. Урожайність гібридів кукурудзи залежно від густоти агрофітоценозу. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Агрономія*. 2025. Вип. 29. С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroNomy2025.29.086>.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Ґрунтово-кліматичні умови зони проведення досліджень

Дослідження виконували у північній частині України на базі ТОВ «ЧІМК» (Чернігівський район, Чернігівська область). Територія землекористування господарства географічно розташована у зоні переходу між Поліссям і Лісостепом (Vilous, 2010; Чернігівська область. Географічний атлас, 2003). Ця територія належить до контактної смуги між двома великими природно-географічними регіонами, які відрізняються едафічно-кліматичними чинниками, рослинним покривом та структурою землекористування. Перехідний характер зони зумовлений підвищеною просторовою неоднорідністю природних факторів, що має ключове значення для формування врожайності польових культур і обґрунтування адаптивних агротехнологій (Національний атлас України, 2009).

Помірно континентальний клімат Полісся характеризується значною часткою лісових масивів, відносно вищими показниками зволоженості та меншою сумою активних температур. Переважна більшість ґрунтів цієї зони має легкий гранулометричний склад (підвищені вміст піску та показники кислотності) та нижчий вміст гумусу. Зона Лісостепу вирізняється більш сприятливими агрометеорологічними умовами, кращою структурованістю ґрунтів та вищим рівнем природної родючості з інтенсивним сільськогосподарським використанням (Національний атлас України, 2009; Tarariko et al., 2024). Поєднання природних та антропогенних чинників зумовлює складну структуру землекористування. Значний вплив на формування агроландшафту має історично сформована структура розораних

земель, вирубування лісів на родючих ділянках, збереження або насадження лісових масивів на менш продуктивних ґрунтах. Крім того, факторами, що позитивно впливають на стан та продуктивність агроценозів є тип рослинного покриву (лісовий чи трав'янистий), його вплив на просторові характеристики ерозійних процесів та стан водного режиму території (Nykytiuk et al., 2024; Tarariko et al., 2021).

Просторове моделювання придатності вирощування сільськогосподарських культур у межах зони Полісся та Лісостепу підтверджує суттєві відмінності кліматичних та едафічних факторів, що в свою чергу зумовлює різний агровиробничий потенціал сільськогосподарських угідь (Nykytiuk et al., 2025). У зв'язку з цим зростає потреба геопросторового моделювання з урахуванням варіативності ґрунтових умов, кліматичних прогнозів, топографічних особливостей та адаптивного потенціалу регіональних агросистем, а також антропогенного впливу.

За допомогою прогностичних моделей можна ідентифікувати території з потенційним зростанням або зниженням врожайності, а також оцінити можливості ротації сільськогосподарських культур. Сучасні зміни клімату призводять до трансформації просторового сільськогосподарського землекористування, що найбільше проявляється у перехідних ґрунтово-кліматичних регіонах. У зонах Полісся та Лісостепу наразі встановлені тенденції до зміщення агрокліматичних меж, в результаті змін співвідношення тепла і вологи, внаслідок чого відбувається перерозподіл зон придатності вирощування основних сільськогосподарських культур (Tarariko et al., 2024). Моделювання придатності кукурудзи для вирощування в цих двох зонах показало, що просторові обмеження визначаються температурним режимом, варіативністю ґрунтових характеристик, зокрема щільністю, вмістом азоту, рівнем зволоження тощо (Nykytiuk & Kravchenko, 2025).

Важливою особливістю перехідної території між Поліссям і Лісостепом є мозаїчність ґрунтів в межах одного адміністративного району. Це виражено локальним чередуванням дерново-підзолистих ґрунтів з підвищеним вмістом

піску та схильністю до перезволоження, з сірими лісовими ґрунтами та опідзоленими чорноземами з гарними агрофізичними властивостями (Bilous, 2010; Національний атлас України, 2009). Таким чином, поєднання гранулометричного складу ґрунтів і структури рослинного покриву, вплив просторової варіабельності ерозійного потенціалу опадів формує специфічні регіональні моделі агроландшафтної неоднорідності зон Полісся та Лісостепу (Nykytiuk et al., 2024).

Всі вище перелічені едафо-кліматичні чинники також мають суттєвий вплив на формування просторової динаміки врожайності сільськогосподарських культур. Для прикладу, наведемо дані для екорегіонів Центральноевропейських змішаних лісів (Полісся) та Східноевропейського Лісостепу. Результати досліджень показали, що 34–58 % варіації рівня врожайності пояснюється саме едафо-кліматичними факторами, серед яких провідне значення мають текстура ґрунту та вміст органічного вуглецю, серед кліматичних факторів – континентальність і температурна мінливість упродовж вегетаційного періоду (Zymarioieva et al., 2021). В свою чергу це підтверджує те, що перехідну зону між Поліссям і Лісостепом характеризує не лише широтний градієнт умов, а й складна внутрішня просторова структура.

В сучасних умовах для агроєкологічного зонування все більше використовують підходи, розроблені на основі дистанційних методів моніторингу та аналізу вегетаційних індексів. В результаті використання NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для визначення стану розвитку посівів, класифікації польових культур та виділення агроєкологічних зон підтверджені виразні регіональні відмінності умов вирощування кукурудзи, сої та соняшнику, з вищими значеннями NDVI в західних і нижчих – у східних регіонах України (Lykhovud, 2023). В свою чергу, це підтверджує наявність просторового градієнта агрокліматичного потенціалу, і його кореляцію з тепловим режимом, зволоженням та властивостями ґрунтів (Tarariko et al., 2024).

Таким чином, зона проведення досліджень має виражену агроландшафтну мозаїчність, поєднує ознаки двох ґрунтово-кліматичних зон – Полісся та Лісостепу з просторовою неоднорідністю ґрунтового покриву, нерівномірним рівнем зволоження, варіабельністю теплового забезпечення, що формує специфіку структури землекористування та зумовлює значну внутрішньопольову диференціацію умов вирощування сільськогосподарських культур. Всі ці фактори є підґрунтям для застосування адаптивних технологій, зокрема застосування диференційованої норми висіву кукурудзи, яка дає змогу враховувати локальні природні відмінності та підвищувати ефективність використання ресурсів у виробничих системах (Ivaniuta, 2020).

Погодні умови вегетаційних періодів 2023–2025 років наведено у додатках В, С, D, на яких видно суттєву міжрічну варіабельність як температурного режиму, так і характеру розподілу атмосферних опадів. Відмічено хвилеподібне коливання температурного фону упродовж періоду активної вегетації кукурудзи, встановлено періоди з підвищеним тепловим навантаженням та відносним зниженням температури, що мало різний вплив на фази росту й розвитку рослин. Розподіл опадів мав виражений епізодичний характер у межах сезонів і був досить нерівномірним. Виділено окремі періоди з тривалими бездошовими інтервалами, які закінчувалися короточасними інтенсивними дощами. Такий стан зволоження формував контрастні умови водозабезпечення рослин: від періодів достатнього або навіть надлишкового зволоження до фаз тимчасового дефіциту вологи, особливо у другій половині літа. Помітною є різниця у поєднанні температури та опадів між сезонами. В одні роки вегетаційний період характеризувався більш рівномірним тепловим режимом і відносно стабільним зволоженням, тоді як в інші – спостерігалися хвилі спеки на фоні зменшення кількості опадів або їх локалізації в окремих коротких періодах. Така мінливість створювала різний рівень стресового навантаження на посіви кукурудзи залежно від фази росту й розвитку рослин. Зазначені відмінності погодних умов між роками є методично важливими для інтерпретації результатів дослідження. Варіабельність температурного

режиму та водозабезпечення дозволяє оцінити ефективність диференційованої норми висіву не лише в умовах відносно сприятливого року, а й у періоди з підвищеним тепловим та водним стресом. Таким чином, аналіз продуктивності та біоенергетичної ефективності кукурудзи проводиться в широкому діапазоні агрокліматичних сценаріїв, що підвищує репрезентативність отриманих результатів і дозволяє більш обґрунтовано оцінити адаптивність досліджуваної технології.

З даних таблиці 2.1 видно, що гідротермічні умови вегетаційного періоду кукурудзи у 2023 році були досить варіабельними із значною нерівномірністю розподілу опадів та температурними показниками. Найбільш сприятливі умови зволоження відмічені в травні та червні (ГТК 1,77–1,82), період вегетації липень–вересень проходив з вираженим дефіцитом вологи: у липні та серпні ГТК становив 0,56–0,66, а у вересні – лише 0,01, тобто умови цього періоду були дуже посушливі.

Таблиця 2.1

Гідротермічний коефіцієнт вегетаційного періоду кукурудзи сезону 2023 року

Місяць	Опади, мм	Σ темп. >10°C	Середня t°C	Макс °C	Мін °C	ГТК	Оцінка
Квітень	13	73	10,5	20	-1	1,78	Надмірне зволоження
Травень	12	405	14,3	26	-1	0,3	Дуже посушливо
Червень	84	583	17,5	32	9	1,44	Норма
Липень	150	660	21,6	33	12	2,27	Надмірне зволоження
Серпень	29	712	22,9	33	6	0,41	Дуже посушливо
Вересень	26,4	520	16,7	30	7	0,51	Посушливо
Жовтень	81,2	212	9,1	21	-6	3,83	Надмірне зволоження
Вегетація (травень– вересень)	301,4	2880				1,05	Норма

Аналіз вегетаційного періоду кукурудзи (травень–вересень) показав, що гідротермічний коефіцієнт становив 0,87, що відповідає посушливим умовам,

що свідчить про можливе обмеження реалізації біологічного потенціалу формування врожайності кукурудзи, особливо у критичні репродуктивні фази – цвітіння та налив зерна.

Вегетаційний період кукурудзи 2024 року характеризувався різко вираженим дефіцитом вологи, особливо на початкових етапах вегетації (таблиця 2.2). Період сходів та початкового росту у травні місяці супроводжувалися критично посушливими умовами (ГТК 0,05), що мало негативний вплив на ріст і розвиток рослин кукурудзи. Погодні умови з близьким до оптимального рівнем зволоження (ГТК 1,02) відмічено у червні місяці. Подальший період вегетації (липень–вересень) мав посушливі та дуже посушливі умови (ГТК 0,90–0,13).

Таблиця 2.2

Гідротермічний коефіцієнт вегетаційного періоду кукурудзи сезону 2024 року

Місяць	Опади , мм	Σ темпе ратур >10°C	Середн я °C	Макс °C	Мін °C	ГТК	Оцінка
Квітень	5	90	11,4	20	1	0,56	Посушливо
Травень	2	385	14,7	28	1	0,05	Дуже посушливо
Червень	57	559	18,6	31	5	1,02	Норма
Липень	56	621	20	31	9	0,9	Посушливо
Серпень	29	687	22,2	35	11	0,42	Дуже посушливо
Вересень	6,8	514,2	17,1	27,8	5	0,13	Дуже посушливо
Жовтень	45,2	159,1	9,4	24	-1,7	2,84	Надмірне зволоження
Вегетація (трав–вер)	150,8	2766,2				0,55	Посушливо

Середнє значення ГТК, що вказує на рівень зволоження 0,55 за вегетаційний період з травня по вересень вказує на значний дефіцит вологи та наявність стресових умов для росту і розвитку кукурудзи в критичні фази органогенезу. Дані гідротермічних умов вегетаційного періоду у 2025 році наведено у таблиці 2.3. Аналіз отриманих даних показує, що вегетація рослин кукурудзи відбувалася у більш оптимальних та сприятливих умовах, ніж у

2023–2024 роках, однак виділені періоди з нерівномірним розподілом опадів. Надмірне зволоження (ГТК 1,77–1,82) відмічено в травні–червні, тому можемо стверджувати, що такі умови сприяли формуванню вегетативної маси рослин. Посушливі умови липня–серпня (ГТК 0,56–0,66) та дуже посушливі у вересні місяці (ГТК 0,30) могли обмежувати формування врожаю зерна кукурудзи.

Таблиця 2.3

Гідротермічний коефіцієнт вегетаційного періоду кукурудзи сезону
2025 року

Місяць	Опади , мм	Σ темпера тур >10°C	Серед ня °C	Макс °C	Мін °C	ГТК	Оцінка
Квітень	8,6	133	14	28	-1	0,65	Посушливо
Травень	55,2	311	13,1	26	-1	1,77	Надмірне зволоження
Червень	95,5	524	17,5	32	9	1,82	Надмірне зволоження
Липень	37,6	669	21,6	33	12	0,56	Посушливо
Серпень	38	574	18,5	33	6	0,66	Посушливо
Вересень	12,8	423,5	15,5	30	-1	0,3	Дуже посушливо
Жовтень	48,4	119,8	8,6	16,1	1,2	4,04	Надмірне зволоження
Вегетація (трав–вер)	239,1	2501,5				0,96	Посушливо

Характеризуючи в загальному вегетаційний період 2025 року, відмічено середній показник ГТК 0,96, тобто умови росту й розвитку були помірно посушливі, тому є більш сприятливими для формування врожаю порівняно з 2023 та особливо 2024 роками.

Дані міжрічної варіабельності гідротермічних умов вирощування кукурудзи наведені в таблиці 2.4., на основі яких виділяємо 2024 рік, як найбільш посушливий (ГТК 0,55). Метеоумови вегетаційних періодів кукурудзи у 2023 та 2025 роках відмічені, як менш стресові (ГТК 1,05 та 0,96 відповідно). Достатнє або надмірне зволоження у весняно-ранньолітній період

та дефіцит вологи у другій половині вегетації, особливо у серпні–вересні, відмічено нами як спільна закономірність у всі роки досліджень

Таблиця 2.4

Порівняльна оцінка показника ГТК за роки проведених досліджень

Місяць	2023			2024			2025		
	Опади, мм	Σ °C	ГТК	Опади, мм	Σ °C	ГТК	Опади, мм	Σ °C	ГТК
Квітень	13	73	1,78	5	90	0,56	8,6	133	0,65
Травень	12	405	0,3	2	385	0,05	55,2	311	1,77
Червень	84	583	1,44	57	559	1,02	95,5	524	1,82
Липень	150	660	2,27	56	621	0,9	37,6	669	0,56
Серпень	29	712	0,41	29	687	0,42	38	574	0,66
Вересень	26,4	520	0,51	6,8	514	0,13	12,8	424	0,3
Жовтень	81,2	212	3,83	45,2	159	2,84	48,4	120	4,04
Вегетація (трав–вер)	301,4	2880	1,05	150,8	2766	0,55	239,1	2502	0,96

За весь період досліджень виділяється вересень місяць, коли ріст і розвиток рослин відбувався в особливо критичних умовах: ГТК у різні роки коливався в межах 0,01–0,30, що свідчить про стабільний дефіцит вологи у фазу наливу зерна. Саме цей фактор, що зберігав стабільну тенденцію міг обмежувати реалізацію потенціалу врожайності кукурудзи незалежно від рівня забезпечення елементами живлення.

Досліджуючи фізичні властивості ґрунту нами проведено вимірювання твердості ґрунту (опору проникненню) в різних зонах продуктивності поля, використовуючи пенетрометр. Дані вимірювання наведені в таблиці 2.5. В результаті цих досліджень встановлено чітку закономірність зростання твердості ґрунту з глибиною по всіх досліджуваних зонах продуктивності поля. Мінімальні значення опору проникненню пенетрометра (0,4–1,3 кПа залежно від зони) зафіксовані нами у шарі ґрунту 0–10 см., що означає наявність відносно сприятливих умов для проростання насіння та початкового розвитку кореневої системи. На глибині 15–20 см відмічено інтенсивне зростання твердості ґрунту. Формування ущільненого горизонту зафіксовано нами у шарі 30–40 см, де значення твердості досягали максимальних рівнів –

до 4,1 кПа в низькопродуктивній зоні. Це вказує на сформований ущільнений горизонт, що здатний обмежувати проникнення коренів рослин.

Таблиця 2.5.

Вертикальний розподіл твердості ґрунту залежно від зони продуктивності поля, кПа

Глибина, см	Показник твердості ґрунту для зон продуктивності поля, кПа		
	Низької	Середньої	Високої
0,0	0,8	0,6	0,4
2,5	0,9	0,7	0,5
5,0	1,0	0,8	0,6
7,5	1,2	1,0	0,7
10,0	1,3	1,1	0,9
12,5	1,4	1,2	1,0
15,0	1,6	1,4	1,1
17,5	1,9	1,5	1,2
20,0	2,1	1,7	1,3
22,5	2,4	1,9	1,4
25,0	2,6	2,1	1,6
27,5	2,9	2,3	1,7
30,0	3,1	2,5	1,8
32,5	3,4	2,8	1,9
35,0	3,6	3,0	2,1
37,5	3,9	3,2	2,2
40,0	4,1	3,3	2,3
42,5	4,0	3,2	2,2
45,0	3,9	3,0	2,1

Порівняльний аналіз зон продуктивності показав, що найвищі значення твердості ґрунту характерні для низькопродуктивної зони, у високопродуктивній зоні опір проникненню пенетрометра був стабільно нижчим по всьому профілю. У шарі 30–35 см твердість у низькопродуктивній

зоні перевищувала показники високопродуктивної зони майже в 1,7 раз, що свідчить про істотні відмінності у фізичному стані ґрунту в межах одного поля. Така різниця підтверджує значну роль просторової неоднорідності агрофізичних властивостей ґрунту в формуванні зон продуктивності.

Отримані нами результати дослідження твердості ґрунту узгоджуються з даними сучасних досліджень про те, що підвищення щільності та опору проникненню суттєво обмежує розвиток кореневої системи кукурудзи. Встановлено, що зменшення довжини, площі та маси коренів, зниження їх фізіологічної активності відбувається при ущільненні ґрунту (1,45–1,60 г/см³). В кінцевому результаті це призводить до зниження врожайності, особливо за високих норм висіву (Gao et al., 2025). Проходи техніки зумовлюють ущільнення верхнього шару ґрунту, відповідно зростають показники щільності та опору проникненню (до +127 % у шарі 10–20 см), що призводить до поверхневого розміщення коренів та зниження біомаси. Як наслідок, відбувається втрата врожайності зерна на рівні 7,6–15,5 % (Latifmanesh et al., 2023). Встановлено, що обмеження росту коренів кукурудзи відбувається при значенні показника твердості ґрунту вище 12 МПа, який є критичним, оскільки саме в цьому діапазоні відбувається різке зниження глибини проникнення кореневої системи. Однак така реакція рослин залежить не лише від рівня ущільнення, але й від анатомічних особливостей коренів, зокрема розвитку аеренхіми та будови кортикальних тканин (Vanhees et al., 2020).

Підвищення вологості ґрунту має негативний вплив та сприяє посиленню ущільнення. Встановлено, що довжина коренів може зменшуватись до 70 % за умов високої вологості (80 % ППК. При цьому Відмічено, що гідравлічна провідність кореневої системи суттєво погіршується, обмежується водопостачання рослин і їх продуктивність (Fu et al., 2026).

З отриманих досліджень робимо висновок про те, що твердість ґрунту є одним із ключових факторів для розвитку кореневої системи кукурудзи. Це вказує на той факт, що збільшення показника опору проникненню

пенетрометра з глибиною, а також його локально-просторові відмінності в межах поля, формують неоднорідність водного та поживного режимів, які є основою для реалізації біологічного потенціалу на формування високих показників врожаю. Таким чином, сучасні диференційовані агротехнології, в тому числі з застосуванням диференційованої норми висіву насіння повинні базуватися на показниках просторової варіабельності фізичних властивостей ґрунту. Формування продуктивності агроценозів відбувається з урахуванням фізико-хімічних властивостей орного шару ґрунту, оскільки вони є визначальними та регулюють доступність елементів живлення, водний режим і біологічну активність ґрунту. Ґрунтовий покрив території, де проводилися дослідження притаманний для перехідної зони між Поліссям і Лісостепом, тому досить варіабельний через просторово-нерівномірне поєднання дерново-підзолистих, сірих лісових ґрунтів та опідзолених чорноземів (Rasporina & Ivanysheva, 2024; Matviiv, 2022). Сорбційні та водно-фізичні властивості ґрунту визначає його гранулометричний склад. Поліські ґрунти переважно легкі за механічним складом, мають низький вміст глинистих часток (у середньому близько 8 %), що обумовлює низьку ємність вбирання, підвищену водопроникність та обмежену здатність до акумуляції органічної речовини (Rasporina & Ivanysheva, 2024). Сірі лісові ґрунти та опідзолені чорноземи мають вищу водоутримувальну здатність та потенційну родючість (Matviiv, 2022). Вивчаючи фізико-хімічні показники ґрунту на дослідному полі, відмічено чіткий зв'язок між ними та рівнем продуктивності (таблиця 2.6). Отримані дані підтвердили визначальну роль цих показників у формуванні продуктивності кукурудзи. Кисла реакція ґрунтового середовища (рН 4,93), низька ємність катіонного обміну (5,03 смоль/кг), а також мінімальний вміст гумусу (1,0 %) були відмічені нами на ділянках з низькопродуктивними зонами. Такі показники обмежують буферність і створюють низьку забезпеченість елементами живлення, врожайність при цьому становила 5,75–9,0 т/га.

Таблиця 2.6.

Зв'язок агрохімічних показників ґрунту із урожайністю кукурудзи в різних
зонах продуктивності

Зона продуктивності	pH _{cl}	Ємність катіонного обміну, смоль/кг	Уміст гумусу, %	Урожайність, т/га		
				2023 р.	2024 р.	2025 р.
Низької	4,93	5,03	1,00	7,95	5,75	9,0
Середньої	5,40	8,88	1,60	9,64	7,87	11,1
Високої	6,30	11,07	2,30	11,05	9,47	11,8

Покращені агрохімічні показники: рН до 5,40, ємність катіонного обміну – до 8,88 смоль/кг, вміст гумусу – до 1,6 %, були відмічені у середньопродуктивній зоні. При цьому врожайність збільшена до 7,87–11,1 т/га. Високопродуктивна зона із значеннями рН 6,30 ємністю катіонного обміну – 11,07 смоль/кг, вмістом гумусу – 2,3 % є найбільш сприятливою, де урожайність кукурудзи досягала 9,47–11,8 т/га.

Вміст гумусу визначає його структуру, біологічну активність, здатність утримувати поживні елементи та виступає ключовим інтегральним показником родючості. Для дерново-підзолистих ґрунтів характерний його низький рівень (близько 1,5 %), що пов'язано з інтенсивними процесами вилуговування (Rasporina & Ivanysheva, 2024). Водночас у більш родючих ґрунтах перехідної зони накопичення органічної речовини є вищим, що сприяє покращенню фізико-хімічних властивостей і продуктивності (Matviiv, 2022). На доступність поживних елементів та активність мікробіологічних процесів впливає реакція ґрунтового розчину (рН). Кислі ґрунти Полісся (рН ~4,6) обмежують доступність фосфору, відповідно знижуючи ефективність використання добрив (Rasporina & Ivanysheva, 2024). Тривале застосування мінеральних добрив без вапнування може посилювати підкислення ґрунту, тоді як органо-мінеральні системи удобрення сприяють стабілізації кислотно-лужного балансу (Tkachenko et al., 2023). Ємність катіонного обміну є

інтегральним показником здатності ґрунту утримувати поживні елементи та прямо залежить від вмісту гумусу і глинистих часток. Низькі його значення у легких ґрунтах обмежують акумуляцію катіонів. Стабільне живлення рослин забезпечується завдяки вищому показнику ємності катіонного обміну, який притаманний більш важким ґрунтам (Zymarioieva et al., 2021). Отже, вміст гумусу, реакція ґрунтового розчину та ємність катіонного обміну є ключовими факторами, які визначають просторову неоднорідність продуктивності кукурудзи в межах поля. Підвищення цих показників у високопродуктивних зонах забезпечує кращі умови живлення рослин, що безпосередньо відображається на рівні врожайності.

У межах досліджень також визначали вміст мінеральних форм азоту (NH_4^+ та NO_3^-), рухомого фосфору та обмінного калію в орному шарі ґрунту (0–20 см) у розрізі зон продуктивності поля. Отримані результати наведено у таблиці 2.7

Таблиця 2.7.

Вміст макроелементів у ґрунті залежно від зони продуктивності та його вплив на урожайність кукурудзи

Зона продуктивності	NH_4^+ , мг/кг	NO_3^- , мг/кг	Р, мг/кг	К, мг/кг	Урожайність, т/га		
					2023 р.	2024 р.	2025 р.
Низької	3,98	5,10	34,00	91,15	7,95	5,75	9,0
Середньої	7,60	6,62	66,47	77,31	9,64	7,87	11,1
Високої	10,72	7,30	85,35	90,05	11,05	9,47	11,8

Як видно із даних таблиці 2.7, між зонами продуктивності встановлено чітку диференціацію забезпеченості макроелементами, що узгоджується з їх рівнем урожайності. У низькопродуктивній зоні вміст амонійного азоту становив 3,98 мг/кг, нітратного – 5,10 мг/кг, що свідчить про обмежений запас доступного азоту. У середньопродуктивній зоні ці показники зростали до 7,60 і 6,62 мг/кг відповідно, тоді як у високопродуктивній зоні досягали 10,72 і 7,30 мг/кг. Дані, що свідчать про зростання сумарного вмісту мінерального азоту ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)

у напрямку від низько- до високопродуктивної зони відповідають сучасними уявленнями про роль азотного режиму у формуванні врожайності кукурудзи. Підтверджено, що у ґрунтах з вищою родючістю саме доступні форми азоту та органічний вуглець є ключовими факторами варіації врожайності (Zou et al., 2024). Вміст мінерального азоту в ґрунті є динамічним показником і не завжди синхронізується з періодами максимального споживання азоту рослинами кукурудзи (Zhu et al., 2025). Фосфорний режим ґрунту також суттєво відрізнявся між зонами. У низькопродуктивній зоні вміст рухомого фосфору становив 34,00 мг/кг, у середньопродуктивній – 66,47 мг/кг, а у високопродуктивній 85,35 мг/кг. Така градація відповідає концепції критичних рівнів забезпеченості фосфором, згідно з якою за перевищення певного порогу ефективність використання фосфору зростає, а відгук культури на внесення добрив зменшується (Ibrahim et al., 2021). Водночас навіть за високого вмісту рухомого фосфору рослини можуть проявляти різну ефективність його використання залежно від агрофону та фізіологічних особливостей (Xia et al., 2019). Вміст обмінного калію у ґрунті не мав прямолінійної залежності від рівня продуктивності: у низькопродуктивній зоні він становив 91,15 мг/кг, у середньопродуктивній – 77,31 мг/кг, у високій – 90,05 мг/кг. Це узгоджується з даними про те, що показники калію в орному шарі не завжди відображають фактичну забезпеченість культури цим елементом упродовж вегетації. Значна частина калію може мобілізуватися з підорних горизонтів або надходити за рахунок мінералізації рослинних решток, що зумовлює просторову варіабельність його вмісту (Correndo et al., 2021; Oltmans & Mallarino, 2015). Аналіз урожайності підтверджує визначальну роль макроелементів у формуванні продуктивності кукурудзи. У низькопродуктивній зоні врожайність становила 5,75–7,95 т/га, у середньопродуктивній – 7,87–9,64 т/га, тоді як у високій – 9,47–11,05 т/га. Підвищення врожайності чітко корелює зі зростанням забезпеченості азотом і фосфором, тоді як калійний режим має більш складний характер впливу. Таким чином, встановлено, що просторова варіабельність забезпеченості ґрунту макроелементами є одним із ключових

чинників формування зон продуктивності. Найбільш стабільний зв'язок із урожайністю виявлено для азотного та фосфорного режимів, тоді як калійний режим потребує оцінки з урахуванням глибших шарів ґрунту та динаміки елемента в системі ґрунт–рослина.

У межах досліджень було визначено вміст вторинних елементів живлення (Ca, Mg, S) та мікроелемента Fe в орному шарі ґрунту (0–20 см) у розрізі зон продуктивності. Результати наведено у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8.

Вміст мезоелементів у ґрунті та його вплив на урожайність кукурудзи в різних зонах продуктивності

Зона продуктивності	Ca	Mg	Fe	S	Урожайність, т/га		
	мг/кг				2023 р.	2024 р.	2025 р.
Низької	667	64,80	51,08	4,75	7,95	5,75	9,0
Середньої	1234	53,31	85,54	4,03	9,64	7,87	11,1
Високої	1892	47,95	120,75	3,60	11,05	9,47	11,8

Відповідно до таблиці 2.4, встановлено чітку диференціацію вмісту кальцію та магнію між зонами продуктивності. У низькопродуктивній зоні вміст кальцію становив 667 мг/кг, у середньопродуктивній – 1234 мг/кг, а у високій – 1892 мг/кг. Зростання вмісту обмінного Ca^{2+} прямо пов'язане зі зниженням кислотності ґрунту та покращенням доступності елементів живлення, зокрема фосфору, що підтверджується результатами досліджень щодо ефективності вапнування в системі вирощування кукурудзи (Qaswar et al., 2020; Yadesa et al., 2019). Це узгоджується з отриманими раніше даними щодо підвищення рН у більш продуктивних зонах. Вміст магнію також зростав від низької (51,08 мг/кг) до високої зони (120,75 мг/кг), що свідчить про покращення умов фотосинтетичної активності рослин. Магній є центральним елементом молекули хлорофілу та відіграє ключову роль у процесах фотосинтезу, а його дефіцит може обмежувати продуктивність навіть за достатнього забезпечення іншими елементами (Ahmed et al., 2020; Wang et al.,

2020). Водночас встановлено, що між Mg і K існує антагонізм, що може впливати на баланс живлення рослин і пояснює відсутність прямої залежності між калієм і врожайністю у попередньому підрозділі. Вміст заліза у ґрунті мав зворотну тенденцію: від 64,80 мг/кг у низькопродуктивній зоні до 47,95 мг/кг у високій. Це пояснюється тим, що за підвищення рН доступність Fe зменшується, однак фізіологічна здатність кукурудзи до його засвоєння залежить не лише від концентрації в ґрунті, а й від ефективності корневих механізмів поглинання та транспорту (Shi et al., 2018; Saridis et al., 2019). Тому нижчий вміст Fe у більш продуктивних зонах не обмежував формування врожаю. Вміст сірки у ґрунті варіював у межах 3,60–4,75 мг/кг і не демонстрував чіткої залежності від рівня продуктивності. Це узгоджується з результатами досліджень, які показують, що ефективність сірчаного живлення визначається не лише її вмістом у ґрунті, а й процесами мінералізації органічної речовини та формою внесених добрив (Mahal et al., 2022; Kovar, 2021). У ряді випадків дефіцит сірки може проявлятися навіть за відносно стабільних показників її вмісту в орному шарі. Аналіз урожайності підтверджує, що підвищення вмісту кальцію та магнію у ґрунті супроводжується зростанням продуктивності кукурудзи. У високопродуктивній зоні, де зафіксовано максимальні значення Ca і Mg, урожайність досягала 9,47–11,8 т/га, тоді як у низькопродуктивній зоні – 5,75–9,0 т/га. Таким чином, вторинні елементи живлення відіграють важливу роль у формуванні продуктивності кукурудзи, впливаючи як на фізико-хімічні властивості ґрунту, так і на фізіологічні процеси рослин. Найбільш вагомий вплив у межах дослідження мали кальцій і магній, тоді як залізо та сірка проявляли більш складний, опосередкований характер дії.

За результатами таблиці 2.9 простежується чітка різниця у вологозабезпеченні ґрунту між зонами продуктивності вже на ранніх етапах росту кукурудзи (фаза V2–V4). Найвищі значення об'ємної вологості ґрунту спостерігались у високопродуктивній зоні, де середній показник за 2023–2025 рр. становив 26,7%, тоді як у середній зоні – 22,2%, а в низькопродуктивній –

лише 18,9%. Це свідчить про кращу здатність високопродуктивних ділянок накопичувати й утримувати вологу, що, ймовірно, створює більш сприятливі умови для стартового росту рослин.

Вологозабезпечення ґрунту визначали за допомогою портативного приладу для польових досліджень ґрунту типу Soil Research Logger (DS Logger 500 із датчиком DSM 600) виробництва Agro Flow System. Прилад дозволяє проводити оперативне вимірювання об'ємного вмісту води в ґрунті (Volumetric Water Content, VWC, %). Оцінку вологості проводили у дві ключові фази розвитку кукурудзи: V2–V4, коли відбувається активне формування кореневої системи та закладання потенціалу продуктивності, а також у фазу R1, яка є критичною щодо потреби рослин у воді під час цвітіння та запилення.

Таблиця 2.9.

Стан вологозабезпечення ґрунту (VWC, %) у фазу V2-V4 кукурудзи по зонах продуктивності

Зона продуктивності	Глибина, см	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Низької	15	21,5	16,0	18,5	18,7
	30	22,0	18,5	20,0	20,2
	45	20,5	17,0	19,0	18,8
	60	19,0	16,5	18,0	17,8
	Avg, %	20,7	17,0	18,9	18,9
Середньої	15	24,0	19,0	21,5	21,5
	30	25,5	22,0	23,5	23,7
	45	24,0	20,5	22,5	22,3
	60	22,5	20,0	21,5	21,3
	Avg, %	24,0	20,4	22,3	22,2
Високої	15	28,0	23,0	25,5	25,5
	30	30,5	26,5	28,0	28,3
	45	29,0	25,0	26,5	26,8
	60	27,5	24,5	25,5	25,8
	Avg, %	28,8	24,8	26,4	26,7

Якщо подивитися на розподіл води по глибині, то майже в усіх зонах найбільші значення VWC відмічались у шарі 30 см. Наприклад, у зоні високої

продуктивності середнє значення на цій глибині становило 28,3%, тоді як на глибині 60 см 25,8%. Подібна тенденція спостерігалась і в середній зоні, де показники поступово знижувались із глибиною. У низькопродуктивній зоні різниця між шарами була менш вираженою, однак загальний рівень вологозабезпечення залишався найнижчим.

У фазу початку цвітіння кукурудзи (R1) закономірність розподілу вологи між зонами продуктивності загалом зберігалася (табл. 2.10), проте характер її розподілу дещо змінювався. Найвищий рівень вологозабезпечення знову відмічено у високопродуктивній зоні – у середньому 27,6%, тоді як у середньопродуктивній зоні цей показник становив 22,7%, а у низькій – 20,0%. Тобто навіть у критичний період розвитку рослин більш продуктивні ділянки поля краще утримували доступну вологу.

Таблиця 2.10.

Стан вологозабезпечення ґрунту (VWC, %) у фазу R1 кукурудзи по зонах продуктивності

Зона продуктивності	Глибина, см	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Низька	15	21,0	15,0	18,0	18,0
	30	24,5	17,0	20,5	20,7
	45	25,0	16,5	21,0	20,8
	60	25,0	16,0	21,0	20,7
	Avg, %	23,9	16,1	20,1	20,0
Середня	15	23,0	17,0	20,0	20,0
	30	27,0	20,0	23,5	23,5
	45	28,0	19,5	24,0	23,8
	60	27,5	19,5	23,5	23,5
	Avg, %	26,4	19,0	22,8	22,7
Висока	15	27,0	21,0	24,0	24,0
	30	32,0	25,0	28,5	28,5
	45	33,0	24,5	29,0	28,8
	60	33,0	24,5	29,0	28,8
	Avg, %	31,3	23,8	27,6	27,6

На відміну від ранньої фази розвитку, у період R1 у середній та високій зонах вологість ґрунту була вищою в глибших шарах 30–60 см. Наприклад, у

високопродуктивній зоні на глибині 45–60 см середній показник досягав 28,8%, тоді як у верхньому шарі (15 см) становив 24,0%. Це може свідчити про активніше використання поверхневої вологи рослинами та більшу роль глибших горизонтів у забезпеченні посівів водою під час інтенсивного росту і формування генеративних органів.

2.2. Характеристика гібридів кукурудзи, схема дослідів, варіанти норм висіву

У дослідженнях використовували гібрид кукурудзи ДКС 3939, який належить до зернового напрямку використання та характеризується високим потенціалом урожайності і доброю адаптивністю до умов різних ґрунтово-кліматичних зон. За даними Державного реєстру сортів рослин України, придатних для поширення в Україні, цей гібрид зареєстрований у 2015 році та рекомендований для вирощування в умовах України як високопродуктивний зерновий гібрид середньоранньої групи стиглості з числом ФАО близько 320.

За біологічними особливостями гібрид ДКС 3939 належить до середньоранніх гібридів, для яких характерна тривалість вегетаційного періоду в межах 100–120 діб залежно від погодних умов року вирощування. Реалізація його продуктивного потенціалу значною мірою визначається температурним режимом упродовж вегетації, особливо у критичні фази розвитку. Зокрема, підвищення температури повітря понад 35°C призводить до пригнічення процесів утворення пилку, а за температури 38°C і вище формується повний тепловий стрес, що істотно знижує запліднення і, відповідно, врожайність. У межах 30–35°C у період викидання волоті та цвітіння життєздатність пилку обмежується приблизно 2 годинами, що підвищує ризик неповного запилення. Водночас гібрид характеризується підвищеною посухостійкістю, що дозволяє частково компенсувати негативний вплив високих температур. Нижній температурний поріг активного росту становить близько 8°C, при зниженні до якого сповільнюються фізіолого-біохімічні процеси та затримується розвиток рослин. За результатами

досліджень, проведених у виробничих умовах Лісостепу України, тривалість вегетації гібридів кукурудзи може змінюватися залежно від температурного режиму та забезпечення вологою, однак у більшості випадків середньоранні гібриди характеризуються відносно стабільними міжфазними періодами розвитку (Гайдай та ін., 2022). Це забезпечує добру адаптацію таких гібридів до умов помірного клімату та дозволяє ефективно використовувати агрокліматичні ресурси регіону.

Біометричні показники рослин гібриду ДКС 3939 характеризуються значною варіабельністю залежно від погодних умов та технології вирощування. За результатами польових досліджень встановлено, що висота рослин може коливатися в межах 235–300 см, що відносить даний гібрид до середньорослих форм кукурудзи. Кількість листків на рослині змінюється незначно і, як правило, становить 11,8–13,3 листка, що свідчить про генетичну стабільність цього показника. При цьому формування елементів індивідуальної продуктивності, таких як довжина і маса початку, істотно залежить від умов вирощування та генетичних особливостей гібриду (Гайдай та ін., 2022). Середня довжина початку у досліджуваних гібридів кукурудзи, включаючи ДКС 3939, у різні роки досліджень варіювала від 19,5 до 26,0 см, а маса початку змінювалася в широких межах – від 159 до 391 г. За результатами кореляційного аналізу встановлено тісний прямий зв'язок між врожайністю зерна та такими біометричними показниками, як висота рослин, довжина початку і його маса. Для гібриду ДКС 3939 важливим фактором формування продуктивності також є кількість листків на рослині, яка визначає інтенсивність фотосинтетичної діяльності та накопичення сухої речовини (Гайдай та ін., 2022). Загалом гібриди середньоранньої групи стиглості характеризуються високою екологічною пластичністю і здатністю формувати стабільну врожайність у різних погодних умовах. Дослідження показують, що гібриди з числом ФАО 200–300 відзначаються кращою адаптивністю до змін температурного режиму та умов вологозабезпечення порівняно з більш пізньостиглими формами. Саме тому вони часто демонструють меншу

різницю врожайності між роками та характеризуються більш стабільною продуктивністю (Mokrienko & Kornienko, 2024). Урожайність зерна гібридів кукурудзи значною мірою залежить від густоти стояння рослин. За результатами досліджень встановлено, що оптимальна густота для більшості гібридів кукурудзи середньоранньої та середньостиглої групи стиглості становить 70–75 тис. рослин на гектар, оскільки саме за такого рівня забезпечується найкраще поєднання індивідуальної продуктивності рослин та кількості початків на одиниці площі (Zhemela et al., 2021). Подібні результати отримані і в інших польових дослідженнях, де встановлено, що за густоти стояння 60–85 тис. рослин/га продуктивність гібридів кукурудзи значною мірою визначається їх біологічними особливостями та погодними умовами року вирощування (Kutsenko et al., 2023). Разом із тим надмірне загущення посівів призводить до зниження індивідуальної продуктивності рослин, зменшення маси зерна з початку та погіршення фотосинтетичного режиму агроценозу. Встановлено, що при збільшенні густоти стояння рослин зростає висота прикріплення початку та посилюється конкуренція між рослинами за світло, воду та поживні елементи, що може негативно впливати на формування врожаю (Kutsenko et al., 2023).

Дослідження, проведені в умовах Лісостепу України, також підтверджують важливість оптимального підбору густоти стояння рослин для реалізації потенціалу гібриду. Зокрема встановлено, що залежно від біологічних особливостей гібриду найбільш доцільною є густота 70–90 тис. рослин/га, за якої забезпечується максимальна врожайність зерна та оптимальна передзбиральна вологість (Бутенко & Глупак, 2022). Таким чином, гібрид кукурудзи ДКС 3939 характеризується середньоранньою групою стиглості, відносно стабільними біометричними показниками рослин та високим потенціалом продуктивності. Поєднання достатньо короткого періоду вегетації, доброї адаптивності до змін погодних умов та здатності формувати значну масу початку робить цей гібрид перспективним для вирощування. Враховуючи результати попередніх досліджень щодо впливу густоти стояння

на продуктивність кукурудзи, у даному експерименті було використано діапазон норм висіву 60–80 тис. насінин/га, що дозволяє оцінити реакцію гібриду на різні рівні загушення посіву та визначити оптимальні параметри формування врожайності. Польовий експеримент проводився за двофакторною схемою. Фактором А були зони продуктивності поля (високопродуктивна, середньопродуктивна та низькопродуктивна), які визначалися на основі аналізу багаторічних карт урожайності, рельєфу поля, агрохімічних карт та результатів кластерного аналізу, виконаного у середовищі QGIS із застосуванням модулів просторового аналізу. Виділення зон дозволило врахувати внутрішньопольову неоднорідність ґрунтових умов та продуктивності агроландшафту. Фактором В була норма висіву кукурудзи, яка включала п'ять варіантів густоти стояння рослин: 65, 70, 75, 80 та 85 тис. насінин/га. Схема дослідів зображена на рисунку 2.4. Об'єктом дослідження був гібрид кукурудзи ДКС 3939, який належить до середньоранньої групи стиглості та характеризується високим потенціалом продуктивності.

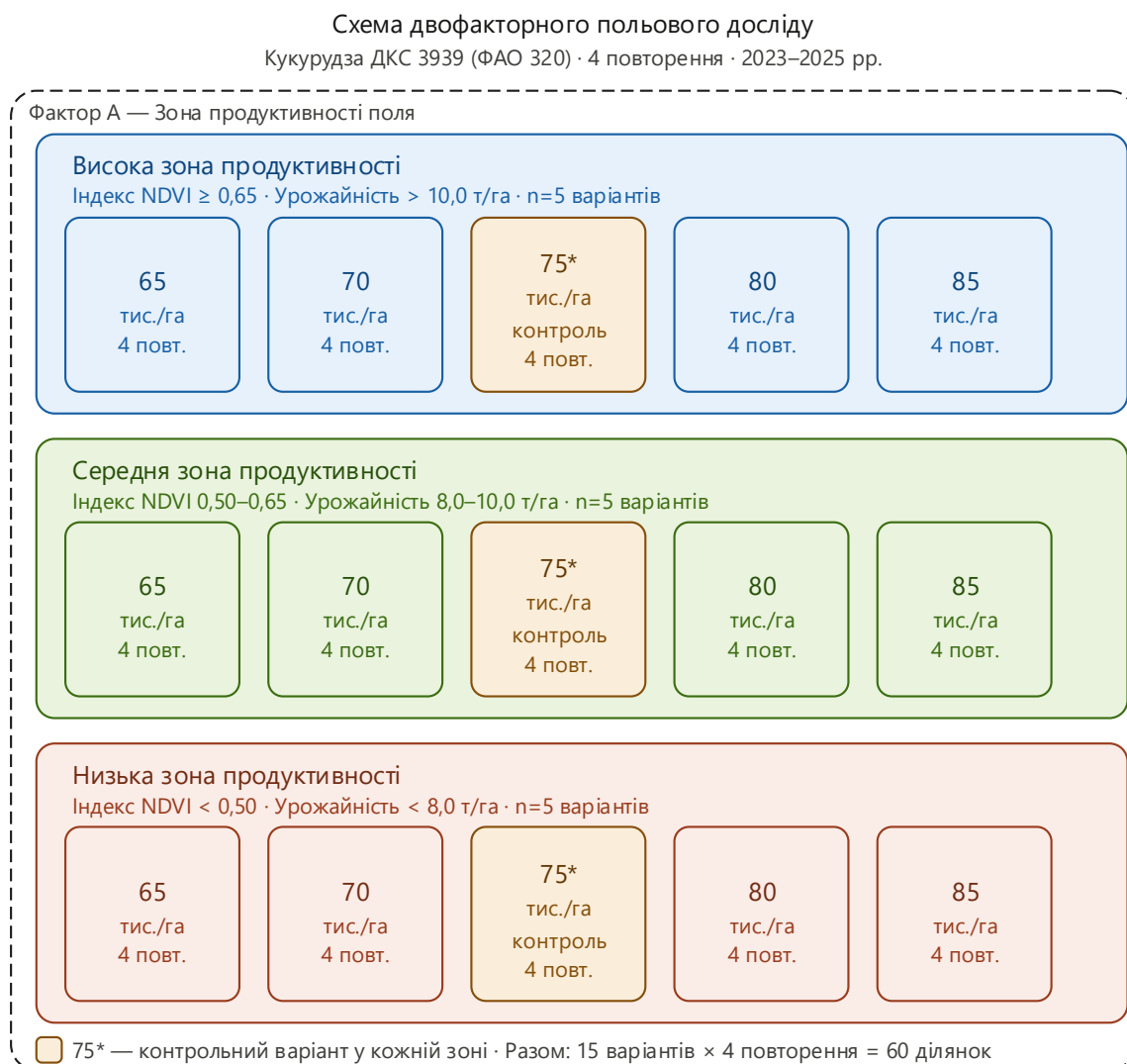


Рисунок 2.4. Схема польового досліджу

Дослід закладався у чотирьох повтореннях на трьох дослідних ділянках загальною площею 6,6 га. Попередником культури була озима пшениця, що відповідає типовій структурі сівозміни для умов досліджуваного регіону. Формування заданої густоти стояння рослин забезпечувалося шляхом контролю норм висіву та оцінки польової схожості насіння.

Для уточнення агрохімічного стану кожної зони проводили відбір ґрунтових зразків із глибини 0–30 см із щільністю 10–20 точок на зону. Отримані зразки змішували, підготовлювали та аналізували відповідно до вимог чинних стандартів.

Застосування різних норм висіву в межах виділених зон продуктивності дозволило оцінити реакцію гібриду кукурудзи на зміну густоти стояння рослин

у різних ґрунтово-агроекологічних умовах. Такий підхід забезпечує можливість визначення оптимальної густоти посіву для кожної зони продуктивності поля та є важливою складовою технологій диференційованого висіву насіння у системах точного землеробства.

2.3. Основні агротехнічні заходи у досліді

Дослідження проводили в умовах Чернігівського регіону, у виробничому кластері ЧІМК, за технологією вирощування кукурудзи на зерно, адаптованою до ґрунтово-кліматичних умов господарства. Для забезпечення достовірності результатів і коректності порівняння варіантів, згідно із запланованою схемою досліду, усі агротехнічні заходи були максимально уніфіковані. Обробіток ґрунту, система удобрення, захист рослин, строки та способи внесення препаратів у всіх варіантах були однаковими. Єдиним змінним фактором у технології була норма висіву насіння гібриду кукурудзи ДКС 3939. Це дало змогу об'єктивно оцінити її вплив на біометричні показники та рівень урожайності в умовах різних зон продуктивності поля без накладання дії інших технологічних чинників.

На передпосівному етапі здійснювали контроль падалиці пшениці та бур'янової рослинності. Після проростання падалиці проводили суцільне обприскування посівної площі гербіцидом Раундап Макс у нормі 1,35 л/га. За потреби застосовували одну з бакових сумішей: Раундап Макс 1,35 л/га + Діален Супер 1,0 л/га або Раундап Макс 1,35 л/га + Пріма Форте 0,7 л/га. Система удобрення у досліді була комбінованою і включала основне, передпосівне та стартове внесення добрив. В якості основного азотного живлення використовували карбамід у нормі 250 кг/га в осінній період. Під час сівби локально в рядок вносили діамофоску у нормі 150 кг/га, що дало дружні та вирівняні сходи.

Після сівби для контролю однорічних злакових і дводольних бур'янів застосовували ґрунтові гербіциди: Аденго у нормі 0,4 л/га або Примекстра Голд у нормі 3,0 л/га. За необхідності додатково використовували Раундап

Макс у нормі 1,35 л/га. Обприскування проводили з нормою робочого розчину 100 л/га із використанням двох факельних форсунок .

Післясходовий догляд за посівами (фаза 3–5 листків) проводили із застосуванням гербіцидного захисту. Це була бакова суміш Лаудіс 0,5 кг/га + Метро 1,5 л/га.

Інсектицидний захист посівів здійснювали в період інтенсивного росту рослин або у фазі викидання волоті, орієнтуючись на фітосанітарний стан та масовий літ стеблового метелика. Використовували препарат Белт у 0,15 л/га, норма внесення самохідним обприскувачем – 50 л/га. Таким чином, агротехнічний фон дослідю включав поетапний контроль бур'янів, комбіновану систему мінерального живлення, позакореневе підживлення мікроелементами, інсектицидний захист. Усі зазначені технологічні операції виконували однаково в усіх варіантах дослідю для забезпечення вирівняного технологічного фону.

2.4. Методи визначення біометричних показників і розрахунків ефективності

Для визначення (табл. 2.11) фаз розвитку рослин кукурудзи користувались Американською шкалою розвитку кукурудзи (ISU, V–R), яка базується на поділі онтогенезу рослини на два основні періоди: вегетативний (V, Vegetative) та генеративний (R, Reproductive). Вегетативні фази визначаються кількістю листків із сформованими комірцями (leaf collar method), тоді як генеративні – морфологічними ознаками розвитку репродуктивних органів рослини. Такий підхід вважається одним із найбільш практичних у польових умовах завдяки простоті візуального визначення стадій росту та розвитку кукурудзи.

Таблиця 2.11.

Фази розвитку кукурудзи за американською шкалою (ISU, V–R)

Американська шкала	Назва фази	Опис розвитку
VE	Emergence	Поява проростка (сходи)
V1	First leaf	1 справжній листок
V2	Second leaf	2 справжні листки
V3	Third leaf	3 листки
V4	Fourth leaf	4 листки
V5	Fifth leaf	5 листків
V6	Sixth leaf	6 листків
V7	Seventh leaf	7 листків
V8	Eighth leaf	8 листків
V9–V19	Vegetative stages	Подальший вегетативний розвиток (9–19 листків)
VT	Tasseling	Повна поява волоті
R1	Silking	Початок цвітіння (поява шовку)
R2	Blister	Початок наливу зерна
R3	Milk stage	Молочна стиглість
R4	Dough stage	Тістоподібна стиглість
R5	Dent stage	Вм'ятинна зерна (dent stage)
R6	Black layer	Повна фізіологічна стиглість

Біометричні обліки у польовому досліді проводили за загальноприйнятими в агрономічній практиці підходами з урахуванням вимог до репрезентативності вибірки, повторності та статистичної обробки результатів. Фенологічні спостереження та біометричні обліки проводили у вегетативні фази V2–V4 та у фазу початку цвітіння R1, що забезпечує уніфіковану часову прив'язку вимірювань між варіантами досліді.

Фактичну густоту стояння рослин визначали методом прямого підрахунку живих рослин на відрізках рядка однакової довжини в кількох

повторних пробах облікової площі кожної ділянки. Отримані дані перераховували у тисяч рослин на гектар з урахуванням ширини міжряддя 70 см і довжини облікового відрізка.

Вміст сухої речовини у вегетативній масі визначали термостатно-ваговим (гравіметричним) методом: зразок подрібнювали, зважували у свіжому стані, після чого висушували до сталої маси при температурі 105°C і розраховували відсоток сухої речовини від початкової маси зразка.

Вміст загального азоту у вегетативній масі визначали методом К'ельдаля у висушених і подрібнених рослинних пробах: зразок мінералізували концентрованою сірчаною кислотою, після чого аміак відганяли з паром і визначали його кількість титруванням. За потреби вміст сирого протеїну обчислювали через перерахунок азоту з коефіцієнтом 6,25.

Висоту рослин вимірювали на типовій вибірці рослин у кожній ділянці: у фазі сходів – від поверхні ґрунту до верхівки найвищого листка; у фазі цвітіння – від поверхні ґрунту до верхівки волоті. Результат подавали як середнє значення по ділянці та варіанту.

Структурні показники врожаю визначали на типових продуктивних качанах, відібраних з облікової ділянки після формування початків. На кожному качані підраховували кількість рядів зерен і кількість зерен у ряду з подальшим розрахунком середніх значень по варіанту досліду.

Статистичну обробку результатів проводили методами дисперсійного аналізу з оцінкою істотності різниць між середніми значеннями за прийнятим рівнем значущості ($p < 0,05$).

Економічну ефективність технології вирощування кукурудзи гібриду ДКС 3939 (ФАО 320) оцінювали за показниками виробничих витрат, валового доходу і валового прибутку. Виробничі витрати розраховували на основі технологічної карти господарства з перерахунком у ціни відповідного року через офіційний курс НБУ: 36,6 грн/\$ у 2023 р., 40,5 грн/\$ у 2024 р. та 41,8 грн/\$ у 2025 р. Вартість насіння змінювалася залежно від норми висіву: зміна густоти на 5 тис./га відповідала зміні витрат на 0,064 посівної одиниці на

гектар при вартості 3524,6 грн за посівну одиницю у цінах 2021 року. Витрати на сушіння зерна розраховували як добуток різниці між фактичною вологістю зерна при збиранні та стандартною базисною вологістю 14%, тарифу сушіння та фактичної урожайності. Тариф сушіння становив 70 грн/т·% у 2023 р., 78 грн/т·% у 2024 р. та 80 грн/т·% у 2025 р. Валовий дохід визначали як добуток урожайності зерна при стандартній вологості 14% та середньої ринкової ціни реалізації без ПДВ: 5000 грн/т у 2023 р., 5800 грн/т у 2024 р. та 8300 грн/т у 2025 р. Валовий прибуток розраховували як різницю між валовим доходом та загальними витратами. Рівень рентабельності визначали як відношення валового прибутку до загальних витрат у відсотках. У таблицях додатково наведено відхилення прибутку кожного варіанту від контрольного варіанту з нормою висіву 75 тис./га в межах відповідної зони продуктивності – як в абсолютному значенні (грн/га), так і у відносному (%).

Біоенергетичну оцінку технології вирощування кукурудзи гібриду ДКС 3939 (ФАО 320) проводили відповідно до методичних рекомендацій Тараріко Ю.О. та співавторів із використанням енергетичних еквівалентів для всіх складових витрат і виходу продукції. Кількість енергії, накопиченої з урожаєм (Ев, ГДж/га), визначали як суму енергії основної та побічної продукції. Для зерна кукурудзи використовували коефіцієнт 14,7 МДж/кг, а для побічної продукції – 8,5 МДж/кг при коефіцієнті виходу побічної продукції 1,5 від маси зерна. Антропогенні енерговитрати (Ео, ГДж/га) включали витрати на насіння, мінеральні добрива, дизельне паливо, засоби захисту рослин, живу працю, амортизацію техніки та сушіння зерна. Для насіння використовували енергетичний еквівалент 17,5 МДж/кг. Для карбаміду застосовували коефіцієнт 57,8 МДж/кг при нормі внесення 200 кг/га, для діаміфоски – 13,8 МДж/кг при нормі 150 кг/га. Енергетичний еквівалент дизельного палива становив 42,7 МДж/кг при середніх витратах близько 95 кг/га. Для засобів захисту рослин використовували коефіцієнт 150,0 МДж/кг при нормі близько 6,5 кг д.р./га. Також враховували витрати живої праці на рівні 0,21 МДж/люд.-год та амортизацію техніки – 1,2 ГДж/га. Витрати на сушіння зерна

розраховували за питомим енергоспоживанням 5,2 МДж на кг випареної вологи відповідно до даних Jokiniemi et al. (2011). Кількість вологи, що підлягала видаленню, визначали з урахуванням вологого базису: масу знятої вологи на одну тонну зерна розраховували як частку надлишкової вологи понад базисні 14% від маси сирого зерна, виражену в кілограмах. Різниця між варіантами за фактичною вологістю зерна при збиранні – від 20,0% у низькопродуктивній зоні до 24,7% у зоні високої продуктивності за контрольної норми висіву – зумовила диференціацію витрат на сушіння від 2,5 до 7,1 ГДж/га залежно від варіанту досліджу. Витрати на насіння змінювалися залежно від норми висіву: збільшення або зменшення густоти на 5 тис./га відповідало зміні витрат на 0,064 посівної одиниці на гектар при масі 1000 зерен близько 300 г. Інші статті антропогенних енерговитрат залишалися однаковими для всіх варіантів досліджу.

Коефіцієнт використання фотосинтетично активної радіації (КФАР, %) визначали як відношення енергії врожаю (Ев) до кількості фотосинтетично активної радіації, що надійшла на посіви за вегетаційний період від сходів до фази воскової стиглості зерна (R5). Загальне надходження ФАР розраховували як добуток середньодобового значення ФАР та тривалості вегетаційного періоду з урахуванням площі 1 га. Частку фотосинтетично активної радіації у складі сумарної сонячної радіації приймали рівною 0,45. Фактичні середньодобові значення сонячної радіації за вегетаційний період становили: у 2023 р. – 308,1 W/m² (11,98 МДж/м²/добу ФАР), у 2024 р. – 342,0 W/m² (13,30 МДж/м²/добу), у 2025 р. – 301,0 W/m² (11,70 МДж/м²/добу). Середнє за три роки – 317,0 W/m², або 12,33 МДж/м²/добу ФАР. Коефіцієнт енергетичної ефективності (Кее) визначали як відношення енергії врожаю до антропогенних енерговитрат. Відповідно до прийнятої шкали оцінювання, значення Кее менше 4 характеризує технологію як неефективну, 4–6 – як середньо ефективну, 6–8 – як високо ефективну, понад 8 – як дуже високо ефективну з точки зору використання антропогенної енергії.

2.5 Методика визначення зон продуктивності поля

Виділення зон продуктивності дослідного поля здійснювали на основі геоінформаційного аналізу багаторічних карт урожайності кукурудзи та супутникових показників. Детальний опис і наукове обґрунтування застосованого підходу наведено у власній публікації авторів (Васьківський, Гарбар, 2026).

Вихідними даними для просторового аналізу слугували карти врожайності кукурудзи гібриду ДКС 3939 (ФАО 320) за 2019–2020 та 2023–2024 роки, сформовані на основі даних системи автоматичного вимірювання врожайності (yield monitor) зернозбирального комбайна, обладнаного GPS-навігацією. Упродовж усього аналізованого періоду на дослідному полі вирощували один і той самий гібрид за єдиною виробничою технологією господарства, що мінімізувало вплив агротехнічних відмінностей на формування просторової структури врожайності.

Первинні дані врожайності проходили процедуру попередньої обробки: з масиву видаляли аномальні значення, зумовлені розворотами техніки, нерівномірною швидкістю руху комбайна або технічними похибками вимірювання. Фільтрацію здійснювали шляхом виключення значень, що виходили за межі статистично допустимого інтервалу, визначеного на основі міжквартильного розмаху. Після очищення дані агрегували до регулярної квадратної сітки з розміром комірки 20×20 м у середовищі QGIS (версія 3.x). Для кожної комірки розраховували середнє значення врожайності з усіх точок yield monitor, що потрапляли в її межі, що забезпечувало порівнянність просторових даних між роками.

Багаторічну карту продуктивності формували шляхом обчислення середнього значення врожайності для кожної комірки за всіма роками аналізованого періоду. Класифікацію зон виконували на основі нормалізованих відносно середнього значення по полю показників врожайності з виділенням трьох класів: низький, середній та високий рівні

продуктивності. Просторово-часову стабільність зон оцінювали шляхом розрахунку коефіцієнта варіації площ зон між роками. Встановлено, що коефіцієнт варіації не перевищував 11,6%, що свідчить про високу стійкість просторового розподілу зон незалежно від міжрічних коливань погодних умов.

Для додаткової верифікації агроекологічної обумовленості виділених зон використовували супутникові показники: карти нормалізованого вегетаційного індексу NDVI, отримані з знімків Sentinel-2 за період активної вегетації, та карти яскравості ґрунтової поверхні, сформовані за знімками у безрослинний період. Обробку супутникових даних виконували з використанням інструментів QGIS та програмних скриптів мовою Python із застосуванням бібліотек GDAL, Rasterio, GeoPandas, NumPy, Pandas, SciPy та Statsmodels. Усі растрові показники нормалізували до відносної шкали 0–100 методом лінійного масштабування (min–max normalization) для забезпечення порівнянності різних джерел просторової інформації.

Кореляційний аналіз показав тісний прямий зв'язок між багаторічною картою продуктивності та середньобагаторічним NDVI ($r = 0,86\text{--}0,94$) і стабільний обернений зв'язок із яскравістю ґрунтової поверхні ($r = -0,79\text{--}-0,87$). Коефіцієнти детермінації ($R^2 = 0,74\text{--}0,88$) підтверджують, що просторові відмінності врожайності переважно зумовлені сталими ґрунтово-ландшафтними чинниками, а не міжрічними кліматичними коливаннями. Це обґрунтовує надійність виділених зон як стабільної просторової одиниці для диференціювання агротехнічних заходів.

Середні багаторічні значення врожайності по зонах становили 6,2 т/га у зоні низької продуктивності, 9,5 т/га – у середній та 12,3 т/га – у зоні високої продуктивності. Частка площ у структурі поля становила відповідно 27, 45 і 29%. Різниця між середніми показниками врожайності зони високої і зони низької продуктивності досягала 6,1 т/га, що свідчить про суттєву внутрішньопольову варіабельність ресурсного потенціалу і обґрунтовує доцільність застосування диференційованих норм висіву насіння кукурудзи залежно від зони продуктивності.

Висновки до другого розділу

1. Гідротермічні умови вегетаційних періодів 2023–2025 років суттєво відрізнялися між собою. Найбільш посушливим виявився 2024 рік із середнім значенням гідротермічного коефіцієнту за вегетацію 0,55, що відповідає посушливим умовам. У 2023 і 2025 роках умови були менш стресовими – ГТК становив 1,05 і 0,96 відповідно. Спільною закономірністю для всіх трьох сезонів був дефіцит вологи у серпні–вересні, який обмежував формування врожаю у фазу наливу зерна. Така міжрічна варіабельність забезпечила широкий діапазон агрокліматичних умов для оцінки ефективності досліджуваної технології.

2. Фізичний стан ґрунту суттєво відрізнявся між зонами продуктивності. Твердість ґрунту зростала з глибиною в усіх зонах, але у низькопродуктивній зоні у шарі 30–35 см перевищувала показники високопродуктивної зони майже у 1,7 разу, що свідчить про формування ущільненого горизонту, здатного обмежувати розвиток кореневої системи кукурудзи.

3. Агрохімічні властивості ґрунту мали виражену диференціацію між зонами продуктивності. Високопродуктивна зона характеризувалася кращими показниками реакції ґрунтового розчину (рН 6,30), ємності катіонного обміну (11,07 смоль/кг) і вмісту гумусу (2,3%), що забезпечувало кращі умови для живлення рослин і корелювало з вищою врожайністю – 9,47–11,8 т/га. У низькопродуктивній зоні кислотність ґрунту (рН 4,93), низька ємність катіонного обміну (5,03 смоль/кг) і мінімальний вміст гумусу (1,0%) формували обмежений ресурсний потенціал із врожайністю 5,75–9,0 т/га.

4. Просторова диференціація вмісту макро- і мезоелементів підтвердила визначальну роль азотного і фосфорного режимів у формуванні зон продуктивності. Вміст мінерального азоту і рухомого фосфору послідовно зростав від низької до високої зони, тоді як обмінний калій не мав прямолінійної залежності від рівня продуктивності. Вміст кальцію і магнію

також зростав у напрямку від низько- до високопродуктивної зони, що корелювало зі зниженням кислотності і покращенням умов фотосинтетичної діяльності рослин.

5. Об'єктом дослідження був гібрид кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) середньоранньої групи стиглості з тривалістю вегетації 100–120 діб. Гібрид характеризується добрими адаптивними властивостями і підвищеною посухостійкістю, що відповідає умовам досліджуваного регіону. Польовий дослід закладався за двофакторною схемою: фактор А – зона продуктивності поля (високопродуктивна, середньодуктивна, низькопродуктивна), фактор В – норма висіву (65, 70, 75, 80 і 85 тис. насінин/га) у чотирьох повтореннях.

6. Усі агротехнічні заходи – обробіток ґрунту, система удобрення, захист рослин – були уніфіковані між варіантами досліду. Єдиним змінним фактором технології була норма висіву, що дозволило об'єктивно оцінити її вплив на продуктивність і біоенергетичну ефективність у різних зонах продуктивності без впливу інших технологічних чинників. Біоенергетичну оцінку проводили за показниками E_o , E_v , $E_{приб}$ і $K_{ее}$ відповідно до єдиної методики, що забезпечує внутрішню порівнянність результатів між варіантами і зонами.

Список літератури до другого розділу

1. Adhikari K., Smith D. R., Hajda C., Kharel T. P. Within-field yield stability and gross margin variations across corn fields and implications for precision conservation. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24. P. 1401–1416. DOI: 10.1007/s11119-023-09995-7.
2. Ahmed N., Habib U., Younis U., Irshad I., Danish S., Ahmad Rahi A., Munir T. M. Growth, chlorophyll content and productivity responses of maize to magnesium sulphate application in calcareous soil. *Open Agriculture*. 2020. Vol. 5, № 1. P. 792–800. DOI: 10.1515/opag-2020-0023.
3. Balabukh V., Tarariko O., Iliencko T., Velychko V. Influence of changes in air temperature on crop productivity formation in Ukraine at the turn of XX–XXI centuries (1981–2010). *Agricultural Science and Practice*. 2021. Vol. 8, № 3. P. 71–87. DOI: 10.15407/agrisp8.03.071.
4. Chernihivskyi oblastnyi tsentr z hidrometeorolohii. Klimatychni kharakterystyky Chernihivskoi oblasti. URL: <https://ch-pogoda.com.ua/index.php/home/klimat> (дата звернення: 10.04.2026).
5. Correndo A. A., Rubio G., García F. O., Ciampitti I. A. Subsoil-potassium depletion accounts for the nutrient budget in high-potassium agricultural soils. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 11597. DOI: 10.1038/s41598-021-90297-1.
6. Dehodyuk E., Dehodyuk S., Borko Y., LitviNova O., Ihnatenko Y., Mulyarchuk A. Long-term monitoring of aridization in agriculture before change and for climate change in Ukraine. *Plant and Soil Science*. 2021. DOI: 10.31548/agr2021.04.102.
7. Drebot O., Tarariko O., Iliencko T., Kuchma T. Features of the impact of climate change on agricultural production and ecosystems of Polissya: forecast and adaptation. *Agrarian Science*. 2025. DOI: 10.31073/978-966-540-642-6.
8. Fu Y., Si Z., Ma S., Cheng Y., Liu Z., Gao Y. Impact of soil compaction degree modulated by initial water content on maize root phenotype and hydraulic

properties. *Frontiers in Plant Science*. 2026. Vol. 17. Article 1764502. DOI: 10.3389/fpls.2026.1764502.

9. Gao Z., Liang L., Wang X., Zhen W., Ding Z., Li C., Liu Z., Zhao M., Wang Z., Zhou B. Soil compaction reduces the yield potential of densely planted maize (*Zea mays* L.) by disrupting root and shoot growth coordination. *Plant and Soil*. 2025. Vol. 513. P. 1595–1608. DOI: 10.1007/s11104-025-07272-2.

10. Hernández-Ochoa I. M., Gaiser T., Grahmann K., Engels A. M., Ewert F. Within-field temporal and spatial variability in crop productivity for diverse crops – a 30-year model-based assessment. *AgroNomy*. 2025. Vol. 15, № 3. Article 661. DOI: 10.3390/agroNomy15030661.

11. Ibrahim K., Wang Q., Wang L., Zhang W., Peng C., Zhang S. Determining the optimum level of soil Olsen phosphorus and phosphorus fertilizer application for high phosphorus-use efficiency in *Zea mays* L. in black soil. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 11. Article 5983. DOI: 10.3390/su13115983.

12. Ivaniuta S. P. (ed.) Climate change: consequences and adaptation measures: analytical report. Kyiv: National Institute for Strategic Studies, 2020. 110 p.

13. Jokiniemi T., Kautto K., Kokin E., Ahokas J. Energy efficiency measurements in grain drying. *Agronomy Research Biosystem Engineering Special Issue*. 2011. Vol. 1. P. 69–75.

14. Kovar J. L. Maize response to sulfur fertilizer in three Iowa soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2021. Vol. 52, № 8. P. 905–915. DOI: 10.1080/00103624.2020.1869773.

15. Kutsenko O., Liashenko V., Keda L. Growth, development, and formation of corn hybrids depending on plant stand density. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. Vol. 26, № 4. P. 29–35. DOI: 10.31210/spi2023.26.04.06.

16. Latifmanesh H., Wang X., Ma W., Zhang W., Nawaz M. M., Noor M. A. Field traffic-induced soil compaction under moderate machine-field conditions affects soil properties and maize yield on sandy loam soil. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1002943. DOI: 10.3389/fpls.2023.1002943.

17. Liu X., Yu Y., Huang S., Xu C.-C., Wang X., Gao J., Meng Q., Wang P. The impact of drought and heat stress at flowering on maize kernel filling: insights from the field and laboratory. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2022. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108733.
18. Lykhovyd P. Using Normalised difference vegetation index in classification and agroecological zoning of spring row crops. *Biosystems Diversity*. 2023. DOI: 10.15421/012360.
19. Maestrini B., Basso B. Subfield crop yields and temporal stability in thousands of US Midwest fields. *Precision Agriculture*. 2021. Vol. 22. P. 1749–1767. DOI: 10.1007/s11119-021-09810-1.
20. Mahal N. K., Sawyer J. E., Iqbal J., Sassman A. M., Mathur R., Castella M. J. Role of sulfur mineralization and fertilizer source in corn and soybean production systems. *Soil Science Society of America Journal*. 2022. Vol. 86, № 4. P. 1058–1071. DOI: 10.1002/saj2.20417.
21. Marchenko T., Skakun V., Lavrynenko Y., Zavalnyuk O., Skakun Y. Biometric parameters and yield of maize hybrids in dependence on agricultural technology elements. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26, № 11. DOI: 10.48077/scihor11.2023.90.
22. Min C.-W., Yoon I.-K., Kim M.-J., Jung J.-S., Rahman M. A., Lee B.-H. Effects of waterlogging at different developmental stages on growth, yield and physiological responses of forage maize. *AgroNomy*. 2025. Vol. 15, № 10. Article 2389. DOI: 10.3390/agroNomy15102389.
23. Mokrienko V., Kornienko T. Formation of productivity of maize hybrids of different ripening groups in the Forest-Steppe region. *Plant and Soil Science*. 2024. Vol. 15, № 1. P. 52–62. DOI: 10.31548/plant1.2024.52.
24. Nykytiuk Y., Kravchenko O. Agroecological assessment of maize suitability in the Polissia and Forest-Steppe of Ukraine under future climate projections. *Agrology*. 2025. DOI: 10.32819/202515.
25. Nykytiuk Y., Kravchenko O., Komorna O. Bioclimatic and soil determinants of buckwheat cultivation prospects under global warming: A case study

of the Ukrainian Polissya and Forest-Steppe. *Biosystems Diversity*. 2025. DOI: 10.15421/012537.

26. Nykytiuk Y., Kravchenko O., Seredniak D. Spatial and temporal variation of the rainfall erosivity factor in Polissya and Forest-Steppe of Ukraine. *Biosystems Diversity*. 2024. DOI: 10.15421/012444.

27. Oltmans R. R., Mallariño A. P. Potassium uptake by corn and soybean, recycling to soil, and impact on soil test potassium. *Soil Science Society of America Journal*. 2015. Vol. 79, № 1. P. 314–327. DOI: 10.2136/sssaj2014.07.0272.

28. Pepelyaev V., Golodnikov A., PanteleymoNov A. Expected impact of climate change on the yield of cereal crops in the Cherkasy Oblast of Ukraine. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2025. DOI: 10.1007/s10559-025-00808-5.

29. Qaswar M., Li D., Huang J., Han T., Ahmed W., Abbas M., Zhang L., Du J., Khan Z. H., Ullah S., Zhang H., Wang B. Interaction of liming and long-term fertilization increased crop yield and phosphorus use efficiency through mediating exchangeable cations in acidic soil under wheat–maize cropping system. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article 19828. DOI: 10.1038/s41598-020-76892-8.

30. Radočaj D., Plaščak I., Jurišić M. Fusion of Sentinel-2 PheNology Metrics and Saturation-Resistant Vegetation Indices for Improved Correlation with Maize Yield Maps. *AgroNomy*. 2025. Vol. 15, № 6. Article 1329. DOI: 10.3390/agroNomy15061329.

31. Raspopina S. P., Ivanycheva Ye. V. Forestry assessment of sod-podzol soils' properties in the Northern part of Zhytomyr Polissya. *Forestry and Forest Melioration*. 2024. Issue 144. P. 80–87. DOI: 10.33220/1026-3365.144.2024.80.

32. Ritchie S. W., Hanway J. J., Benson G. O. How a Corn Plant Develops. Special Report No. 48. Ames: Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1993. 21 p.

33. Saridis G., Chorianopoulou S. N., Ventouris Y. E., Sigalas P. P., Bouranis D. L. An exploration of the roles of ferric iron chelation-strategy components in the leaves and roots of maize plants. *Plants*. 2019. Vol. 8, № 5. Article 133. DOI: 10.3390/plants8050133.

34. Shi R., Melzer M., Zheng S. J., Benke A., Stich B., von Wirén N. Iron retention in root hemicelluloses causes geNotypic variability in the tolerance to iron deficiency-induced chlorosis in maize. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Article 557. DOI: 10.3389/fpls.2018.00557.
35. Sowiński P., Wieliczko-MaNowska K., Grzybowski M., Jończyk M., Sowiński J., Sobkowiak A., Kowalec P., Rogacki J. Diverse coping modes of maize in cool environment at early growth. *BMC Plant Biology*. 2025. Vol. 25. Article 61982. DOI: 10.1186/s12870-025-06198-2.
36. Tamás A., Kovács E., Horváth É., Juhász C., Radócz L., Rátonyi T., Ragán P. Assessment of NDVI dynamics of maize (*Zea mays* L.) and its relation to grain yield in a polyfactorial experiment based on remote sensing. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, № 3. Article 689. DOI: 10.3390/agriculture13030689.
37. Tarariko O. H., Cruse R. M., Iliencko T. V., Kuchma T. L., Kozlova A. O., Andereiev A. A., Yatsiuk V. M., Velychko V. A. Impact of climate changes on agroresources of Ukrainian Polissia based on geospatial data. *Agricultural Science and Practice*. 2024. Vol. 11, № 2. P. 3–29. DOI: 10.15407/agrisp11.02.003.
38. Tarariko Y., Zosymchuk M., Stetsiuk M., Zosymchuk O., Danylytskiy O., Soroka Y., Hulencko O. Features of maize growing for grain in the western forest zone of Ukraine in the conditions of current climate changes. *Land Reclamation and Water Management*. 2023. № 2. P. 83–96. DOI: 10.31073/mivg202302-367.
39. Tkachenko M. A., Kondratiuk I. M., Kudria S. O., Zamlynska V. M. Regulation of the fertility of gray forest soil in a long-term stationary experiment under different fertilization and liming systems. *Agriplant*. 2023. Issue 1. Article 08. DOI: 10.54651/agri.2023.01.08.
40. Vanhees D. J., Loades K. W., Bengough A. G., Mooney S. J., Lynch J. P. Root anatomical traits contribute to deeper rooting of maize under compacted field conditions. *Journal of Experimental Botany*. 2020. Vol. 71, № 14. P. 4243–4257. DOI: 10.1093/jxb/eraa165.
41. Veremeenko S. I., Furmanets O. A. Changes in the agrochemical properties of dark gray soil in the Western Ukrainian forest-steppe under the effect

of long-term agricultural use. *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47, № 5. P. 483–490. DOI: 10.1134/S106422931405024X.

42. Wang Z., Ul Hassan M., Nadeem F., Wu L., Zhang F., Li X. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 10. Article 1727. DOI: 10.3389/fpls.2019.01727.

43. Xia H., Wang L., Jiao N., Mei P., Wang Z., Lan Y., Chen L., Ding H., Yin Y., Kong W., Xue Y., Guo X., Wang X., Song J., Li M. Luxury absorption of phosphorus exists in maize when intercropping with legumes or oilseed rape. *AgroNomy*. 2019. Vol. 9, № 6. Article 314. DOI: 10.3390/agroNomy9060314.

44. Yadesa W., Tadesse A., Kibret K., Dechassa N. Effect of liming and applied phosphorus on growth and P uptake of maize plant grown in acid soils of West Wollega, Ethiopia. *Journal of Plant Nutrition*. 2019. Vol. 42, № 5. P. 477–490. DOI: 10.1080/01904167.2019.1567769.

45. Yousaf M., Riaz M. W., Jiang Y., Yasir M., Aslam M. Z., Hussain S., Shah S. A. S., Shehzad A., Riasat G., Manzoor M. A., Akhtar I. Concurrent effects of drought and heat stresses on physio-chemical attributes, antioxidant status and kernel quality traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 898823. DOI: 10.3389/fpls.2022.898823.

46. Zhemela H. P., Barabolia O. V., Liashenko V. V., Liashenko Ye. S., Podoliak V. A. Formation of maize hybrids grain productivity depending on sowing rate. *Scientific Progress & InNovations*. 2021. № 1. P. 97–105. DOI: 10.31210/visnyk2021.01.11.

47. Zhu Y., Archontoulis S. V., Castella M. J. Quantifying the timing asynchrony between soil nitrogen availability and maize nitrogen uptake. *Plant and Soil*. 2025. Vol. 513, № 2. P. 2939–2954. DOI: 10.1007/s11104-025-07352-3.

48. Zou H., Li D., Ren K., Liu L., Zhang W., Duan Y., Lu C. Response of maize yield and nitrogen recovery efficiency to nitrogen fertilizer application in field with various soil fertility. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. Article 1349180. DOI: 10.3389/fpls.2024.1349180.

49. Zymaroieva A., Zhukov O., Fedoniuk T., Pinkina T., Vlasiuk V. Edaphoclimatic factors determining sunflower yields spatiotemporal dynamics in Northern Ukraine. *OCL – Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*. 2021. Vol. 28. Article 26. DOI: 10.1051/ocl/2021013.
50. ДСТУ ISO 5983:2003. Корми для тварин. Визначення вмісту азоту та обчислення вмісту сирого протеїну. Метод К'ельдаля. Київ, 2003. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91956.
51. ДСТУ ISO 6496:2005. Корми для тварин. Визначення вмісту вологи та інших летких речовин. Київ, 2005. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=86445.
52. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні. Київ: Міністерство аграрної політики та продовольства України. URL: <https://sops.gov.ua> (дата звернення: 2026).
53. Національний атлас України / редкол.: Б. Є. Патон (голова) та ін. Київ: Картографія, 2009. 435 с.
54. Полупан М. І., Соловей В. Б., Кисіль В. І., Величко В. А. Довідник еколого-генетичного стану та родючості ґрунтів України. Київ: Колообіг, 2005. 304 с. DOI: 10.31073/966-8610-09-01.
55. Полупан М. І., Величко В. А. Номенклатура і діагностика еколого-генетичного стану ґрунтів України для їх великомасштабного вивчення. Київ: Аграрна наука, 2014. 496 с. DOI: 10.31073/978-966-540-378-4.
56. Трускавецький Р. С. Торфові ґрунти і торфовища України. Харків: Міськдрук, 2010. 278 с.
57. Білоус М. Д. Географія Чернігівської області. Чернігів: Ранок, 2010. 144 с.
58. Бутенко А. О., Глупак З. І. Урожайність гібридів кукурудзи залежно від групи стиглості та густоти стояння в умовах Лісостепу України. *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2022. № 2. С. 5–10. DOI: 10.32782/2310-0478-2022-2-5-10.

59. Васьківський Б. С., Гарбар Л. А. Обґрунтування виділення зон продуктивності поля за даними багаторічного моніторингу урожайності кукурудзи та супутникових показників. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2026. Т. 22, № 2.

60. Гайдай А. О., Уліцько П. М., Сиплива Н. А., Білявська Л. Г., Кулик М. І. Мінливість елементів індивідуальної продуктивності та врожайності зерна гібридів кукурудзи. *Аграрні інновації*. 2022. № 15. С. 113–121. DOI: 10.32848/agrar.inNov.2022.15.17.

61. Іваніюта С. П. (ред.) Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналітична доповідь. Київ: НІСД, 2020. 110 с.

62. Чернігівська область. Географічний атлас. Серія «Моя мала Батьківщина». Київ: Картографія, 2003.

РОЗДІЛ 3. АГРОЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОСТУ І РОЗВИТКУ КУКУРУДЗИ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗОНИ ПРОДУКТИВНОСТІ ПОЛЯ ТА НОРМИ ВИСІВУ НАСІННЯ

3.1. Фактична густота стояння рослин кукурудзи залежно від норм висіву та зон продуктивності на момент збору врожаю

Фактична густота стояння рослин на момент збирання врожаю є одним із показників, що визначає рівень реалізації продуктивного потенціалу посівів кукурудзи. Вона формується під впливом як агротехнічних чинників, таких як норма висіву та якість посівного матеріалу, а також і просторової неоднорідності, едафічних та мікрокліматичних умов поля. Результати досліджень, які здійснювались впродовж трьох років (2023–2025 рр.), свідчать про чітку диференціацію фактичної густоти стояння рослин залежно від зони продуктивності та, в меншій мірі, від заданої норми висіву (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Фактична густота стояння на момент збору врожаю залежно від норми
висіву та зони продуктивності

Зона продуктивності	Норма висіву, тис/га	2023	2024	2025	Середнє за роки
1	2	3	4	5	6
Високої	65	63,7	62,7	63,1	63,2
	70	68,6	67,6	68	68,1
	75	73,5	72,4	72,9	72,9
	80	78,4	77,2	77,8	77,8
	85	83,3	82,1	82,6	82,7
	Середнє	73,5	72,4	72,9	72,9

Продовження таблиці 3.1					
1	2	3	4	5	6
Середньої	65	63,1	61,7	62,2	62,3
	70	68,2	66,7	67,3	67,4
	75	73,1	71,7	72,2	72,3
	80	78	76,7	77,2	77,3
	85	82,9	81,6	82	82,2
	Середнє	73,1	71,7	72,2	72,3
Низької	65	61,8	60,7	61,1	61,2
	70	66,5	65,4	65,9	65,9
	75	71,3	70,1	70,6	70,7
	80	76	74,8	75,3	75,4
	85	80,8	79,5	80	80,1
	Середнє	71,3	70,1	70,6	70,7

У зоні високої продуктивності, фактична середня густина стояння за роки досліджень варіювала від 63,2 до 82,7 тис. шт./га, за норм висіву 65–85 тис./га, відповідно. У середньопроодуктивній зоні аналогічні показники густоти стояння були дещо нижчими – 62,3–82,2 тис. шт./га. Тоді ж як у зоні низької продуктивності поля зафіксовано найменші значення фактичної густоти – 61,2–80,1 тис. шт./га. Отже, різниця у показниках між високою та низькою зонами продуктивності за норми висіву 75 тис./га становила 2,2 тис. шт./га в середньому за роки, що є агрономічно несуттєвим показником на момент збору врожаю (рис. 3.1).

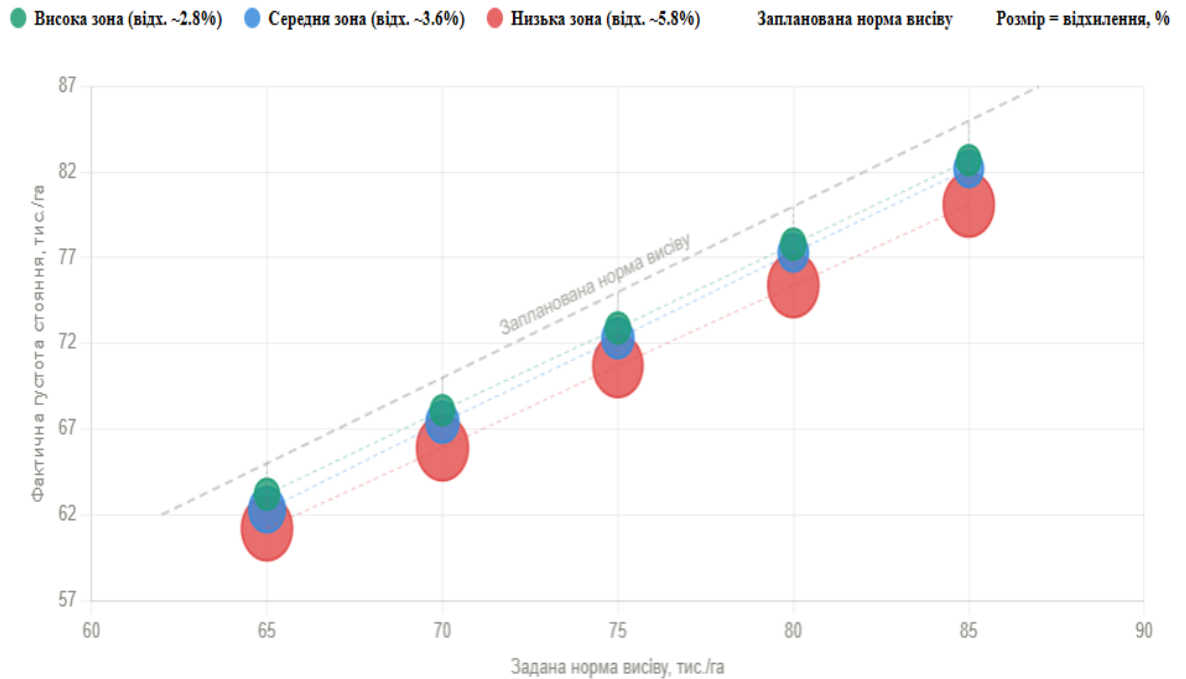


Рис.3.1 Фактична густина стояння рослин на момент збору врожаю в порівнянні із плановою нормою висіву

Отримані нами результати подібні з даними Shuai et al. (2019), які встановили, що різноманіття густоти стояння між зонами продуктивності поля є постійним явищем, яке пояснюється геопросторовою різноманітністю ґрунтових умов, а не випадковими факторами за висіву насіння. Автори досліджу показали, що у зонах із низькою врожайністю рік у рік, можна спостерігати постійно більші втрати рослин на ранньому етапі вегетації. Наприклад, у період появи сходів. Це майже гарантовано призводить до зниження густоти стояння рослин на момент збору врожаю, якщо порівнювати із плановим показником густоти. Окремо, варто також відзначити, значну різницю фактичної густоти стояння між роками досліджень. Отримані результати нашого дослідження вказують на те, що у 2024 році в усіх зонах і за всіх норм висіву спостерігалось зниження показника фактичної густоти порівняно до інших років досліджень. Особливо це спостерігається у низькопродуктивній зоні у варіантах зі збільшенням норми висіву насіння. Зокрема, за планової норми висіву 80 тис./га фактична густина у 2024 р. становила 74,8 тис. шт./га. Для порівняння: 76,0 тис. шт./га показники у 2023

р. та 75,3 тис. шт./га – у 2025 р. Результати свідчать про несприятливі гідротермічні умови у ранній період розвитку проростання насіння та появи сходів у 2024 році. Аналогічно KiNoshita et al. (2021) в своєму дослідженні підтверджують, що різниця продуктивності в середині поля та реакція посівів на гідрокліматичні умови суттєво посилюється в роки з більшим дефіцитом атмосферних опадів. Автори наголошують на тому що низькопродуктивні зони дуже сильно піддаються на стресові умови. У нашому дослідженні встановлено що по мірі збільшення норми від 65 до 85 тис./га фактична густина стояння рослин на полі також зростала в усіх трьох зонах. Проте, лінійна пропорційність такого росту порушується під впливом умов зони продуктивності.

Відносно свіжі дослідження Anselmi et al. (2021) показали, що оптимальні усереднені значення густоти стояння на полі для реалізації максимального врожаю кукурудзи перебувають у діапазоні від 70 до 80 тис. рослин/га, без урахування зон продуктивності.

Результати досліджень свідчать, що гібриди, стійкі до загущення посівів, показують стабільніші показники схожості і фактичної густоти стояння в межах зон із різним продуктивним потенціалом. Отримані впродовж нашого дослідження дані підтверджують що загущення посівів кукурудзи до 80 тис./га у зонах із історично високою продуктивністю, відповідає оптимальним значенням густоти стояння, визначеним у роботі, що була процитована вище. У таблиці 3.2 представлено аналіз відхилень фактичної густоти стояння рослин кукурудзи на момент збору врожаю від заданої норми висіву, який дозволяє оцінити, наскільки ефективно було проведено висів насіння, а також проаналізувати вплив досліджуваних факторів, таких як норма висіву та зона продуктивності, на ризик випадання рослин протягом вегетаційного періоду.

Таблиця 3.2.

Абсолютне та відносне відхилення фактичної густоти стояння від заданої норми

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	Факт (середнє), тис./га	Відхилення	
			Абсолютне, тис./га	Відносне, %
Високої	65	63,2	1,8	2,8
	70	68,1	1,9	2,7
	75	72,9	2,1	2,8
	80	77,8	2,2	2,8
	85	82,7	2,3	2,7
	Середнє	72,9	2,1	2,8
Середньої	65	62,3	2,7	4,1
	70	67,4	2,6	3,7
	75	72,3	2,7	3,6
	80	77,3	2,7	3,4
	85	82,2	2,8	3,3
	Середнє	72,3	2,7	3,6
Низької	65	61,2	3,8	5,8
	70	65,9	4,1	5,9
	75	70,7	4,3	5,7
	80	75,4	4,6	5,8
	85	80,1	4,9	5,8
	Середнє	70,7	4,3	5,8

Результатами наших досліджень було встановлено, що втрати рослин впродовж вегетаційного періоду, які визначалися як різниця між плановою

нормою висіву і фактичною густотою стояння на момент збору врожаю, суттєво відрізнялися залежно від зон продуктивності поля та меншою мірою залежали від норм висіву насіння в межах кожної із зон. Для наглядної демонстрації результатів було розраховано абсолютне та відносне відхилення.

Отримані дані свідчать, що в зоні високої продуктивності поля середнє абсолютне відхилення становило 2,1 тис. шт./га, а відносне відхилення – 2,8 % від заданої норми висіву. У зоні середньої продуктивності ці показники були дещо вищими: абсолютне відхилення становило 2,7 тис. шт./га, а відносне – 3,5 %. Найбільше відхилення від планової норми спостерігалось у зоні з низькою продуктивністю, де абсолютне відхилення досягало 4,3 тис. шт./га, а відносне – 5,8 %. Таким чином низькопродуктивна зона поля характеризується значними втратами рослин, які майже вдвічі перевищують аналогічний показник для зони високої продуктивності. Особливої уваги заслуговує той факт, що норма висіву не є ключовим фактором, який визначає фактичну густоту стояння рослин у полі на момент збирання врожаю. Це чітко видно за аналізу відносних відхилень у межах кожної із зон продуктивності поля. Зокрема, у низькопродуктивній зоні спостерігаються найбільші абсолютні та відносні відхилення від планових норм висіву. Відносне відхилення в цій зоні коливається у межах 5,7–5,9 %, що є ознакою системного дефіциту вологи на обраній ділянці. Іншими словами, основною причиною зниження фактичної густоти стояння рослин у низькопродуктивній зоні є не помилки при сівбі насіння чи технічні несправності сіялки, а безпосередній вплив стресових умов середовища, характерних саме для цієї зони: надмірне ущільнення ґрунту у посівному шарі, а також значний дефіцит поживних речовин. У своєму дослідженні Adhikari et al. (2023) поділяють зони поля за продуктивністю залежно від стабільності урожайності. Вони наголошують на тому, що в зонах низької продуктивності умови вирощування залишаються нестабільними із набагато вищими варіабельністю умов росту рослин, що характеризується прямим впливом на кінцеву густоту стояння рослин у полі. Ці ж автори акцентують свою увагу на тому, що диференційований підхід до підбору норм

висіву залежно від зон продуктивності поля потребує докорінного змінення технологічних рішень з подальшим використанням у рослинництві. Інше дослідження Silva et al. (2021) встановило, що електропровідність ґрунту та вміст магнію є ключовими факторами, які можна використовувати для підбору оптимальної густоти висіву насіння залежно від зон продуктивності для максимізації врожаю. Дослідження підкреслює, що зниження густоти в низькопродуктивних зонах в першу чергу пов'язане із властивостями ґрунту, які є характерними саме для цих ділянок.

Отже, для компенсації втрат рослин упродовж вегетаційного періоду доцільно підвищувати планову норму висіву відповідно до відсотка випадіння рослин обов'язково враховуючи зону продуктивності поля. Наші результати переконливо показують безпосередній вплив продуктивності зони на абсолютні та відносні значення відхилень. Це є підґрунтям для подальших досліджень у наступних підрозділах дисертаційної роботи, адже саме фактична густота стояння рослин визначає реальні умови їх росту та розвитку.

3.2. Вплив норм висіву та зон продуктивності поля на тривалість міжфазних періодів кукурудзи залежно від погодних умов вирощування дослідних років

Тривалість міжфазних та вегетаційного періоду посівів кукурудзи є прямим відображенням взаємодії генотипу рослини з факторами зовнішнього середовища. Для гібриду ДКС 3939 (ФАО 320) у роки досліджень зафіксовано суттєву різницю фенологічних показників у порівнянні між роками, яка пояснюється в першу чергу різними гідротермічними умовами вегетаційного періоду (табл. 3.4–3.6).

У 2023 році було зафіксовано відносно нормальні умови для росту і розвитку рослин. Сівбу проведено 03.05.2023, а перші сходи отримано 19.05.2023 – через 16 діб після висіву. Накопичення суми активних температур склало 100 °С. Середньодобова температура повітря в міжфазний період від сівби до отримання перших сходів становила 13,9 °С за повної відсутності

опадів та наявності 7 діб холодового стресу (мін. $t^{\circ} < 8^{\circ} \text{C}$). Проте, це не вплинуло суттєво на строки та якість формування сходів. Подальший розвиток рослин відбувався в сприятливих умовах: фаза 6-го листка (V6) настала 09.06.2023 (через 21 добу від сходів), викидання волоті (VT) – 26.07.2023 (через 47 діб від V6), початок цвітіння (R1) – 05.08.2023 (через 10 діб від VT). Молочна стиглість (R3) настала 22.08.2023 (через 17 діб від R1), воскова (R5) – 06.09.2023 (через 15 діб від R3).

Загальна тривалість вегетаційного періоду від сівби до R5 становила 126 діб, що відповідає паспортним показникам гібриду. Середній ГТК за весь вегетаційний період склав $\sim 2,2$, що відповідає режиму достатнього зволоження. Єдиний стресовий підперіод впродовж усього сезону 2023 – це молочна стиглість R3, де ГТК знизився до 0,61 за наявності 4 діб теплового стресу (макс. $t^{\circ} > 30^{\circ} \text{C}$).

На противагу 2023 року, 2024 сезон видався більш посушливим із суттєвим прискоренням завершення вегетації. Сівбу було проведено 01.05.2024, а перші сходи з'явилися 20.05.2024, тобто через 19 діб після сівби, що на 3 доби пізніше порівняно з 2023 роком. Причиною відтермінування стали нижча середньодобова температура повітря міжфазного періоду ($13,3^{\circ} \text{C}$ проти $13,9^{\circ} \text{C}$ у 2023 р.) та більша кількість діб холодового стресу – 10 діб (проти 7 у 2023 р.) за мінімальної температури повітря, що знижувалась до 1°C . Холодовий стрес в цей період спричинив збільшення втрат рослин. Фаза V6 настала через 21 добу від сходів (10.06.2024). Найбільш значущою відмінністю від 2023 року стало суттєве скорочення періоду V6–VT до 34 діб (проти 47 у 2023 р.), яке пояснюється прискореним розвитком рослин за умов дефіциту вологи. Викидання волоті відбулось 14.07.2024, а цвітіння почалось 24.07.2024 (через 10 діб від викидання волоті). В 2024 році також найбільш критичним став підперіод R1–R3. У цей період ГТК становив 0,18, а також 8 діб теплового стресу. Простими словами, жорстка посуха у фазі наливу зерна скоротила цей підперіод до 13 діб (проти 17 у 2023 р.). Фаза воскової стиглості (R5) була досягнута 18.08.2024. Загальна тривалість вегетації від сівби до фази

воскової стиглості становила 109 діб, що на 17 діб коротше, ніж у 2023 році, та нижче паспортної норми. Таке прискорення вегетації у посушливих умовах пов'язане із явищем, яке має назву «drought escape», тобто адаптивною реакцією рослин на дефіцит вологи, що виражається у скороченні вегетативних та репродуктивних фаз. Сумарні опади за вегетацію становили лише 150 мм проти 289 мм у 2023 р., що є майже вдвічі меншим показником за вищих температур. Отримані дані підтверджують висновки Baum et al. (2019), які на основі польового експерименту в багатьох локаціях встановили, що погодні умови сезону є домінуючим фактором різниці строків проходження фенологічних фаз і врожайності кукурудзи, при цьому пояснюючи до 70 % загальної дисперсії врожаю порівняно з лише 10 % для відносної стиглості гібриду. Зокрема, дефіцит вологи у критичний підперіод від цвітіння до молочної стиглості визначає темпи розвитку та загальну тривалість вегетації, що і спостерігалось у наших дослідках у 2024 році.

2025 рік був характерний тим, що вегетаційний період був не завершений повністю (дефіцит САТ дорівнював 43 °С), але за цих умов було отримано найвищі показники урожайності. Сівбу було проведено 04.05.2025, а перші сходи зафіксовані лише 26.05.2025. Тобто, через 22 доби після сівби, що є найтривалішим періодом серед усіх років досліджень. Причиною аномального затримання появи сходів стала найнижча середня температура підперіоду від сівби до сходів, яка становила 12,3 °С, та найтриваліший холодний стрес, який тривав 13 діб з мінімальною температурою, °С < 8° С. Водночас, цей підперіод характеризувався значною кількістю опадів (36,2 мм, ГТК = 5,66), що забезпечило достатнє зволоження посівного шару ґрунту на першу половину вегетації. Подальший розвиток рослин кукурудзи відбувався у сприятливих умовах. Фаза V6 настала через 19 діб від сходів (14.06.2025), фаза викидання волоті настала 04.08.2025, тобто через 51 добу від V6. Підперіод V6–VT серед трьох років виявився найдовшим. Цвітіння розпочалось 17.08.2025, тобто через 13 діб від VT – найбільший ASI, тобто Anthesis-Silking Interval (інтервал між цвітінням волоті і початку), серед трьох років), молочна стиглість (R3)

настала 12.09.2025 (через 26 діб від R1). Фаза повної воскової стиглості (R5) у 2025 році не була досягнута (131 доба від сівби до дати завершення спостережень). Розрахункова оцінка на підставі дефіциту САТ (43 °C) дає орієнтовну дату близько 30.09.2025 та загальну тривалість вегетації орієнтовно 149 діб, що є нетиповим для гібриду ДКС 3939 із ФАО 320. Це зумовлено погодними умовами сезону, які сприяли зміщенню критичних генеративних фаз на кінець вегетаційного сезону з подальшим погіршенням температурного режиму.

У своєму п'ятирічному дослідженні Zhao et al. (2022) з гібридами кукурудзи різної тривалості вегетації показали, що скорочення підперіоду від сівби до викиду волоті безпосередньо впливає на зниження врожайності. KiNoshita et al. (2021) підтверджують, що в умовах атмосферної посухи просторова варіабельність врожайності і фенологічних показників всередині поля суттєво зростає, залежно від зон продуктивності. Причому низькопродуктивні зони реагують на стресові умови значно гостріше. Це є важливим методичним підґрунтям для подальшого аналізу впливу зони продуктивності на тривалість міжфазних періодів, оскільки в посушливому 2024 році відмінності між зонами у нашому досліді були найбільш вираженими. Таким чином, всі роки досліджень суттєво відрізнялись за гідротермічними умовами та забезпечили різний фон для виявлення реакції гібриду ДКС 3939 на норму висіву і зону продуктивності. Так 2023 рік, мав нормальний (ГТК ~2,2, вегетація 126 діб), 2024 рік був посушливим (ГТК ~0,8, зменшена вегетація 109 діб, через прискорене завершення циклу за рахунок drought escape). На противагу, 2025 рік із пізніми сходами і незавершеним вегетаційним періодом був найбільш урожайним. Така суттєва різниця в умовах між роками дозволяє коректно інтерпретувати результати впливу агротехнічних факторів на фенологію і врожайність кукурудзи.

Таблиця 3.4

Тривалість міжфазних періодів розвитку кукурудзи ДКС 3939 залежно від норм висіву та зон продуктивності поля, 2023 рік (сівба 03.05.2023)

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	Сівба → Сходи (VE)		Сходи → V6 (змикання)		V6 → Волоть (VT)		VT → R1 (ASI)		R1 → Молочна (R3)		R3 → Воскова (R5)		Підсумок		
		Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Всього днів	Δ від контр. (дні)	Від сівби до R5
Високої	65	15,0	-1,0	20,5	-0,5	49,0	+2,0	8,5	-1,5	22,0	+5,0	18,5	+3,5	118,5	+8,5	133,5
	70	15,0	-1,0	20,3	-0,7	48,4	+1,4	9,1	-0,9	21,2	+4,2	17,9	+2,9	116,9	+6,9	131,9
	75	15,0	-1,0	20,0	-1,0	47,5	+0,5	10,0	-	20,0	+3,0	17,0	+2,0	114,5	+4,5	129,5
	80	15,0	-1,0	19,7	-1,3	46,6	-0,4	10,9	+0,9	18,8	+1,8	16,1	+1,1	112,1	+2,1	127,1
	85	15,0	-1,0	19,5	-1,5	46,0	-1,0	11,5	+1,5	18,0	+1,0	15,5	+0,5	110,5	+0,5	125,5
Середньої	65	16,0	-	21,8	+0,8	50,0	+3,0	9,0	-1,0	19,0	+2,0	16,5	+1,5	116,3	+6,3	132,3
	70	16,0	-	21,5	+0,5	48,8	+1,8	9,4	-0,6	18,2	+1,2	15,9	+0,9	113,8	+3,8	129,8
	75	16,0	-	21,0	-	47,0	-	10,0	-	17,0	-	15,0	-	110,0	-	126,0
	80	16,0	-	20,5	-0,5	45,2	-1,8	10,6	+0,6	15,8	-1,2	14,1	-0,9	106,2	-3,8	122,2
	85	16,0	-	20,2	-0,8	44,0	-3,0	11,0	+1,0	15,0	-2,0	13,5	-1,5	103,7	-6,3	119,7
Низької	65	18,0	+2,0	22,4	+1,4	44,6	-2,4	6,5	-3,5	10,0	-7,0	11,5	-3,5	95,0	-15,0	113,0
	70	18,0	+2,0	22,2	+1,2	43,9	-3,1	7,8	-2,2	9,6	-7,4	10,9	-4,1	94,4	-15,6	112,4
	75	18,0	+2,0	22,0	+1,0	42,9	-4,1	10,0	-	9,0	-8,0	10,0	-5,0	93,9	-16,1	111,9
	80	18,0	+2,0	21,8	+0,8	41,9	-5,1	12,2	+2,2	8,4	-8,6	9,1	-5,9	93,4	-16,6	111,4
	85	18,0	+2,0	21,6	+0,6	41,2	-5,8	13,5	+3,5	8,0	-9,0	8,5	-6,5	92,8	-17,2	110,8

Таблиця 3.5

Тривалість міжфазних періодів розвитку кукурудзи ДКС 3939 залежно від норм висіву та зон продуктивності поля, 2023 рік (сівба 01.05.2024)

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	Сівба → Сходи (VE)		Сходи → V6 (змикання)		V6 → Волоць (VT)		VT → R1 (ASI)		R1 → Молочна (R3)		R3 → Воскова (R5)		Підсумок		
		Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Всього	Δ від контр.	Від сівби
Високої	65	18,0	-1,0	20,5	-0,5	35,3	+1,3	8,6	-1,4	16,6	+3,6	12,9	+0,9	93,9	+3,9	111,9
	70	18,0	-1,0	20,3	-0,7	34,9	+0,9	9,2	-0,8	16,0	+3,0	12,7	+0,7	93,1	+3,1	111,1
	75	18,0	-1,0	20,0	-1,0	34,3	+0,3	10,0	0	15,2	+2,2	12,5	+0,5	92,0	+2,0	110,0
	80	18,0	-1,0	19,7	-1,3	33,7	-0,3	10,8	+0,8	14,3	+1,3	12,3	+0,3	90,8	+0,8	108,8
	85	18,0	-1,0	19,5	-1,5	33,3	-0,7	11,4	+1,4	13,7	+0,7	12,1	+0,1	90,0	+0,0	108,0
Середньої	65	19,0	0	21,8	+0,8	36,0	+2,0	9,1	-0,9	14,4	+1,4	12,4	+0,4	93,7	+3,7	112,7
	70	19,0	0	21,5	+0,5	35,2	+1,2	9,5	-0,5	13,9	+0,9	12,2	+0,2	92,2	+2,2	111,2
	75	19,0	0	21,0	0	34,0	0	10,0	0	13,0	0	12,0	0	90,0	0	109,0
	80	19,0	0	20,5	-0,5	32,8	-1,2	10,5	+0,5	12,1	-0,9	11,8	-0,2	87,8	-2,2	106,8
	85	19,0	0	20,2	-0,8	32,0	-2,0	10,9	+0,9	11,6	-1,4	11,6	-0,4	86,1	-3,9	105,1
Низької	65	21,0	+2,0	22,4	+1,4	31,1	-2,9	7,2	-2,8	6,5	-6,5	10,9	-1,1	78,1	-11,9	99,1
	70	21,0	+2,0	22,2	+1,2	30,3	-3,7	8,3	-1,7	6,1	-6,9	10,8	-1,2	77,5	-12,5	98,5
	75	21,0	+2,0	22,0	+1,0	29,1	-4,9	10,0	0	5,6	-7,4	10,5	-1,5	77,1	-12,9	98,1
	80	21,0	+2,0	21,8	+0,8	27,8	-6,2	11,7	+1,7	5,0	-8,0	10,2	-1,8	76,5	-13,5	97,5
	85	21,0	+2,0	21,6	+0,6	27,0	-7,0	12,8	+2,8	4,6	-8,4	10,0	-2,0	76,0	-14,0	97,0

Таблиця 3.6

Тривалість міжфазних періодів розвитку кукурудзи ДКС 3939 залежно від норм висіву та зон продуктивності поля, 2025 рік (сівба 04.05.2025)

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	Сівба → Сходи (VE)		Сходи → V6		V6 → Волоть (VT)		VT → R1 (ASI)		R1 → Молочна (R3)		R3 → Воскова (R5)		Підсумок		
		Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Днів	Δ від контр.	Всього днів	Δ від контр.	Від сівби
Високої	65	21,0	-1,0	18,5	-0,5	53,0	+2,0	11,5	-1,5	31,0	+5,0	~21,5	+3,5	135,5	+8,5	156,5
	70	21,0	-1,0	18,3	-0,7	52,4	+1,4	12,1	-0,9	30,2	+4,2	~20,9	+2,9	133,9	+6,9	154,9
	75	21,0	-1,0	18,0	-1,0	51,5	+0,5	13,0	-	29,0	+3,0	~20,0	+2,0	131,5	+4,5	152,5
	80	21,0	-1,0	17,7	-1,3	50,6	-0,4	13,9	+0,9	27,8	+1,8	~19,1	+1,1	129,1	+2,1	150,1
	85	21,0	-1,0	17,5	-1,5	50,0	-1,0	14,5	+1,5	27,0	+1,0	~18,5	+0,5	127,5	+0,5	148,5
Середньої	65	22,0	-	19,8	+0,8	54,0	+3,0	12,0	-1,0	28,0	+2,0	~19,5	+1,5	133,3	+6,3	155,3
	70	22,0	-	19,5	+0,5	52,8	+1,8	12,4	-0,6	27,2	+1,2	~18,9	+0,9	130,8	+3,8	152,8
	75	22,0	-	19,0	-	51,0	-	13,0	-	26,0	-	~18,0	-	127,0	-	149,0
	80	22,0	-	18,5	-0,5	49,2	-1,8	13,6	+0,6	24,8	-1,2	~17,1	-0,9	123,2	-3,8	145,2
	85	22,0	-	18,2	-0,8	48,0	-3,0	14,0	+1,0	24,0	-2,0	~16,5	-1,5	120,7	-6,3	142,7
Низької	65	24,0	+2,0	20,4	+1,4	46,7	-4,3	8,1	-4,9	22,5	-3,5	~14,5	-3,5	112,2	-14,8	136,2
	70	24,0	+2,0	20,2	+1,2	45,5	-5,5	10,0	-3,0	22,3	-3,7	~13,9	-4,1	111,9	-15,1	135,9
	75	24,0	+2,0	20,0	+1,0	43,6	-7,4	13,0	-	22,0	-4,0	~13,0	-5,0	111,6	-15,4	135,6
	80	24,0	+2,0	19,8	+0,8	41,7	-9,3	16,0	+3,0	21,7	-4,3	~12,1	-5,9	111,3	-15,7	135,3
	85	24,0	+2,0	19,6	+0,6	40,5	-10,5	17,9	+4,9	21,5	-4,5	~11,5	-6,5	111,0	-16,0	135,0

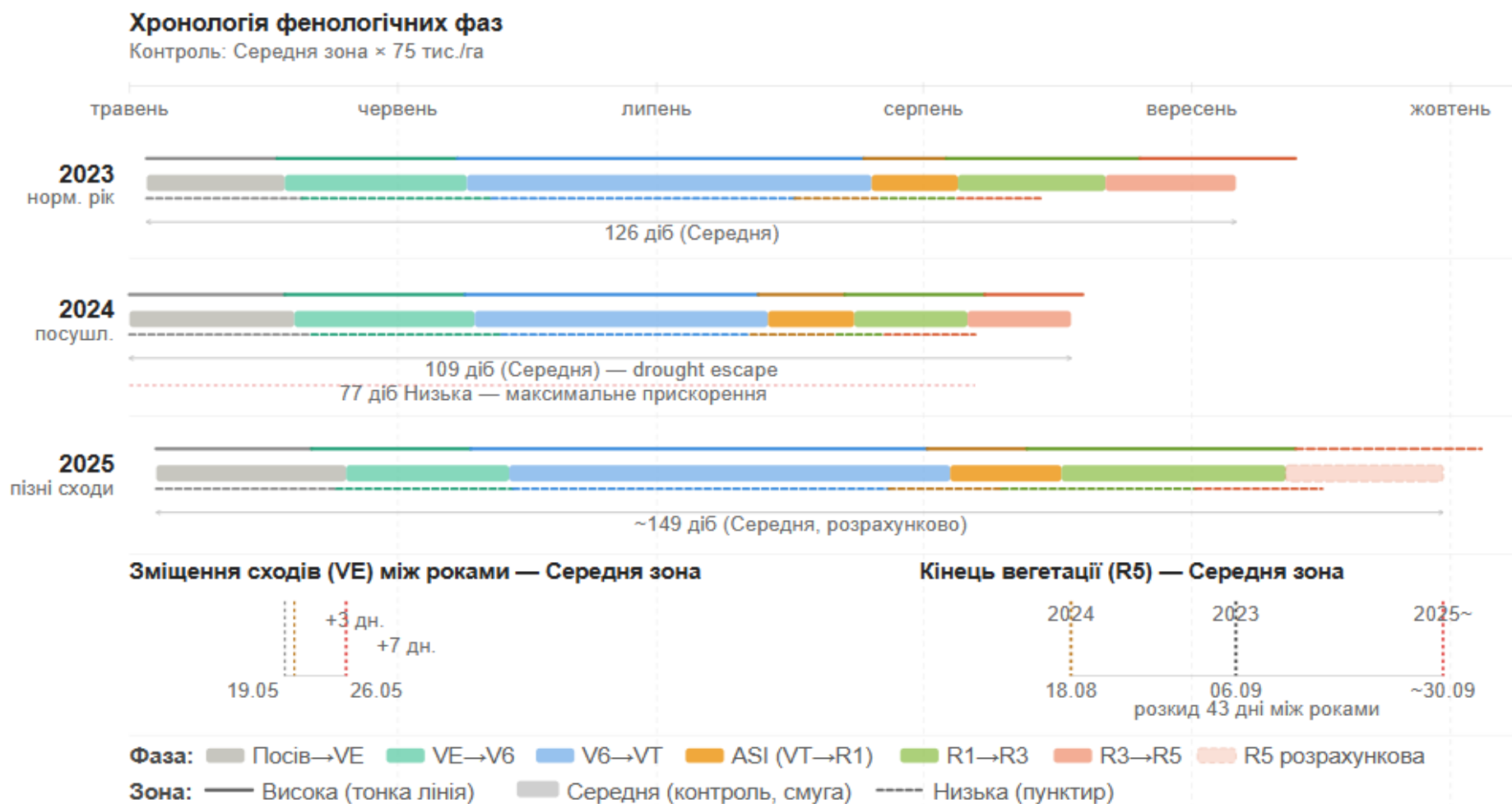


Рис. 3.2. Фенологічна хронологія проходження фаз розвитку гібриду ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від зони продуктивності та року, усереднено за 2023–2025 рр.

Тривалість міжфазних періодів у більшій мірі залежить від зон продуктивності поля, адже умови вирощування прямо впливають на розвиток рослин. На рисунку 3.2 графічно відображено різницю тривалості фенофаз рослин кукурудзи залежно від року проведення дослідження. На рисунку видно значну різницю між роками проведених досліджень, в той же час, вплив норми висіву менший, проте він також спостерігається. Норма висіву насіння, як агротехнічний фактор впливає на фенологічний розвиток кукурудзи, в першу чергу, шляхом зміни інтенсивності конкуренції між рослинами в рядку, особливо за вологу, а також на більш пізніх етапах і за такі ресурси, як світло та поживні елементи. Загущення посівів у високопродуктивних зонах сприяє зменшення вегетаційного періоду, а зрідження посівів в низькопродуктивних зонах, навпаки, – подовжує тривалість фенологічних фаз. Від так, це допомагає частково зменшити строкатість посівів та частково вирівняти однорідність посівів, проте цей ефект є частковим, адже зона продуктивності куди більш впливовий чинник.

В таблиці 3.7 подано усереднені дані за зонами продуктивності та роками досліджень з метою дослідження впливу саме норм висіву насіння на тривалість проходження фенофаз. Відповідно до отриманих даних тривалість підперіоду від сівби до отримання сходів (VE) не залежала від норми висіву і становила у середньому 19,3 доби в усіх варіантах досліду. Це пояснюється тим, що процес проростання насіння і появи сходів залежить виключно від температури ґрунту та наявності вологи в припосівному шарі ґрунту. На даному етапі міжрослинна конкуренція неможлива. Проте, починаючи з фази V6 вплив норми висіву на темп розвитку рослин і тривалість міжфазних періодів стає більш помітним. А саме, тривалість підперіоду VE–V6 (від сходів до формування 6-го листка) зменшувалась із збільшенням норми висіву від 20,9 доби за 65 тис./га до 19,8 доби за 85 тис./га (різниця 1,1 доби). Це пояснюється початком внутрішньої конкуренції рослин за ресурси.

Найвиразнішою реакцією норми висіву була у підперіоді V6–VT (від змикання рядків до викидання волоті). Результати свідчать про те, що за норми

65 тис./га період тривав у середньому 44,4 доби, тоді як за 85 тис./га, період тривав лише 40,2 доби, тобто скорочення становило 4,2 доби порівняно з нижчою нормою і 2,1 доби відносно контролю (75 тис./га). Таке прискорення розвитку за загущення посівів пояснюється посиленою конкуренцією за фотосинтетично активну радіацію, тобто в загущених посівах більше самозатінення рослин. До того ж у щільному стеблостой рослин прискорено формують і витягують стебло і листостебельний апарат, скорочуючи тривалість фаз вегетації. На підтвердження цьому, дослідження Xu et al. (2023) показали, що загущення суттєво змінює розподіл фотосинтетично активної радіації в посівах, а фотоперіодична реакція рослин на умови затінення у фазах V7–V11 прискорює перехід до генеративного розвитку.

Таблиця 3.7

Тривалість міжфазних та вегетаційного періоду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву (середнє за зонами продуктивності та роками досліджень 2023–2025 рр.)

Норма висіву, тис/га	Тривалість міжфазних періодів, діб							Вегетаційний період, діб	
	Сівба → VE	VE → V6		V6 → VT		VT → R1 (ASI)			
	діб	діб	Δ	діб	Δ	діб	Δ	VE→R5	Посів→R5
65	19,3	20,9	+0,6	50,1	+2,4	9,2	−2,1	138,1	157,5
70	19,3	20,7	+0,4	49,2	+1,5	10,0	−1,3	136,5	155,9
75	19,3	20,3	-	47,7	-	11,3	-	134,0	153,5
80	19,3	20,0	−0,3	46,3	−1,4	12,6	+1,3	131,7	151,1
85	19,3	19,8	−0,5	45,4	−2,3	13,4	+2,1	130,1	149,40

Найбільший вплив збільшення норми висіву спостерігався у період між викиданням волоті та цвітінням. За зменшеної норми 65 тис./га період становив у середньому 8,9 доби, за контролю 75 тис./га – 11,0 діб. За максимальної норми 85 тис./га показник становив 13,1 діб. Таким чином, збільшення норми від 65 до 85 тис./га зумовлювало подовження періоду від

викидання волоті до цвітіння на 4,2 доби. За вказаних умов, подовження періоду свідчить про десинхронізацію між цвітінням чоловічого та жіночого суцвіття, що є прямим наслідком посиленої конкуренції рослин у критичний для запліднення період. У своєму дослідженні Larrosa та Borrás (2022) показали, що гібриди, чутливі до зниження фотосинтетично активної радіації навколо цвітіння, демонструють суттєве зростання тривалості періоду від викидання волоті до цвітіння при збільшенні густоти стеблостою. Подовження ASI понад 10–12 діб є фактором ризику недозапліднення і формування черезерниці, що безпосередньо позначається на якості та структурі врожаю кукурудзи.

Підперіоди від наливу зерна до молочної стиглості та від настання молочної стиглості до повної воскова стиглості, зменшувались по мірі збільшення норми висіву насіння (табл. 3.8). А саме, за норми 65 тис./га тривалість R1–R3 становила 18,9 доби, а за норми висіву 85 тис./га тривалість скорочувалась до 15,9 доби (скорочення на 3,0 доби; відносно контролю це становило 1,5 доби). Аналогічна тенденція спостерігалась у підперіоді R3–R5, тривалість періоду від 15,4 доби за 65 тис./га, до 13,1 доби за 85 тис./га. Скорочення тривалості наливу зерна за загушення є несприятливим явищем, оскільки зменшує тривалість активного фотосинтезу в генеративний період і, відповідно, потенціал накопичення сухої речовини зерна. Zhao et al. (2022) у п'ятирічному досліді з гібридами різної групи стиглості встановили значущий негативний зв'язок між тривалістю міжфазних періодів та індексом врожайності, а також між тривалістю активного фотосинтезу після викидання волоті і продуктивністю посіву.

Загальна тривалість вегетаційного періоду від появи сходів до воскової стиглості (VE→R5) скорочувалась із збільшенням норми висіву. А саме, від 108,5 доби за 65 тис./га до 102,0 доби за 85 тис./га, тобто на 6,5 доби. Від сівби до воскової стиглості (сівба→R5) аналогічний діапазон становив 127,8–121,4 доби (різниця 6,4 доби). Важливо підкреслити, що скорочення загальної тривалості вегетації за загушення відбувається не за рахунок прискорення

корисного – вегетативного росту або тривалості наливу, а передусім за рахунок скорочення генеративних фаз в умовах посиленої конкуренції. Dos Santos et al. (2022) показали, що темп появи листків у кукурудзи та тривалість вегетативних періодів тісно пов'язані з інтенсивністю радіаційного навантаження і темпом росту рослини – чинниками, які суттєво модифікуються за зміни густоти стеблостою.

Таблиця 3.8

Тривалість генеративного періоду та відхилення вегетаційного циклу, усереднені дані за зонами продуктивності та роками досліджень (2023–2025 рр.)

Норма висіву, тис./га	R1 → R3 (молочна), діб	Δ від контр.	R3 → R5 (воскова), діб	Δ від контр.	VE → R5, діб	Δ від контр.	Сівба → R5, діб	Δ від контр.
65	18,9	+1,5	15,4	+1,2	108,5	+3,2	127,8	+3,2
70	18,3	+0,9	14,9	+0,7	107,2	+1,9	126,5	+1,9
75	17,4	-	14,2	-	105,3	-	124,6	-
80	16,5	-0,9	13,5	-0,7	103,4	-1,9	122,7	-1,9
85	15,9	-1,5	13,1	-1,1	102,0	-3,3	121,4	-3,2

Таким чином, збільшення норми висіву від 65 до 85 тис./га спричиняє закономірне прискорення вегетативного розвитку рослин кукурудзи, подовження критичного інтервалу цвітіння та скорочення тривалості генеративних фаз. Загальний ефект полягає у скороченні вегетаційного циклу на 6,5 доби, однак із погіршенням умов для реалізації генеративного потенціалу посіву. Вагоме значення норми висіву у формуванні фенологічних показників підтверджується і у взаємодії з фактором зони продуктивності, що детально розглядається далі.

Більш виражений вплив на тривалість проходження фенологічних фаз показує другий піддослідний фактор – зона продуктивності поля. Фактично

зона продуктивності відображає сукупність едафічних і мікрокліматичних умов окремих ділянок поля. До них відносять водоутримуючу здатність ґрунту, його щільність, забезпеченість елементами живлення та тепловий режим кореневмісного шару. Ці характеристики безпосередньо визначають доступність ресурсів для рослини на кожному етапі онтогенезу і, як наслідок, темп проходження фенологічних фаз. Результати трирічних досліджень, усереднені за зонами продуктивності, демонструють суттєву диференціацію тривалості міжфазних періодів між зонами продуктивності (табл. 3.9).

На відміну від норми висіву, зона продуктивності чинила помітний вплив на тривалість періоду сівба – VE. У високопродуктивній зоні сходи з'являлись у середньому через 18,0 діб після сівби, що на 1,0 добу менше ніж у середньопродуктивній зоні. У зоні низької продуктивності поля цей показник становив 21,0 добу, що на 2,0 доби більше від середньопродуктивної зони і на 3,0 доби більше ніж у високопродуктивній зоні. Затримка із отриманням сходів в низькопродуктивній зоні зумовлена гіршим тепловим режимом посівного шару ґрунту через підвищену щільність і знижену теплопровідність. Варто враховувати, що менш стабільний водний режим і нижча водоутримуюча здатність ґрунту призводять до уповільнення проростання насіння. У своєму дослідженні KiNoshita et al. (2021) підтверджують, що просторова неоднорідність ґрунтових умов у межах поля формує стійкі відмінності у строках появи сходів, які відтворюються між роками і є характеристикою зони, а не випадковим явищем, що чітко і беззаперечно узгоджується із нашими результатами.

Таблиця 3.9

Тривалість міжфазних та вегетаційного періоду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від зони продуктивності, усереднено по зонах продуктивності за 2023–2025 рр.

Низької	Середньої	Високої	Зона продуктивності
21,0	19,0	18,0	Сівба → VE, діб
+2,0	-	-1,0	Δ
21,3	20,3	19,3	VE → V6, діб
+1,0	-	-1,0	Δ
38,5	44,0	44,4	V6 → VT, діб
-5,5	-	+0,4	Δ
11,0	11,0	11,0	VT → R1 (ASI), діб
-	-	-	Δ
12,2	18,7	21,4	R1 → R3, діб
-6,5	-	+2,7	Δ
11,2	15,0	16,5	R3 → R5, діб
-3,8	-	+1,5	Δ
94,2	109,0	112,7	VE → R5, діб
115,2	128,0	130,7	Сівба → R5, діб

Найбільш виразна реакція на зону продуктивності спостерігалась у періоді від змикання рядків до викидання волоті, тобто V6–VT. У високопродуктивній зоні поля його тривалість становила 44,4 доби, що на +0,4 більше ніж у середньопродуктивній зоні. У низькопродуктивній зоні тривалість періоду V6 – VT становила лише 38,5 доби, що на 5,5 доби менше ніж в зоні середньої продуктивності та на 5,9 доби менше ніж у високопродуктивній зоні. Таке суттєве прискорення вегетаційного розвитку в низькопродуктивній зоні є проявом механізму drought escape або дослівно «втеча від посухи», тобто адаптивної реакції рослини на нестачу вологи. Суть явища полягає в прискоренні переходу від вегетаційної до генеративної фази для завершення репродуктивного циклу до настання найгострішого дефіциту вологи. Дослідники Xu et al. (2017) у своєму трирічному багатофакторному

дослідженні встановили, що в умовах обмеженого ресурсного забезпечення, тобто в умовах постійного дефіциту, кукурудза демонструє пришвидшення перебігу вегетативних фаз зі зниженням оптимальних значень індексу листової поверхні у період викидання волоті. Зниження індексу листової поверхні є прямим наслідком скороченого вегетативного періоду.

Особливістю результатів нашого дослідження, стало те, що зона продуктивності практично не впливала на тривалість ASI. Тобто в усіх трьох зонах цей показник становив 11,0 доби. Це свідчить про те, що десинхронізація між цвітінням чоловічого та жіночого суцвіття визначається переважно нормою висіву (конкуренцією між рослинами), а не загальними умовами зони. Слід зазначити, що у посушливому 2024 році взаємодія зони продуктивності та погодних умов суттєво модифікувала ASI у низькопродуктивній зоні, особливо за підвищених норм висіву, збільшуючи тривалість проходження фази. Пояснення цьому можна знайти в дослідженні Larrosa та Borrás (2022), які показали, що реакція ASI на зовнішні стресові чинники залежить по більшій мірі від специфіки гібриду кукурудзи і тісно пов'язана з чутливістю генотипу до зниження радіації та дефіциту вологи у період цвітіння.

Найважливіші висновки дослідження стосуються в першу чергу впливу зони продуктивності безпосередньо на тривалість генеративних фаз. Тривалість періоду R1–R3, тобто від цвітіння до молочної стиглості, у високопродуктивній зоні становила 21,4 доби. Це на 2,7 доби більше тривалості в зоні середньої продуктивності. Проте у низькопродуктивній зоні цей підперіод скоротився до 12,2 діб, що на 6,5 діб менше від аналогічного періоду в середньо продуктивній зоні. Різниця між низькою та високою зонами продуктивності сягала 9,2 діб, що є досить суттєвим показником. Особливо з огляду на те, що саме тривалість періоду наливу зерна визначає масу 1000 зерен і продуктивність початку. Аналогічна закономірність спостерігалась у періоді від молочної до воскової стиглості, R3–R5. Тривалість цієї фази у зоні високої продуктивності становила 16,5 діб, що на 1,5 діб більше ніж у зоні середньої продуктивності. А в зоні низької продуктивності показник становив

всього 11,2 доби, тобто на 3,8 діб менше ніж в середньопродуктивній зоні. Скорочення генеративного періоду в низькопродуктивній зоні є прямим наслідком раніше описаного drought escape. Ми спостерігаємо на прикладі отриманих даних, що рослина, яка прискорено пройшла вегетативні фази в умовах стресу, має знижений потенціал акумуляції асимілятів у зерні через коротший ефективний підперіод наливу зерна. Zhao et al. (2022) встановили значущий зв'язок між тривалістю активного фотосинтезу після викидання волоті і врожайністю зерна. Причому ефективність використання світлових і теплових ресурсів у цей підперіод є ключовим фактором диференціації продуктивності між гібридами і умовами вирощування.

Узагальнена тривалість вегетаційного циклу гарно підсвічує ефект від зональної диференціації поля. Тривалість вегетації кукурудзи від сходів до воскової стиглості (VE→R5) у високопродуктивній зоні в середньому становила 112,7 діб, у середньопродуктивній зоні тривалість була 109,0 діб, а у низькопродуктивній всього лише 94,2 доби. Різниця між високо- і низькопродуктивними зонами становить 18,5 доби, що охоплює майже три тижні вегетаційного циклу. Від сівби до воскової стиглості аналогічний розрив сягав 15,5 діб, а саме 130,7 у зоні високої продуктивності та 115,2 доби низької. В своєму дослідженні KiNoshita et al. (2021) наголошують, що подібна просторово-часова варіабельність фенологічних показників у межах одного поля є системним явищем, зумовленим стійкими відмінностями у водозабезпеченні зон, і особливо посилюється в посушливі роки. Аналогічні дані було отримано і в наших дослідженнях, зокрема за 2024 р.

Зона продуктивності є потужним та самодостатнім фактором, який і є основою диференціації тривалості фенологічного розвитку кукурудзи. Його дія реалізується через два принципово різних механізми. По-перше, в низькопродуктивній зоні відбувається прискорення вегетативних фаз внаслідок drought escape, що скорочує тривалість вегетативного підперіоду V6–VT. По-друге, і це є найбільш критичним для формування врожаю, у низькопродуктивній зоні суттєво скорочується тривалість генеративного

періоду, тобто налив зерна відбувається в середньому на 9,2 доби швидше ніж у високопродуктивній зоні. Вплив зони продуктивності на загальну тривалість вегетаційного циклу становить 18,5 діб між високо- та низькопродуктивними зонами, що значно перевищує ефект норми висіву. Різниця між крайніми нормами висіву становила 6,5 діб, що свідчить про домінування фактора зони продуктивності над фактором норми висіву насіння у формуванні фенологічних показників посіву.

3.3. Вплив норм висіву та зон продуктивності поля на висоту рослин кукурудзи

Висота рослин є прямим морфологічним показником, який відображає інтенсивність вегетативного росту та реакцію гібриду на умови вирощування та агротехнологічні заходи. У посівах кукурудзи висота рослин залежить від багатьох факторів, серед них ключове місце посідає взаємодія генетичного потенціалу гібриду з агротехнічними чинниками. Одним з ключових агротехнічних факторів є норма висіву, яка посідає особливе місце через її вплив на інтенсивність конкуренції між рослинами в посівах за фотосинтетично активну радіацію та продуктивну вологу. Результати трирічних досліджень демонструють агрономічно важливу залежність висоти рослин від норми висіву на різних етапах онтогенезу (табл. 3.10). Вимірювання висоти рослин здійснювалось на етапах 2-4 справжніх листків та у фазу цвітіння.

Таблиця 3.10

Висота рослин кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву у фазах V2-V4 та R1 (усереднені дані за зонами продуктивності)

Норма висіву, тис/га	Висота рослин у фазу V2–V4, см				Висота рослин у фазу R1 (цвітіння), см			
	2023	2024	2025	Середнє	2023	2024	2025	Середнє
65	19,3	17,1	18,3	18,2(+0,3)	195,0	163,0	175,0	177,7(–12,7)
70	19,9	16,5	18,7	18,4(+0,5)	205,0	170,0	182,0	185,7 (–4,7)
75	19,2	16,4	18,1	17,9	211,0	174,3	186,0	190,4
80	19,0	16,9	18,3	18,1(+0,2)	211,7	174,0	186,0	190,6 (+0,2)
85	19,8	16,5	18,4	18,2(+0,3)	206,7	170,7	183,7	187,0 (–3,4)

На початкових етапах вегетативного розвитку рослин кукурудзи (фаза 2–4 листків) норма висіву практично не впливала на висоту рослин. А саме, середні значення по варіантах дослідів коливались у вузькому діапазоні від 17,9 см до 18,4 см. Тобто різниця між крайніми варіантами становила лише 0,5 см. Відсутність реакції на норму висіву у фазу 2–4 листків є закономірною, адже надземна маса рослин і площа листкової поверхні ще незначні, а міжрослинна конкуренція за світло та інші ресурси фактично відсутня. У цей період визначальними факторами росту і розвитку є температура і вологість ґрунту, тобто різниця спостерігатиметься між різними зонами поля. Суттєво більший вплив на висоту у цей період чинили погодні умови року. Відповідно, у посушливому 2024 р. висота рослин у фазу V2–V4 була в середньому на 2,1–2,8 см меншою ніж у 2023 р., що підтверджує попередній висновок про ключовий вплив факторів температури та вологості в цей період. Зменшення висоти рослин кукурудзи свідчить про пригнічення раннього вегетативного

росту в умовах дефіциту вологи і холодового стресу у період від сівби до отримання сходів та формування 2-4 справжніх листків.

На відміну від фази V2-V4, інша ситуація спостерігалась у фазу цвітіння (R1), коли посіви кукурудзи зімкнули рядки повністю та досягли максимальної густоти і міжрослинна конкуренція за ресурси реалізувалась повною мірою. Залежність висоти рослин від норми висіву мала не лінійний, а параболічний характер із максимумом за норми 80 тис./га (табл. 3.10). За максимальної норми 85 тис./га, висота рослин зменшувалась, що зображено на рисунку 3.3.

За мінімальної норми висіву 65 тис./га середня висота рослин у фазу R1 становила 177,7 см, що на 12,7 см менше від норми 75 тис./га, де середня висота становила 190,4 см. Зниження висоти за зрідженого стеблостою можна пояснити зменшенням конкуренції за фотосинтетично активну радіацію між рослинами. У таких умовах рослини розвиваються за достатнього освітлення і залишаються більш приземкуватими. У дослідженні Jin et al. (2023) показали, що розподіл світла у посіві є ключовим регулятором морфогенезу стебла кукурудзи. Вони дійшли висновку, що за умов достатнього освітлення рослини формують коротший, але механічно міцніший стебловий апарат. Тоді, як загущення стимулює витягування стебла вгору через фітохромну реакцію на підвищення співвідношення червоного та інфрачервоного спектрів сонячного світла. Негативним наслідком витягування стебла можна назвати зменшення стійкості до вилягання посівами.

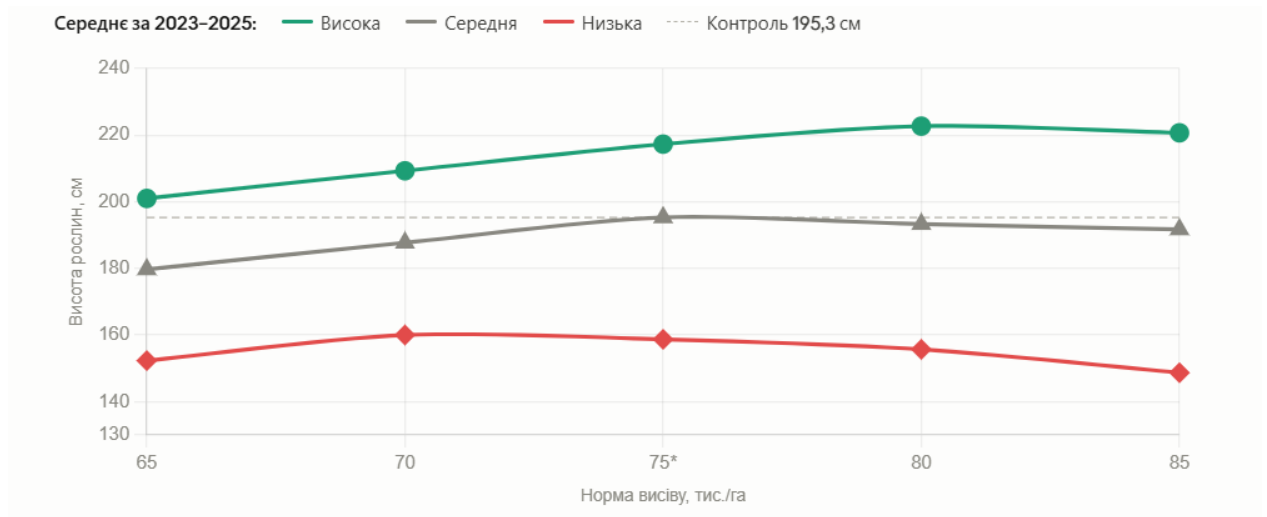


Рис. 3.3. Середня висота рослин у фазу R1 залежно від норми висіву

За збільшення норми висіву від 65 до 80 тис./га висота рослин закономірно зростала, реагуючи на загущення. За норми 65 тис./га середня висота рослин становила 177,7 см, а із загущення до 80 тис./га висота лінійно зростала до 190,6 см. Приріст у вигляді 12,9 см є прямим відображенням посилення конкуренції за світло між рослинами кукурудзи у посіві. Зі збільшенням густоти стеблостою взаємне затінення рослин та міжрослинна конкуренція активує реакцію уникнення тіні. Така реакція проявляється у збільшенні міжвузлів і, як наслідок, збільшенні загальної висоти рослини. Сui et al. (2022) у дослідженні з сучасними гібридами кукурудзи встановили, що збільшення густоти посіву супроводжується пропорційним зростанням висоти рослин і висоти прикріплення початку. При чому, вони зауважили, що цей ефект реалізується переважно через прискорення росту стебла у період від V6, тобто 6 справжніх листів, до викидання волоті, тобто VT. Це збігається з нашими даними про скорочення тривалості цього періоду за загущення посівів.

Важливим результатом є те, що за подальшого збільшення норми від 80 до 85 тис./га висота рослин не зростала лінійно, а навпаки – знижувалась. Таким чином, ми отримали параболічну залежність, де за норми 85 тис./га висота становила 187,0 см, що на 3,6 см менше відносно варіанту 80 тис./га і

3,4 см відносно варіанту із нормою 75 тис./га. Отримані результати дають підстави стверджувати, що за загущення рослин кукурудзи в посівах, конкуренція за ресурси, передусім за воду та елементи живлення, починає пригнічувати ростові процеси. Пригнічення ростових процесів дозволяє рослинам компенсувати і навіть переважити стимулюючий витягування ефект конкуренції за фотосинтетично активну радіацію в посівах. Larrosa та Borrás (2022) показали, що за перевищення оптимальної густоти посіву накопичення біомаси рослиною у критичний підперіод (цвітіння) знижується. Це є наслідком одночасного дефіциту і фотосинтетично активної радіації, і водних ресурсів у загущеному стеблостій. В той же час, дослідження Noland et al. (2025) підтверджують, що оптимальна густота стояння рослини у посівах, яка визначається нормою висіву і шириною міжряддя, критично впливає на кінцеву продуктивність. Вони також наголошують, що цей ефект проявляється саме через баланс між конкуренцією за світло і лімітуючою конкуренцією за ґрунтові ресурси.

Варто також підкреслити значну відмінність отриманих результатів за порівняння між роками проведених досліджень. У посушливому 2024 р. висота рослин у фазу R1 була у середньому на 35–40 см меншою ніж у сприятливому 2023 р. Так, за норми 75 тис./га середня висота рослин в 2024 році становила 174,3 см. Для порівняння, у 2023 році висота рослин становила 211,0 см. Показовим є те, що відносна реакція на норму висіву у посівах залишалась стабільною між роками. Жоден рік не показав лінійної залежності висоти від норми висіву, тільки параболічна залежність із максимумом за норми висіву 80 тис./га. Такі дані свідчать про не ситуативний характер отриманих даних, а про чітку закономірність.

Отже, нами було встановлено, що норма висіву чинить різний вплив на висоту рослин кукурудзи. Залежно від фази онтогенезу, наприклад у період початку вегетації, від отримання сходів до 2-4 справжніх листків цей вплив є несуттєвим. В той же час, як до фази цвітіння (R1) формується чітка нелінійна залежність із оптимумом за норми висіву 80 тис./га. Зниження висоти за норм

нижче оптимуму (65–70 тис./га) зумовлене недостатньою конкуренцією за світло. Тоді, як зниження висоти за норми 85 тис./га є наслідком надмірної конкуренції за ґрунтові ресурси.

З точки зору впливу на висоту рослин, зона продуктивності поля являє собою більший інтерес для дослідження. Адже фактор зони продуктивності поля являє собою сукупність ґрунтових і мікрокліматичних умов. Всі ці умови визначають доступність для рослини води, елементів живлення і тепла, що є ключовими ресурсами для забезпечення активного вегетативного росту.

Таблиця 3.11

Висота рослин кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу R1 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2023–2025рр., см

Зона	Норма, тис/га	2023	2024	2025	Середнє за роками	Δ від контролю, см
Високопродуктивна	65	225	178	200	201,0	+5,7
	70	235	185	208	209,3	+14,0
	75	245	192	215	217,3	+22,0
	80	252	196	220	222,7	+27,4
	85	250	194	218	220,7	+25,4
	Середнє по зоні				214,2	+18,9
Середньопродуктивна	65	200	164	175	179,7	–15,6
	70	210	171	182	187,7	–7,6
	75	220	178	188	195,3	-
	80	218	176	186	193,3	–2,0
	85	215	175	185	191,7	–3,6
	Середнє по зоні				189,5	–5,8
Низькопродуктивна	65	160	147	150	152,3	–43,0
	70	170	154	156	160,0	–35,3
	75	168	153	155	158,7	–36,6

Зона	Норма, тис/га	2023	2024	2025	Середнє за роками	Δ від контролю, см
	80	165	150	152	155,7	-39,6
	85	155	143	148	148,7	-46,6
	Середнє по зоні				155,1	-40,2

Результати трирічних досліджень демонструють, що вплив зони продуктивності на висоту рослин у фазу цвітіння (R1) є значно сильнішим ніж вплив норми висіву. Цей вплив реалізується в першу чергу через інший механізм, а саме через обмеження ресурсної складової росту і розвитку, а не через конкуренцію за світло (табл. 3.11).

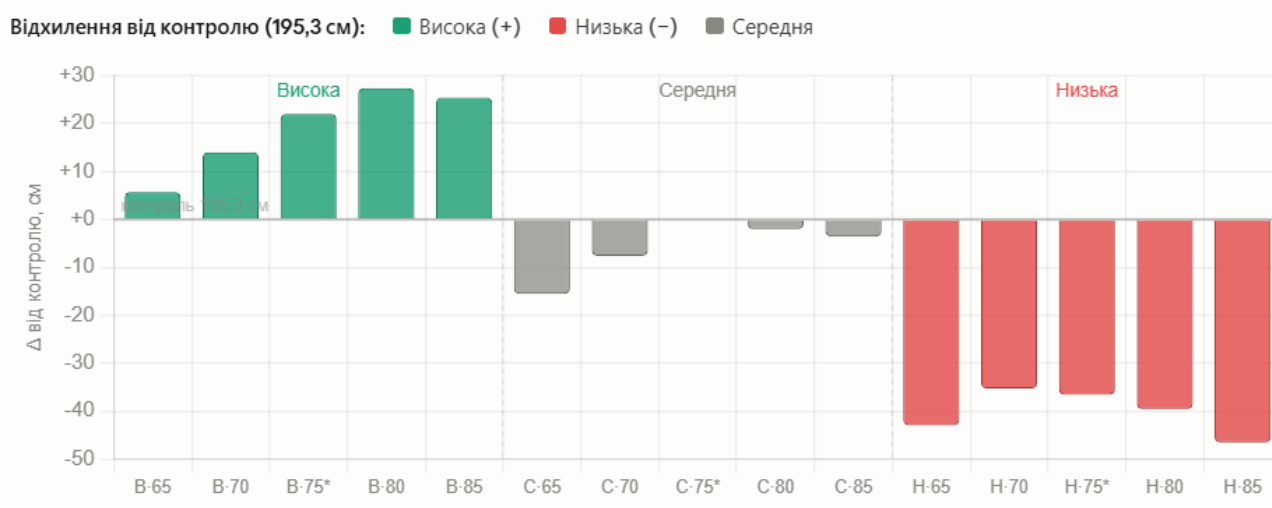


Рис. 3.4. Середня висота рослин залежно від зон продуктивності поля та норми висіву, усереднені дані за 2023–2025 рр.

На рисунку 3.4 ми можемо спостерігати різницю у висоті рослин залежно від зон продуктивності. Середня висота рослин у фазу R1, усереднена по всіх нормах висіву і роках досліджень, становила у високопродуктивній зоні 214,2 см, що на 18,9 см більше ніж висота в зоні середньої продуктивності. А у низькопродуктивній зоні висота становила лиш 155,1 см що на 40,2 см менше ніж висота в середньопродуктивній зоні. Різниця між високою та низькою зонами продуктивності сягала 59,1 см, що є надзвичайно суттєвим показником. Проміжний висновок полягає в тому, що майже третина висоти рослин у зоні

низької продуктивності недобирається порівняно з високопродуктивною зоною. Adhikari et al. (2023) у дослідженні зон стабільності врожайності, тобто зон продуктивності поля, підкреслюють, що низькопродуктивні зони характеризуються системним дефіцитом ресурсів. Передусім цей дефіцит стосується водного режиму і щільності ґрунту, які найбільше обмежують реалізацію морфологічного потенціалу гібриду незалежно від агротехнічних заходів. Тобто, немає різниці яка була технологія вирощування і, які агротехнічні заходи проводились, низькопродуктивна зона лімітується вологою та фізичними властивостями ґрунту.



Рис. 3.5 Міжрічне порівняння висоти рослин у високій зоні продуктивності, 2023–2025рр., см

На рисунку 3.5 зображено показники висоти рослин у високій зоні продуктивності між роками досліджень. Усереднені дані по зоні вказують на те, що параболічний зв'язок зберігається, і загущення посівів кукурудзи до норми 85 тисяч насінин на гектар не призводить до лінійного збільшення висоти рослин, а, навпаки, сприяє їх зниженню навіть у високій зоні продуктивності.

На рисунку 3.6 аналогічно проведено порівняння усереднених даних щодо висоти рослин у середньопродуктивній зоні. У всі роки спостережень ми бачимо, що для середньопродуктивної зони найбільш оптимальною нормою висіву, з точки зору висоти рослин, залишається 75 тис. насінин на гектар. У середньопродуктивній зоні параболічний зв'язок більш виражений, ніж у високій зоні, і, починаючи з 80 тис. насінин на гектар, спостерігається поступове зниження середньої висоти рослин у всі роки проведених досліджень.



Рис. 3.6. Міжрічне порівняння висоти рослин у середньопродуктивній зоні продуктивності, 2023–2025 рр., см

Схожі дані відображені на рисунку 3.7 для низької зони продуктивності. Проте, аналогічно до попередніх рисунків, ми спостерігаємо параболічну залежність з оптимумом за норми висіву 70 тисяч насінин на гектар. Загущення посіву до 75 тисяч і вище насінин на гектар призводить до суттєвого зниження висоти рослин. При цьому в усі роки спостережень можна бачити, що

загущення до 85 тисяч насінин на гектар призводить до зменшення висоти рослин навіть порівняно з нормою висіву 65 тисяч насінин на гектар.

Виходячи з отриманих результатів, ми можемо стверджувати, що, на відміну від ефекту норми висіву, ефект зони продуктивності реалізується завдяки сукупній дії інших факторів. Нагадаємо, що в попередніх розділах ми дійшли висновку, що основними факторами впливу на висоту рослин за зміни норми висіву є реакція рослин на дефіцит фотосинтетично активної радіації. Проте, для зон продуктивності більш характерною є реалізація впливу таких факторів, як водний і поживний режими ґрунту. Окрім цього, важливо зазначити, що в низькопродуктивній зоні суттєвим фактором, який обмежує ріст і розвиток рослин, є щільність ґрунту. У даному випадку щільність ґрунту обмежує розвиток кореневої системи, що впливає на погіршення засвоєння вологи й поживних речовин, а також безпосередньо впливає на тургорний тиск у клітинах і сповільнює розвиток рослин. В дослідженні da Silva et al. (2021) показали, що електропровідність ґрунту (ECa) і вміст магнію є найважливішими предикторами продуктивності посіву кукурудзи, а їхній вплив реалізується



Рис. 3.7. Міжрічне порівняння висоти рослин у низькопродуктивній зоні, 2023–2025, см

саме через морфологічні показники – висоту рослин і розвиток листкового апарату. KiNoshita et al. (2021) підтверджують, що просторово-часова стабільність врожайності визначається стабільністю водного режиму зони продуктивності, що в посушливі роки відмінності між зонами посилюються, що повністю узгоджується з нашими даними.

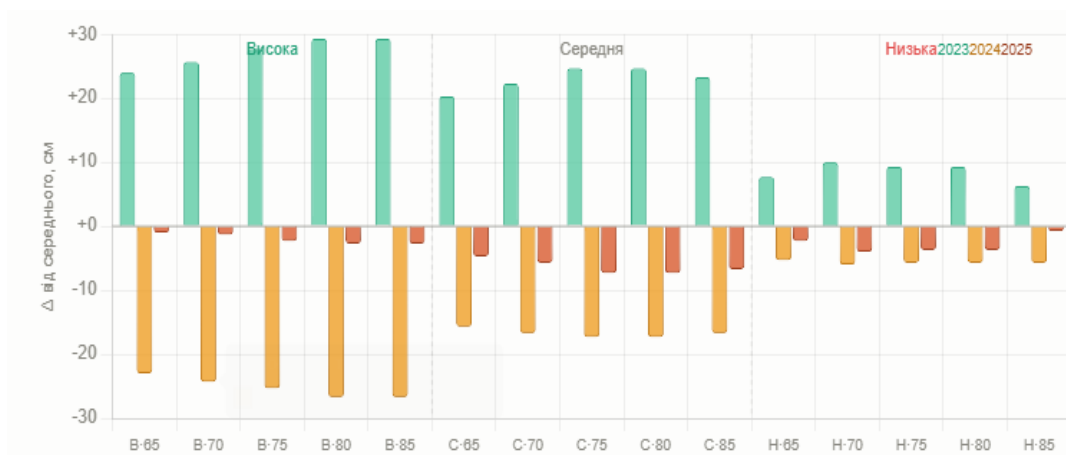


Рис. 3.8. Міжрічне відхилення від середнього значення по кожній нормі висіву залежно від зон продуктивності

На рисунку 3.8 можна спостерігати різницю у висоті між усіма зонами продуктивності за різних норм висіву насіння. Важливим результатом нашого вивчення висоти рослин є той факт, що різниця між високою та низькою зонами продуктивності збільшується разом зі збільшенням норми висіву насіння. Так, за норми 65 тисяч насінин на гектар різниця між зонами становила 48,7 см, за норми 75 тисяч насінин на гектар – 58,6 см. Водночас, максимальна норма висіву 85 тисяч насінин на гектар показала різницю у висоті 72 см. З отриманих даних, ми робимо висновок, що кожне підвищення норми висіву на 10 тисяч насінин на гектар збільшує розрив між зонами продуктивності в середньому на 5–8 см. Ці результати свідчать про те, що загущення посіву посилює внутрішню конкуренцію за ресурси між рослинами в рядках, причому найбільш вразливими до такого роду конкуренції є рослини, які ростуть у низькопродуктивній зоні. Із цього можемо зробити висновок, що загущення в низькопродуктивній зоні є агрономічно недоцільним. У своєму дослідженні Anselmi et al. (2021) наголошують, що оптимальна норма висіву в

зонах з обмеженим потенціалом суттєво нижча, ніж у зонах з високим потенціалом. Також вони зауважують, що застосування єдиної норми по всьому полю неминуче призведе до загущення посівів у стресових зонах. В цьому випадку, це призведе до наступного пригнічення морфологічного розвитку рослин.

Проте, у високопродуктивній зоні можна було спостерігати суттєво іншу ситуацію, яка висвітлювала реакцію висоти рослин на норму висіву. Ми бачимо, що у високопродуктивній зоні норма висіву 80 тисяч насінин на гектар забезпечувала найкращі умови для формування висоти рослин. Саме за таких умов рослини формували найбільшу висоту стеблостою 222,7 см, що на 27,4 см перевищує аналогічний варіант у середньопроодуктивній зоні. Це свідчить про те, що високопродуктивна зона володіє достатнім ресурсним забезпеченням, і підвищення норми висіву в цій зоні не пригнічує, а, навпаки, стимулює вегетативний ріст через вищеописаний механізм конкуренції за фотосинтетично активну радіацію. Більше ресурсне забезпечення цієї зони дозволяє рослинам повністю реалізувати цей потенціал. Тобто, на відміну від низькопродуктивної зони, зона високої продуктивності не лише не страждає від загущення до 80 тисяч насінин на гектар, а й отримує від нього певний вигаш. Larrosa та Borrás (2022) пояснюють цей ефект тим, що гібриди з достатнім водним і поживним забезпеченням здатні конвертувати радіаційний стрес від загущення у продуктивну біомасу стебла, тоді як в умовах ресурсного дефіциту той самий стрес призводить до деградації морфологічних показників.

Так само, як і з нормою висіву, висота рослин по зонах продуктивності суттєво відрізняється від умов сезону, які склалися. Так, ми бачимо, що в посушливому 2024 році всі зони сформували нижчу висоту рослин, ніж в 2023 році, на 25-50 см. Проте загальна тенденція залишалася. Тобто, у високій зоні продуктивності були сформовані найвищі рослини, у середньопроодуктивній зоні – середнього росту, а у низькопродуктивній – найнижчі. Ці дані підтверджують, що зональне різноманіття поля є стійкою величиною і є характерним для поля, а не випадковим фактором якогось окремого сезону.

При цьому вкотре наголошуємо, що найбільший розрив між зонами спостерігається в сезонах із найменш сприятливими умовами для розвитку рослин. У нашому випадку, це був посушливий 2024 рік.

Отже, ми вкотре доходимо до висновку, що зона продуктивності поля є домінуючим фактором, який впливає на ріст та розвиток рослин, в тому числі і на висоту рослин у фазі цвітіння. Домінуючий ефект забезпечується обмеженням в ресурсному забезпеченні низької зони продуктивності і наявністю більшого ресурсного забезпечення у високопродуктивній зоні. Тому, з нашої точки зору, зниження густоти в низькопродуктивній зоні та збільшення густоти у високопродуктивній зоні є також обґрунтованим із точки зору формування морфологічних особливостей рослин кукурудзи. Ці дані є також ключовими для подальшого розуміння відмінностей в отриманих результатах і продуктивності кукурудзи впродовж років досліджень.

3.4. Оцінка впливу норми висіву та зони продуктивності на структурно-морфологічні показники врожаю кукурудзи

Наступним показником, який ми досліджуємо в своїй роботі, є структурно-морфологічні показники врожаю кукурудзи, а саме кількість рядів зерен в початку, кількість зерен у рядку, маса 1000 зерен і натура зерна. Ці показники формуються в критичні періоди онтогенезу і є безпосередніми предикторами кінцевої продуктивності посівів кукурудзи. Норма висіву, аналогічно із попередніми показниками, також має вплив і на структурно-морфологічні показники. Проте, масштаб цього впливу різниться залежно від конкретного показника та умов вирощування. Результати трирічних досліджень усереднені за зонами продуктивності демонструють різницю структурних показників між різними варіантами норми висіву і подані в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Показники структури врожаю кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву

Норма висіву, тис/га	Натура зерна, г/л		Маса 1000 зерен, г		Рядів у початку, шт		Зерен у ряду, шт		Зерен у початку, шт	
	знач.	Δ	знач.	Δ	знач.	Δ	знач.	Δ	знач.	Δ
65	703,3	-6,7	284,7	-8,3	15,7	+0,7	38,3	+2,0	601	+57
70	705,7	-4,3	287,7	-5,3	15,7	+0,7	37,3	+1,0	586	+42
75	710	-	293	-	15,0	-	36,3	-	544	-
80	706,7	-3,3	289,0	-4,0	14,3	-0,7	35,2	-1,1	503	-41
85	702,7	-7,3	284,7	-8,3	14,3	-0,7	34,2	-2,1	489	-55

Показник кількості рядів зерен у початку є ознакою, яка обумовлена генетичними особливостями гібриду кукурудзи та закладається на ранніх етапах формування суцвіття. Змінюючи норму висіву, ми можемо частково змінювати інтенсивність ресурсної конкуренції між рослинами, тим самим впливаючи на кількість рядів через зміну асиміляційного потенціалу рослин у критичні періоди. Нашими дослідженнями було встановлено, що усереднений показник кількості рядів зерен становив 15,7 шт. за норм висіву 65–75 тис. насінин на гектар. За підвищення норми до 80–85 тис. насінин на га відбувалося зниження кількості рядів зерен до 14,3 шт. Таким чином, ми можемо спостерігати нелінійну залежність кількості рядів зерен у початку від норми висіву. Greveniotis et al. (2019) у прямому досліді з різними густотами кукурудзи підтвердили, що кількість рядів зерен у початку є найменш пластичним серед усіх компонентів структури врожаю і суттєво знижується лише за перевищення певної критичної густоти.

Показник кількості зерен у рядку, на відміну від кількості рядів, реагував на норму висіву більш плавно й монотонно. За зрідження посівів до 65 тис. насінин на га кількість зерен у рядку в середньому становила 38,3 шт. При цьому за норми 75 тис. насінин на га цей показник знижувався до 36,3 шт., а за загушення посівів до 85 тис. насінин на гектар до 34,2 шт. Відповідно, між зрідженим і загущеним варіантами різниця склала 4,1 зернівки, або 10,7 %. Зниження кількості зернівок пояснюється механізмом посилення конкуренції за асимілянти у період від запилення до молочної стиглості. Проміжний висновок свідчить про те, що за загушення кожна рослина отримує менше фотосинтетично активної радіації, що безпосередньо впливає на потік асимілянтів до початку й скорочує кількість зерен. В своєму дослідженні Larrosa та Borrás (2022) показали, що кількість зерен у початку є найбільш чутливим до конкуренції за радіацію компонентом структури врожаю. Тоді, як зниження накопичення біомаси у період від викидання волоті до цвітіння прямо визначає скорочення кількості зерен.

Сукупний ефект зміни кількості рядів і кількості зерен в ряду проявляється у суттєвій розбіжності загальної кількості зерна у початку між варіантами досліду. За зниженої норми до 65 тис. насіння на га загальна кількість зерен в початку у середньому становила 601 штуку. При цьому за норми 75 тис. на га цей показник був на 57 штук більше, тобто фактично на 10,5 % переважав знижену норму. А за загушення до 85 тис. насінин на га зафіксовано найменшу кількість зерен (489 штук) на одному початку, що на 55 менше від контролю (у відносному значенні – 10,1 %). Таким чином, різниця між крайніми нормами висіву за кількістю зерен у початку дорівнює 112 штук або 22,9 %. Такі результати пояснюються тим, що за зниження норми висіву до 65 тис. на га кожен окремий качан формує більше зерен завдяки меншій внутрішньовидовій конкуренції. Проте, зменшення кількості початків на одиницю площі, за рахунок зниження густоти посіву, може у повній мірі нівелювати цю перевагу по врожайності. В дослідженні Noland et al. (2025) підтверджується, що оптимізація геометрії простору рослини через норму

висіву і міжряддя впливає передусім на щільність початків і кількість зерен у них. Також вони наголошують, що максимальна продуктивність посіву досягається не за максимальної кількості зерен у одному початку, а за оптимального балансу між кількістю початків і їх індивідуальною продуктивністю.

Ключовим показником якості отриманого врожаю є натура зерна. Натура відображає ступінь виповненості зерна та його щільність укладання в початку. Вплив норми висіву на натуру також має параболічний прояв, із максимумом за норми 80 тисяч насінин на гектар і мінімумом за норми 85 тисяч насінин на гектар. При цьому, абсолютні значення свідчать про те, що різниця між нормами 80 і 85 тисяч насінин на гектар становила лише 4 г/л. Тобто натура зерна була відносно стабільною незалежно від норми висіву та слабо реагувала на її зміну в діапазоні дослідних варіантів від 65 до 85 тисяч насінин на гектар. Проте, варто зауважити, що це усереднені дані за зонами продуктивності. Отже, за рівних умов вирощування норма висіву слабо впливає на показник натури зерна. На рисунку 3.9 зображено розподіл середньої натури зерна кукурудзи за різних норм висіву усереднено по зонах продуктивності поля та роками проведення дослідження.

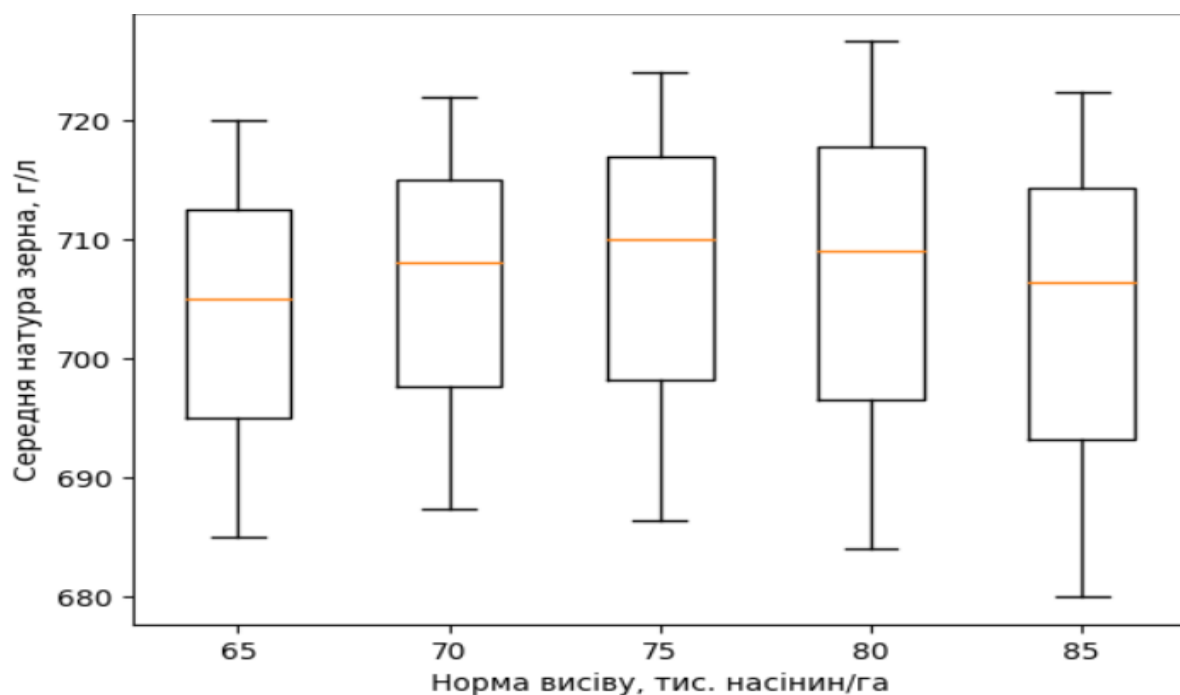


Рис. 3.9. Розподіл середньої натури зерен кукурудзи за нормами висіву (2023–2025 рр.)

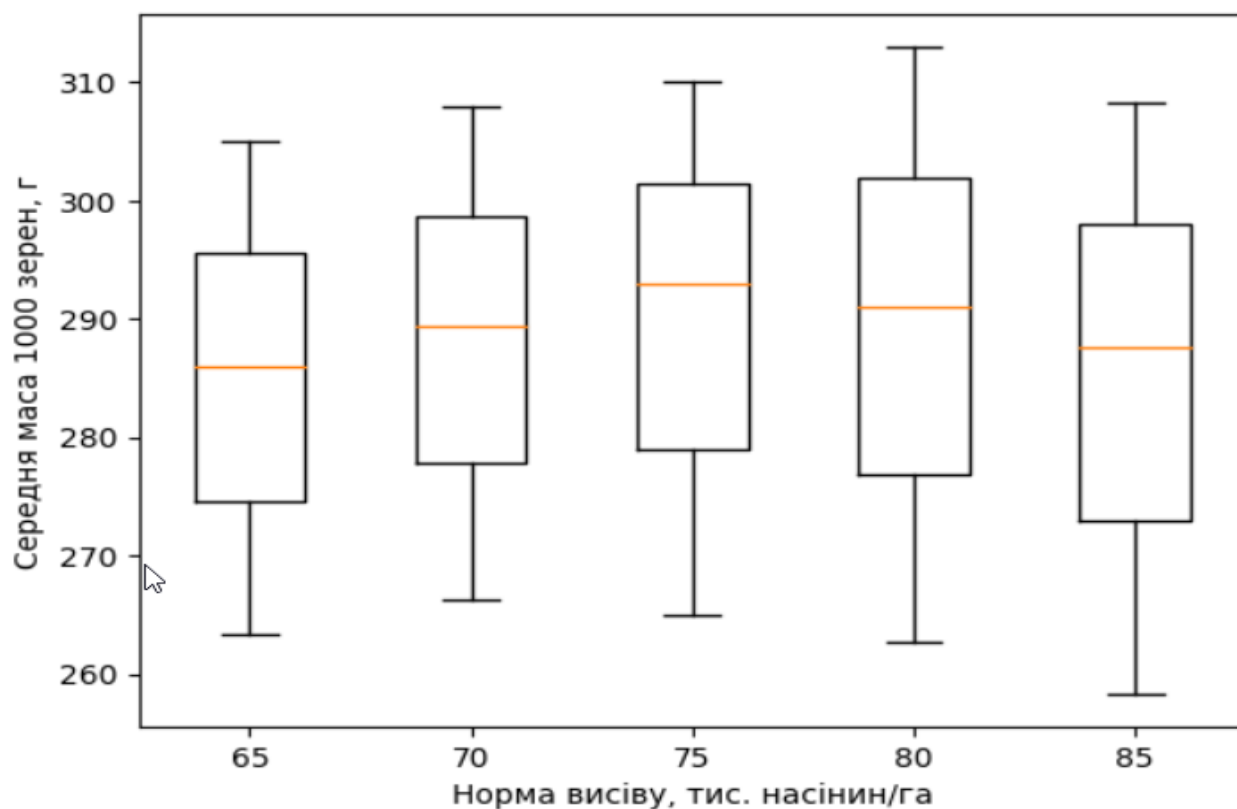


Рис. 3.10. Розподіл середньої маси 1000 зерен кукурудзи за нормами висіву (2023–2025 рр.)

Не менш важливим показником якості зерна кукурудзи є маса тисячі насінин. Отримані результати свідчать про те, що найбільша маса тисячі насінин була зафіксована за норми 75 тисяч насінин на гектар і становила 293 г.

За норми висіву 80 тисяч насінин на гектар маса тисячі насінин становила 289 г, що на 4,3 г менше порівняно з контролем. За зрідження посівів до 65 тис. на га маса 1000 насінин становила 284,7 г, що на 8,3 г менше, ніж за контрольної норми висіву 75 тисяч насінин на гектар. Greveniotis et al. (2019) підтверджують, що маса 1000 зерен знижується за загушення понад оптимум передусім через скорочення тривалості ефективного наливу зерна в умовах дефіциту асимілянтів, що узгоджується з нашими даними щодо скорочення підперіоду R1–R3 за підвищених норм висіву. Рисунок 3.10 відображує розподіл середньої маси тисячі зерен кукурудзи за нормами висіву, усереднено за роками дослідження та зонах продуктивності. На ньому ми спостерігаємо чіткий параболічний зв'язок між масою 1000 та нормою висіву.

Отже, результати дослідження структурних показників врожаю, залежно від норми висіву, які відображені в таблиці 3.12, свідчать про те, що оптимальний діапазон норм висіву для гібриду ДКС 3939 становить від 70 до 85 тис. на га. При цьому, ми бачимо однакове погіршення показників якості як за загушення до 85 тисяч рослин на гектар, так і до 65 тисяч на гектар за зниження норми висіву.

Більш інформативним з точки зору аналізу структурних показників врожаю є їх диференціація у розрізі зон продуктивності, яка дозволяє виявити відмінності між елементами продуктивності залежно від просторових особливостей поля. Це дає змогу встановити, як реагують ці показники у різних умовах ресурсного забезпечення. У таблиці 3.13 наведені дані, які демонструють, що зони продуктивності поля є потужнішим фактором впливу на структурні показники порівняно з нормою висіву. Проте взаємодія цих двох факторів формує специфічне поєднання результатів для кожної зони.

Таблиця 3.13.

Показники структури врожаю кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву (середнє за 2023–2025 рр.)

Зона	Норма, тис/га	Натура, г/л	Δ	М1000, г	Δ	Рядів, шт	Δ	Зерен у ряду, шт	Δ	Зерен у початку, шт	Δ
Високопродуктивна	65	720	+10	305	+12	17,0	+2,0	40,3	+4,0	685	+141
	70	722	+12	308	+15	17,0	+2,0	39,3	+3,0	668	+124
	75	724	+14	310	+17	17,0	+2,0	38,3	+2,0	651	+107
	80	727	+17	313	+20	15,0	0,0	37,3	+1,0	560	+16
	85	722	+12	308	+15	15,0	0,0	36,3	0,0	544	0
	<i>Середнє</i>	<i>723,0</i>	<i>+13,0</i>	<i>308,8</i>	<i>+15,8</i>	<i>16,2</i>	<i>+1,2</i>	<i>38,3</i>	<i>+2,0</i>	<i>620</i>	<i>+76</i>
Середньопродуктивна	65	705	–5	286	–7	15,0	0,0	38,3	+2,0	574	+30
	70	708	–2	289	–4	15,0	0,0	37,3	+1,0	560	+16
	75	710	-	293	-	15,0	-	36,3	-	544	-
	80	709	–1	291	–2	14,0	–1,0	35,3	–1,0	494	–50
	85	706	–4	288	–5	14,0	–1,0	34,3	–2,0	480	–64
	<i>Середнє</i>	<i>707,6</i>	<i>–2,4</i>	<i>289,4</i>	<i>–3,6</i>	<i>14,6</i>	<i>–0,4</i>	<i>36,3</i>	<i>0,0</i>	<i>530</i>	<i>–14</i>
Низькопродуктивна	65	685	–25	263	–30	15,0	0,0	36,3	0,0	544	0
	70	687	–23	266	–27	15,0	0,0	35,3	–1,0	530	–14
	75	686	–24	265	–28	15,0	0,0	34,3	–2,0	514	–30
	80	684	–26	263	–30	14,0	–1,0	33,0	–3,3	462	–82
	85	680	–30	258	–35	14,0	–1,0	32,0	–4,3	448	–96
	<i>Середнє</i>	<i>684,4</i>	<i>–25,6</i>	<i>263,0</i>	<i>–30,0</i>	<i>14,6</i>	<i>–0,4</i>	<i>34,2</i>	<i>–2,1</i>	<i>499</i>	<i>–45</i>

Норми висіву, зона продуктивності поля є більш яскраво вираженим фактором впливу на натуру зерна, який виділяється стійкістю і статистичною вираженістю. Так, у середньопродуктивній зоні поля натура зерна становила

707,6 г на літр, тоді, як у високій зоні продуктивності цей показник був на 13 г/л більший і сягав 723,0 г/л. В той же час, низькопродуктивна зона мала показник натури на 38,6 нижчий, ніж у високій зоні продуктивності. Це свідчить про те, що в умовах ресурсного дефіциту зерно виявляється більш чутливим до додаткової конкуренції від загушення навіть за показником фізичної якості. Adhikari et al. (2023) зазначають, що низькопродуктивні зони характеризуються системно нижчою якістю зерна через хронічний дефіцит ресурсів у генеративний підперіод, і цей ефект посилюється за підвищення густоти стеблостою.

Вплив зони продуктивності на масу 1000 насінин є ще більш вираженим, ніж вплив на натуру зерна. Середнє значення маси 1000 насінин у високопродуктивній зоні становило 308,8 г, що на 15,8 г більше, ніж у середньопродуктивній зоні, де показник становив 293,0 г. Водночас, у низькопродуктивній зоні середній показник становив 263,0 г. Різниця між високо- та низько- продуктивними зонами становила 45,8 г, або 15,7 %, що є суттєвим з агрономічної точки зору, оскільки показник маси 1000 насінин за такого рівня різниці безпосередньо впливає на кінцеву врожайність культури. Реакція маси 1000 насінин на норму висіву також відрізнялася між зонами. У високопродуктивній зоні найкращою з точки зору маси 1000 насінин виявилася норма 80 тис. насінин на га, де маса 1000 становила 313 г. Ми бачимо, що високопродуктивна зона має потенціал забезпечувати рослини ресурсами для формування вищого показника маси 1000 насінин навіть за загушення до 80 тис. насінин на га. У низькопродуктивній зоні ситуація була протилежною. Відповідно, маса 1000 насінин знижувалася від 263 г за норми 65 тисяч насінин на га до 258 г за норми 85 тисяч насінин на га. Це означає, що в низькопродуктивній зоні недостатньо ресурсного забезпечення, щоб дозволити рослинам сформувати високий показник маси 1000 насінин незалежно від норми висіву. Отже, ми вкотре переконуємося в тому, що зона продуктивності є домінуючим фактором для диференційованої технології висіву насіння. Greveniotis et al. (2019) підкреслюють, що маса 1000 зерен є

найбільш чутливим компонентом структури врожаю до ресурсного забезпечення і, що в умовах посухи або ущільнення ґрунту, зниження М 1000 реалізується раніше і більш виражено, ніж зниження кількості зерен.

Якщо говорити про взаємодію двох факторів, а саме, зони продуктивності та норми висіву, можна стверджувати, що обидва фактори за правильного поєднання забезпечують найкращий результат. Зокрема, загущення посівів у високопродуктивній зоні дозволяє не лише отримати більшу кількість початків на гектар, а й сформувати якісніші показники самого врожаю, за рахунок чого досягається вищий кінцевий результат у вигляді загальної врожайності. При цьому, в низькопродуктивній зоні різниця між зрідженими посівами, наприклад 70 і 75 тис. насінин на га, є агрономічно несуттєвою. Тобто, ми спостерігаємо, що сама зона через обмеження в ресурсному забезпеченні не здатна повною мірою забезпечити ресурсами навіть зріджені посіви, що і має кінцевий негативний вплив на врожайність. KiNoshita et al. (2021) пов'язують подібну просторову диференціацію морфологічних показників початку з відмінностями у водному режимі зон у критичний підперіод закладення суцвіття. Підкреслюючи, що у посушливі роки зональний ефект на морфологію початку посилюється, що підтверджується нашими даними за 2024 рік.

У високопродуктивній зоні за норми 65 тис./га зафіксовано максимум – 40,3 зерна у ряду, що на 4,0 шт. більше від контролю. За збільшення норми до 85 тис./га в цій же зоні показник знижувався до 36,3 шт. – тобто навіть у найсприятливіших умовах загущення до 85 тис./га зводить кількість зерен у ряду до рівня контролю. У низькопродуктивній зоні за норми 65 тис./га кількість зерен у ряду становила 36,3 шт. – рівно на рівні контролю, тобто ресурсний дефіцит зони цілковито нівелює перевагу нижчої норми висіву. За підвищення норми до 85 тис./га у низькопродуктивній зоні цей показник падав до 32,0 шт. – на 4,3 шт. нижче від контролю (–11,8 %). Larrosa та Borrás (2022) пояснюють подібну взаємодію тим, що в умовах подвійного стресу – ресурсного дефіциту зони і конкуренції за сонячну радіацію за загущення –

скорочення асиміляційного потоку є кумулятивним і значно перевищує суму окремих ефектів кожного фактора.

Найяскравіший прояв взаємодії зони і норми висіву спостерігається за показником загальної кількості зерен у початку. Максимальне значення по всьому досліді зафіксовано у комбінації "Високопродуктивна зона × 65 тис./га" – 685 зерен, що на 141 шт. більше від контролю (+25,9 %). Мінімальне значення – у комбінації "Низькопродуктивна зона × 85 тис./га" – 448 зерен, що на 96 шт. менше від контролю (–17,6 %). Різниця між цими крайніми комбінаціями становить 237 зерен, або 52,9 % – майже вдвічі більше зерен у початку в найкращому варіанті порівняно з найгіршим. Особливо показовим є поведінка показника у низькопродуктивній зоні: за норми 65 тис./га тут формується 544 зернівок у початку – рівно стільки ж, скільки у контролі. Тоді, як за норми 85 тис./га – лише 448 шт. Це означає, що в низькопродуктивній зоні єдиним способом наблизитись до рівня контролю за кількістю зерен у початку є мінімізація норми висіву. Anselmi et al. (2021) наголошують, що саме через подібну диференціацію реакції елементів врожаю на норму висіву між зонами продуктивності застосування єдиної норми по всьому полю є агрономічно неоптимальним рішенням і обґрунтовують необхідність диференційованого висіву (VRN) як інструменту реалізації потенціалу кожної зони.

Підсумовуючи, аналіз таблиці 3.13 дозволяє сформулювати три ключові висновки. По-перше, зона продуктивності є домінуючим фактором диференціації натури і маси 1000 зерен, тоді як кількість зерен у початку визначається взаємодією обох факторів приблизно рівною мірою. По-друге, у високопродуктивній зоні підвищення норми висіву до 80 тис./га не погіршує, а окремі показники (натура, маса 1000 зерен) навіть покращує, що підтверджує доцільність підвищених норм у цій зоні. По-третє, у низькопродуктивній зоні вже норма 75 тис./га є надмірною з точки зору кількості зерен у початку, і оптимум зміщується до 65–70 тис./га. Ці висновки є безпосереднім

агрономічним обґрунтуванням диференційованого підходу до норм висіву залежно від зони продуктивності, що розглядається у розділі 4.

Висновки до третього розділу

1. Фактична густота стояння рослин на момент збирання врожаю систематично відрізнялася між зонами продуктивності і була стабільно нижчою від планової норми висіву в усіх варіантах дослідів. Середнє відносне відхилення становило 2,8% у високопродуктивній зоні, 3,6% – у середньопродуктивній і 5,8% – у низькопродуктивній. Таким чином, втрати рослин у низькопродуктивній зоні майже вдвічі перевищували аналогічний показник для високопродуктивної. Основною причиною є не техніка сівби, а системний стресовий вплив умов зони – ущільнення ґрунту і дефіцит поживних речовин.

2. Тривалість вегетаційного циклу кукурудзи визначалася насамперед гідротермічними умовами року і зоною продуктивності, тоді як норма висіву мала менш виражений, але агрономічно значимий вплив. Різниця у загальній тривалості вегетації між високо- і низькопродуктивними зонами становила в середньому 18,5 доби – від 112,7 до 94,2 доби від сходів до воскової стиглості. Між крайніми нормами висіву ця різниця становила 6,5 доби, що підтверджує домінування зонального фактора.

3. У низькопродуктивній зоні спостерігалось виражене прискорення вегетативних фаз – насамперед підперіоду від змикання рядків до викидання волоті (на 5,5 доби коротше ніж у середньопродуктивній зоні) – як прояв адаптивної реакції рослин на дефіцит вологи, що веде до скороченого вегетаційного циклу і зниженого потенціалу наливу зерна. Підперіод від цвітіння до молочної стиглості у низькопродуктивній зоні скорочувався до 12,2 доби проти 18,7 доби у середньопродуктивній – різниця 6,5 доби, яка безпосередньо обмежувала накопичення сухої речовини зерна.

4. Збільшення норми висіву зумовлювало закономірне подовження інтервалу між викиданням волоті і цвітінням від 9,2 доби за 65 тис./га до 13,4

доби за 85 тис./га. Перевищення цього показника понад 10–12 діб є фактором ризику неповного запліднення і формування череззерниці, що підтверджено скороченням кількості зерен у початку при загущенні посівів.

5. Висота рослин у фазу цвітіння мала параболічну залежність від норми висіву з максимумом при 80 тис./га у всіх зонах і роках дослідження. Однак вплив зони продуктивності на цей показник виявився значно сильнішим: різниця між середніми значеннями висоти у високо- та низькопродуктивній зонах становила 59,1 см, тоді як між крайніми нормами висіву – не перевищувала 12,9 см. Важливо, що розрив між зонами зростав зі збільшенням норми висіву: за 65 тис./га він становив 48,7 см, за 85 тис./га – 72,0 см, що підтверджує агрономічну недоцільність загущення у низькопродуктивній зоні.

6. Структурні показники врожаю – кількість рядів зерен, кількість зерен у рядку, маса 1000 зерен і натура – демонстрували виражену диференціацію як між нормами висіву, так і між зонами продуктивності, причому зональний фактор переважав. Різниця між зонами за масою 1000 зерен становила в середньому 45,8 г (15,7%), за натурою – 38,6 г/л, за кількістю зерен у початку – від 96 до 141 штуки залежно від норми висіву. Максимум зерен у початку зафіксовано у комбінації «високопродуктивна зона × 65 тис./га» (685 шт.) мінімум – «низькопродуктивна зона × 85 тис./га» (448 шт.), різниця між крайніми комбінаціями становила 237 зерен, або 52,9%.

7. У високопродуктивній зоні підвищення норми до 80 тис./га не погіршувало, а окремі показники якості зерна навіть покращувало, що підтверджує достатнє ресурсне забезпечення для реалізації потенціалу загущення. У низькопродуктивній зоні вже норма 75 тис./га виявлялася надмірною за кількістю зерен у початку, а оптимум зміщувався до 65–70 тис./га. Сукупність отриманих даних формує агрономічне обґрунтування диференційованого підходу до норм висіву залежно від зони продуктивності поля.

Список літератури до третього розділу

1. Adhikari K., Smith D. R., Hajda C., Kharel T. P. Within-field yield stability and gross margin variations across corn fields and implications for precision conservation. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 1401–1416. DOI: 10.1007/s11119-023-09995-7.
2. Anselmi A. A., Molin J. P., Bazame H. C., Corrêdo L. P. Definition of Optimal Maize Seeding Rates Based on the Potential Yield of Management Zones. *Agriculture*. 2021. Vol. 11, No. 10. Article 911. DOI: 10.3390/agriculture11100911.
3. Baum M. E., Archontoulis S. V., Licht M. A. Planting Date, Hybrid Maturity, and Weather Effects on Maize Yield and Crop Stage. *AgroNomy Journal*. 2019. Vol. 111, No. 1. P. 303–313. DOI: 10.2134/agronj2018.04.0297.
4. Cui J., Cui Z., Lu Y., Lv X., Cao Q., Hou Y., Yang X., Gu Y. Maize grain yield enhancement in modern hybrids associated with greater stalk lodging resistance at a high planting density: a case study in Northeast China. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. DOI: 10.1038/s41598-022-18908-z.
5. da Silva E. E., Baio F. H. R., Kolling D. F., Schneider Júnior R., Zanin A. R. A., Neves D. C., Fontoura J. V. P. F., Teodoro P. E. Variable-rate in corn sowing for maximizing grain yield. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. P. 12711. DOI: 10.1038/s41598-021-92238-4.
6. dos Santos C. L., Abendroth L. J., Coulter J. A., Nafziger E. D., Suyker A., Yu J., Schnable P. S., Archontoulis S. V. Maize Leaf Appearance Rates: A Synthesis From the United States Corn Belt. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 872738. DOI: 10.3389/fpls.2022.872738.
7. Greveniotis V., Zotis S., Sioki E., Ipsilandis C. G. Field Population Density Effects on Field Yield and Morphological Characteristics of Maize. *Agriculture*. 2019. Vol. 9, No. 7. Article 160. DOI: 10.3390/agriculture9070160.
8. Jin R., Li Z., Wang X., Liu F., Kong F., Liu Q., Lan T., Feng D., Yuan J. Optimizing Row Spacing Increases Stalk Lodging Resistance by Improving Light

Distribution in Dense Maize Populations. *AgroNomy*. 2023. Vol. 13, No. 2. Article 462. DOI: 10.3390/agroNomy13020462.

9. KiNoshita R., Rossiter D., van Es H. Spatio-temporal analysis of yield and weather data for defining site-specific crop management zones. *Precision Agriculture*. 2021. Vol. 22, No. 6. P. 1952–1972. DOI: 10.1007/s11119-021-09820-z.

10. Larrosa F. H., Borrás L. Differential Maize Yield Hybrid Responses to Stand Density Are Correlated to Their Response to Radiation Reductions Around Flowering. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 12. Article 771739. DOI: 10.3389/fpls.2021.771739.

11. Noland R., Dowdy M., Harris G. Maize Row Spacing and Seeding Rate Informed by Space-per-Plant Geometry. *AgroNomy*. 2025. Vol. 15, No. 2. Article 374. DOI: 10.3390/agroNomy15020374.

12. Shuai G., Martinez-Feria R. A., Zhang J., Li S., Price R., Basso B. Capturing Maize Stand Heterogeneity Across Yield-Stability Zones Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 20. P. 4446. DOI: 10.3390/s19204446.

13. Xu H., Ming B., Wang K., Xue J., Hou P., Li S., Xie R. The effects of photoperiod and temperature-related factors on maize leaf number and leaf positional distribution in the field. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1006245. DOI: 10.3389/fpls.2023.1006245.

14. Xu W., Liu C., Wang K., Xie R., Ming B., Wang Y., Zhang G., Liu G., Zhao R., Fan P., Li S., Hou P. Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China. *Field Crops Research*. 2017. Vol. 212. P. 126–134. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.006.

15. Zhao J., Ren B., Zhao B., Liu P., Zhang J. Yield of summer maize hybrids with different growth duration determined by light and temperature resource use efficiency from silking to physiological maturity stage. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 992311. DOI: 10.3389/fpls.2022.992311.

РОЗДІЛ 4. ПРОДУКТИВНІСТЬ, ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Загальна врожайність зерна є кінцевим показником продуктивності посівів будь-якої сільськогосподарської культури, у тому числі кукурудзи. Цей показник акумулює вплив усіх факторів, які можуть впливати на ріст і розвиток рослин у полі. Саме тому кількісний аналіз урожайності та ефективності використання диференційованих норм висіву насіння є центральною частиною дослідження. Загальна врожайність дозволяє оцінити агрономічну, економічну та біоенергетичну ефективність застосування технології змінних норм в реальних польових умовах. Максимальне використання ресурсної бази поля завдяки встановленню оптимальної норми сівби кукурудзи є одним із найбільш практично значущих завдань сучасної агрономії. Практика показує, що застосування єдиної норми висіву призводить до того, що частина поля формує врожай під постійним впливом дефіциту ресурсів. Тоді, як інша частина поля має більший ресурсний потенціал для реалізації вищого результату. MUunaf et al.. (2022) на основі польових дослідів у Бельгії показали, що диференційований зональний висів забезпечує підвищення врожайності зерна кукурудзи. Це тягне за собою зростання валової маржі порівняно з суцільною нормою висіву. При чому, найбільший ефект спостерігається за умови застосування принципу перерозподілу насіння на користь високопродуктивних ділянок поля. Búdi et al. (2025) у дворічному дослідженні у північно-східній Угорщині перевірили технологію змінної норми висіву насіння (VRS) в поєднанні із зонуванням поля. Вони прийшли до висновку, що технологія дозволяє суттєво підвищити рівномірність розміщення насіння. А також зростає точність реалізації технологічного завдання залежно від умов рельєфу і ґрунтового покриття. Сучасні підходи до управління нормою висіву базуються на виділенні зон продуктивності поля. На основі зон будуються диференційовані карти-завдань. Du et al.. (2022) розробили модель прийняття рішень щодо норми висіву кукурудзи на основі градієнтного алгоритму. Їх

алгоритм дозволяє враховувати просторову варіабельність ґрунтових і агрокліматичних умов за формування зональних рекомендацій. Цей підхід принципово змінює логіку управління. Якщо раніше поля оброблялись по єдиній, усередненій технології, то тепер технологія локально адаптована, що відповідає потенціалу кожної ділянки поля. У даній роботі нашим завданням є встановлення агрономічного та економічного оптимумів густоти рослин відповідно до зон продуктивності. Lacasa et al. (2020) у великомасштабному дослідженні в Північній Америці встановили, що агрономічний оптимум густоти стояння кукурудзи суттєво варіює залежно від рівня врожайності та географічних умов. А економічний оптимум розрахований з урахуванням вартості насіння і ціни зерна, систематично є нижчим від агрономічного. Це підкреслює необхідність зонально диференційованого підходу до норм висіву. Такий підхід враховував би не лише біологічний потенціал зони, але й економічну доцільність інтенсифікації посіву. Окрему увагу у сучасній літературі приділяють впливу густоти стояння на якісні показники зерна. Wang et al (2023) у досліді з п'ятьма гібридами різних епох селекції показали, що підвищення густоти в діапазоні від 45 до 105 тис./га по-різному впливає на вміст білка, крохмалю та жиру. Залежно від генотипу у сучасних гібридів негативний ефект заглушення на якість зерна є менш вираженим. Namoda та Dabbour (2025) встановили, що оптимізація розміщення рослин, як за кількістю, так і за рівномірністю є ключовою умовою одночасного досягнення високої врожайності та збереження якісних показників зерна, зокрема вмісту протеїну і жиру. В умовах Лівобережного Лісостепу України, Гангур та Пелих (2025) встановили, що продуктивність середньостиглих гібридів кукурудзи, зокрема ДКС 3969, суттєво залежить від поєднання строків сівби і норми висіву. При чому, максимальна маса 1000 зерен і найвища урожайність формуються за оптимального поєднання цих факторів. Акцентували увагу на тому, що поєднання є специфічним для конкретного гібриду та умов вирощування. Ці дані підтверджують актуальність диференційованого підходу до формування густоти стояння кукурудзи. З огляду на вищевикладене, у

цьому розділі викладено результати трирічних досліджень (2023–2025 рр.) щодо впливу норми висіву та зони продуктивності поля на формування урожайності гібриду ДКС 3939 ФАО 320).

4.1. Вплив норми висіву насіння та зон продуктивності поля на продуктивність гібриду кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320)

Аналіз даних табл. 4.1 свідчить про суттєву диференціацію урожайності зерна кукурудзи ДКС 3939 як між зонами продуктивності, так і між роками досліджень. Максимальна урожайність за усередненими даними трьох років спостерігалася у високій зоні продуктивності за норми 80 тис./га. Подальше загущення до 85 тис./га показало менший результат – на 0,47 т/га. Проте, навіть за таких умов загущення у високій зоні продуктивності забезпечило вищий показник урожайності, ніж контрольна норма 75 тис./га. Зрідження посівів у даній зоні продуктивності призводило до поступового зменшення врожайності посівів кукурудзи. Так, за норми 70 тис./га врожайність становила 10,4 т/га, а за норми 65 тис./га – 9,77 т/га. З отриманих даних ми робимо висновок, що загущення у високій зоні продуктивності є обґрунтованим з точки зору кількісного показника врожайності. Подібну криволінійну реакцію врожайності кукурудзи на густоту стояння рослин також відзначають інші дослідники. Sun et al. (2023) у багаторічному аналізі встановили, що реакція врожайності кукурудзи на норму висіву має чітко виражений нелінійний характер із формуванням оптимуму густоти залежно від умов вирощування. Автори підкреслюють, що надмірне загущення не забезпечує подальшого приросту врожайності та може призводити до посилення внутрішньовидової конкуренції між рослинами.

Відповідно до отриманих результатів, у зоні середньої продуктивності за три роки досліджень найкраще себе показала контрольна норма 75 тис./га. Максимальна врожайність у середньопродуктивній зоні становила 9,64 т/га. Загущення або зрідження посівів невідворотно призводило до зменшення

врожайності. Проте в даній зоні більш негативно проявило себе зрідження посівів, ніж загущення. Так, за норми висіву 65 тис./га середня врожайність по зоні становила 8,74 т/га, а за 85 тис./га – 9,00 т/га (табл. 4.1).

У зоні низької продуктивності спостерігалася обернена ситуація порівняно із середньо- та високопродуктивними зонами. Найвищу врожайність у зоні низької продуктивності показала норма висіву 70 тис./га. У середньому за три роки досліджень було отримано 7,79 т/га. При цьому, подальше зниження норми висіву до 65 тис./га призвело до зменшення врожайності на 0,18 т/га, а загущення посівів, починаючи з норми 75 тис./га, показало нижчу врожайність (табл. 4.1). Zhang et al. (2021) також зазначають, що ефективність загущення посівів кукурудзи безпосередньо залежить від рівня ресурсного забезпечення агроценозу. Автори встановили, що помірна густота сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів, тоді як надмірне загущення в умовах дефіциту вологи та елементів живлення призводить до зниження стабільності врожайності.

За результатами наших досліджень найбільша норма висіву 85 тис./га показала найгірший результат серед усіх варіантів досліду, який становив 6,92 т/га (табл. 4.1). Аналогічні результати отримали Du et al. (2021), які встановили, що підвищення густоти стояння рослин може забезпечувати приріст урожайності лише за умови достатнього рівня забезпечення елементами живлення та ефективного використання фотосинтетично активної радіації. Автори підкреслюють, що взаємодія густоти стояння рослин і ресурсного забезпечення є ключовою для формування продуктивності кукурудзи.

Таблиця 4.1.

Урожайність зерна кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, т/га (2023–2025 рр.)

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контролю, т/га	CV, %
Високої	65	10,10	8,80	10,40	9,77	-1,02	8,7
	70	10,80	9,20	11,20	10,40	-0,38	10,2
	75	11,05	9,50	11,80	10,78	–	10,9
	80	11,50	10,20	12,80	11,50	+0,72	11,3
	85	11,10	9,70	12,30	11,03	+0,25	11,8
Середньої	65	9,12	7,01	10,10	8,74	-0,89	18,1
	70	9,56	7,55	10,70	9,27	-0,37	17,2
	75	9,91	7,80	11,20	9,64	–	17,8
	80	9,62	7,81	10,75	9,39	-0,24	15,8
	85	9,34	7,35	10,30	9,00	-0,64	16,7
Низької	65	7,99	5,93	8,97	7,63	+0,06	20,3
	70	8,19	5,89	9,28	7,79	+0,22	22,2
	75	7,95	5,75	9,00	7,57	–	21,9
	80	7,72	5,54	8,33	7,20	-0,37	20,4
	85	7,35	5,18	8,22	6,92	-0,65	22,6
НІР ₀₅ фактор А (зона)		0,15	0,16	0,13	НІР ₀₅ , Avg, – 0.15		
НІР ₀₅ фактор Б (норма)		0,20	0,21	0,17	НІР ₀₅ , Avg, – 0.19		
НІР ₀₅ взаємодія А×Б		0,34	0,37	0,30	НІР ₀₅ , Avg, – 0.34		

На рисунку 4.1 зображено вплив норм висіву та зон продуктивності на врожайність. Синім кольором показано врожайність у зоні високої продуктивності, зеленим – у середньопродуктивній, а рожевим кольором – у низькопродуктивній зоні продуктивності. На рисунку чітко помітні мінімуми, оптимуми й максимуми для кожної із зон продуктивності.

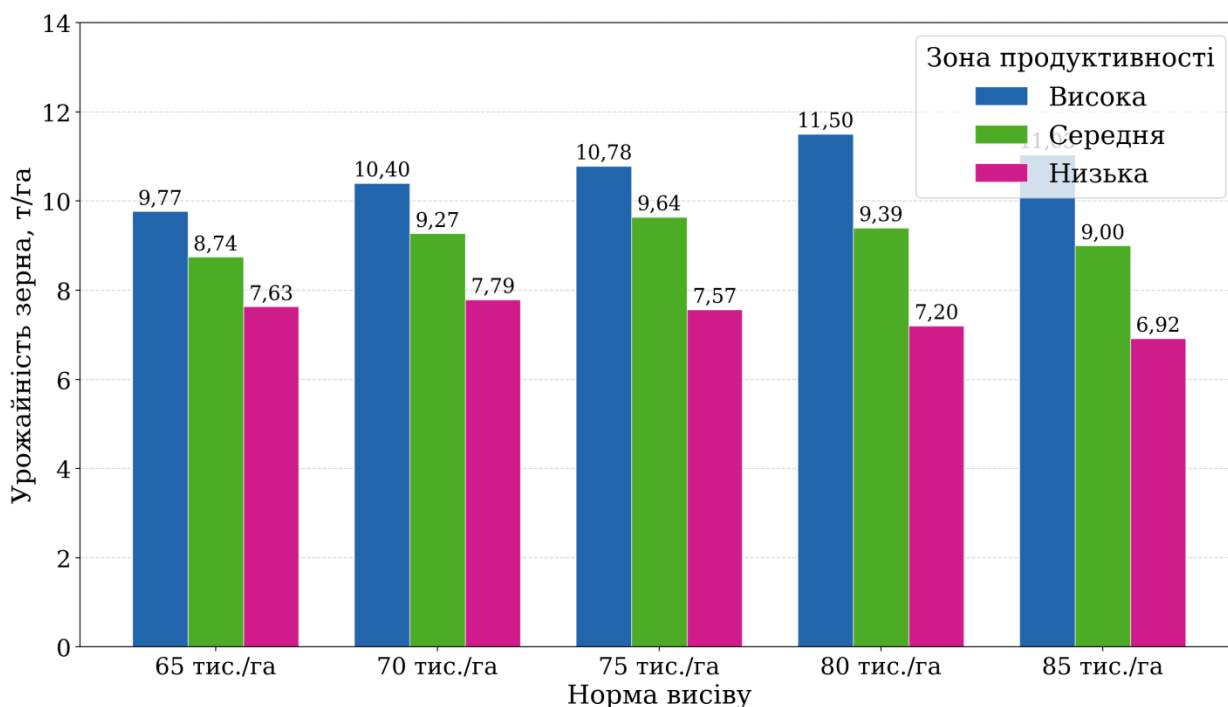


Рис. 4.1. Урожайність зерна кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля (середнє за 2023–2025 рр.)

У нашому дослідженні було окремо перевірено вплив норм висіву на врожайність у середньому по зонах продуктивності. Результати отриманих даних подані в таблиці 4.2. Середня врожайність за норми висіву 65 тис./га становила 8,71 т/га. Між роками вона у середньому коливалася в межах 15,2 %. Урожайність зерна за норми висіву 70 тис./га показала вищий середній показник. Він становив 9,15 т/га і коливався між роками в межах 15,9 %. Контрольна норма висіву 75 тис./га показала найвищий середній показник урожайності, який становив 9,33 т/га і коливався в межах 16,2 % між роками. Найвищий показник врожайності було сформовано за норми 80 тис./га, і він становив 9,36 т/га за річного коливання 15,0 %. Один із найнижчих показників було отримано за максимального загущення до 85 тис./га. Показник урожайності становив 8,98 т/га і коливався між роками в діапазоні 16,2 %.

У високопродуктивній зоні підвищення норми висіву з контрольних 75 тис./га до 80 тис./га забезпечило достовірну прибавку урожайності 0,72 т/га. Прибавка перевищує HP_{05} взаємодії $A \times B$ і є статистично достовірним результатом. Подальше збільшення норми до 85 тис./га призвело до зниження

урожайності до 11,03 т/га, тобто на 0,25 т/га менше відносно норми 80 тис./га. Зниження свідчить про перевищення оптимальної густоти. Зниження норми до 65 тис./га викликало найбільше відхилення, яке становило 1,02 т/га від контролю. У середньопродуктивній зоні норма 75 тис./га забезпечила максимальну урожайність, а саме 9,64 т/га. Відхилення суміжних норм від контролю були статистично несуттєвими лише для норми 80 тис./га, де $0,24 \text{ т/га} < \text{HIP}_{05}$. В той час норми 65 і 85 тис./га давали достовірне зниження – 0,89 і 0,64 т/га відповідно (табл. 4.2). Це підтверджує вибір норми 75 тис./га як оптимум для середньопродуктивної зони.

Таблиця 4.2

Урожайність зерна кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву (середнє по зонах продуктивності), т/га

Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025	CV між роками, %
65	9,07	7,25	9,82	8,71	15,2
70	9,52	7,55	10,39	9,15	15,9
75	9,64	7,68	10,67	9,33	16,2
80	9,61	7,85	10,63	9,36	15,0
85	9,26	7,41	10,27	8,98	16,2
<i>HIP₀₅</i> <i>фактор Б</i> <i>(норма висіву)</i>	0,20	0,21	0,17	0,19	

У низькопродуктивній зоні виявлено іншу закономірність – підвищення норм висіву до 75 тис./га і більше спричиняє зниження урожайності. За норми 80 тис./га зниження становить 0,37 т/га, за 85 тис./га максимальне зниження –

0,65 т/га від контролю. Норми 65–70 тис./га забезпечували рівень урожайності близький до контролю або вище нього. Хоча ці відмінності знаходяться на межі HP_{05} . Таким чином, для низькопродуктивної зони оптимальним є діапазон 65–70 тис./га, а загущення посіву понад 75 тис./га є агрономічно недоцільним. Відповідно до результатів, усереднених за роки дослідження, вплив зони продуктивності на врожайність є домінуючим фактором нашого дослідження. Це підтверджується розрахованими даними в таблиці 4.3, де відображено вплив зони продуктивності незалежно від норм висіву.

Таблиця 4.3.

Урожайність зерна кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від зони продуктивності поля (середнє по нормах висіву), т/га

Зона продуктивності	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025	CV, %	Δ макс–мін, т/га
Високої	10,91	9,48	11,70	10,70	10,5	2,22
Середньої	9,51	7,50	10,61	9,21	17,1	3,11
Низької	7,84	5,66	8,76	7,42	21,5	3,10
<i>По досліді в цілому</i>	<i>9,42</i>	<i>7,55</i>	<i>10,36</i>	<i>9,11</i>	<i>15,7</i>	<i>2,81</i>
<i>HP_{05} фактор A (зона продуктивності)</i>	<i>0,15</i>	<i>0,16</i>	<i>0,13</i>	<i>0,15</i>		

За фактором зони продуктивності найменша істотна різниця становить 0,15 т/га. Проте, відхилення врожайності між зонами продуктивності суттєво перевищують цей показник. Ми бачимо, що найбільшу врожайність було сформовано у високій зоні продуктивності, де вона досягла в середньому за роки дослідження 10,7 т/га. Середньопроодуктивна зона показала врожайність на рівні 9,21 т/га, а низькопродуктивна зона сформувала лише 7,42 т/га за роки

досліджень. Ми бачимо, що найнижчий коефіцієнт варіації був у зоні високої продуктивності й становив 10,5 %. У низькопродуктивній зоні зафіксовано найвищий показник коефіцієнта варіації, який становив 21,5 %, що свідчить про підвищену чутливість низькопродуктивних зон до умов року. При цьому, високопродуктивна зона є менш чутливою до відмінностей у погодних умовах.

На рисунку 4.2 також простежується стабільна закономірність реакції різних зон продуктивності на умови року.

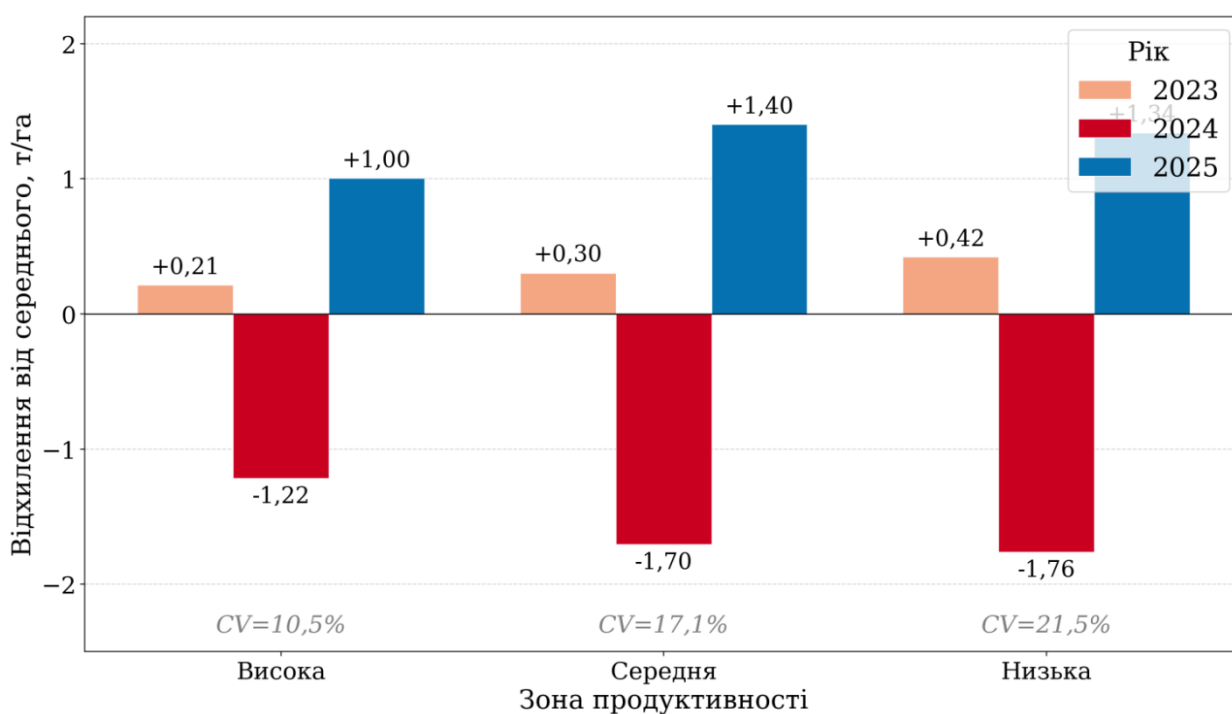


Рис. 4.2. Відхилення урожайності зерна кукурудзи ДКС 3939 від середнього багаторічного значення залежно від зони продуктивності та року досліджень (CV – коефіцієнт варіації між роками)

У сприятливому 2025 році всі зони продуктивності сформували врожайність вище середньобагаторічного значення, проте, найбільше позитивне відхилення спостерігалось у низькопродуктивній зоні, де воно становило 1,34 т/га. У середньопродуктивній зоні цей показник становив +1,40 т/га, а у високопродуктивній зоні 1,00 т/га.

У посушливому 2024 році спостерігалось протилежне явище. Всі зони продуктивності показали негативне відхилення від середнього значення, проте найбільше зниження врожайності було характерним саме для

низькопродуктивної зони, де воно досягало 1,76 т/га. У середньопродуктивній зоні відхилення становило 1,70 т/га, а у високопродуктивній зоні – 1,22 т/га. Отримані результати свідчать про те, що високопродуктивні зони поля мають вищу стабільність урожайності між роками, тоді, як низькопродуктивні зони є значно більш залежними від погодних умов року та рівня ресурсного забезпечення. Саме тому диференційований підхід до норм висіву є особливо важливим для мінімізації ризиків у нестабільних умовах вирощування.

На рисунку 4.3 зображено відхилення урожайності зерна кукурудзи від контрольної норми висіву 75 тис./га у зоні високої продуктивності в розрізі років дослідження.

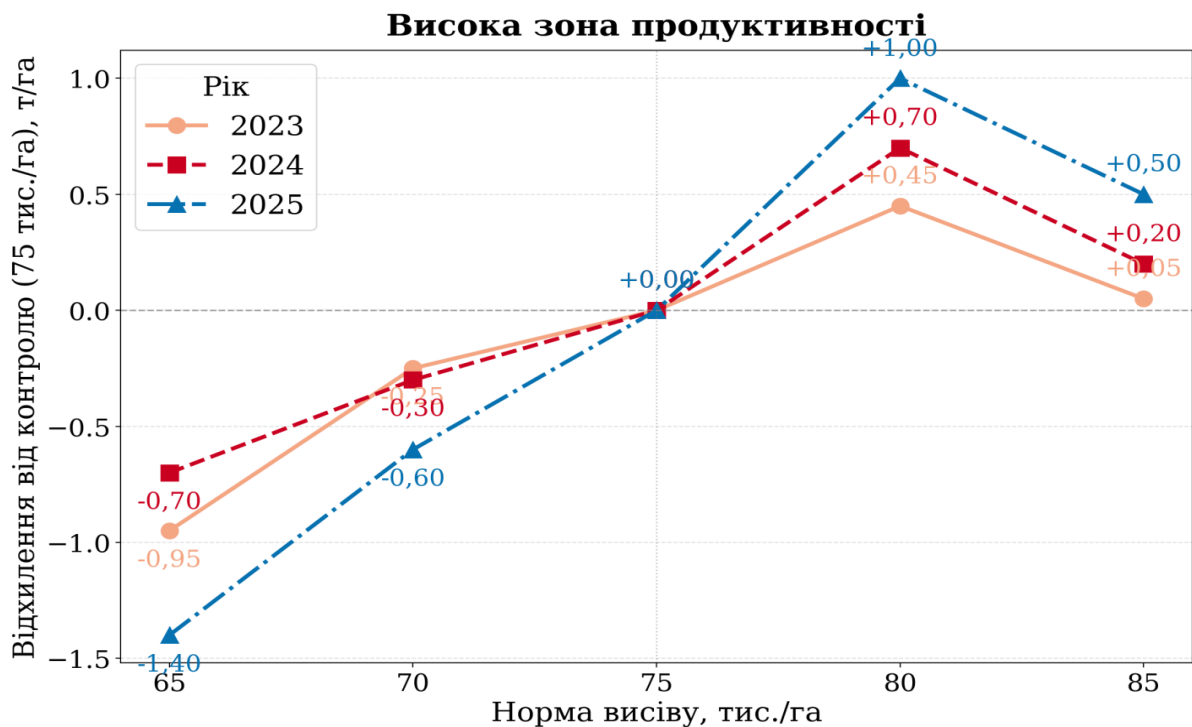


Рис. 4.3. Реакція урожайності кукурудзи ДКС 3939 на норму висіву у зоні високої продуктивності у різні роки досліджень (відхилення від контролю 75 тис./га)

Отримані результати чітко демонструють, що високопродуктивна зона позитивно реагує на помірне загущення посівів. У всі роки досліджень найбільший приріст урожайності було отримано за норми висіву 80 тис./га. Так, у 2023 році приріст урожайності становив +0,45 т/га, у 2024 році +0,70

т/га, а у 2025 році максимальний приріст досягав +1,00 т/га відносно контрольної норми висіву. Подальше загушення посівів до 85 тис./га не забезпечувало подальшого росту урожайності. Навпаки, у всі роки дослідження спостерігалось зменшення ефективності порівняно з нормою 80 тис./га, хоча показники урожайності все ще залишалися вищими за контроль. Водночас, зрідження посівів до 70 та 65 тис./га призводило до стабільного недобору урожаю. Особливо сильно це проявилось у 2025 році, де за норми 65 тис./га відхилення від контролю становило –1,40 т/га. Отримані результати свідчать про те, що високопродуктивна зона має достатній рівень ресурсного забезпечення для реалізації потенціалу загущених посівів проте лише до певного оптимального рівня, після якого внутрішньовидова конкуренція починає переважати позитивний ефект від збільшення густоти рослин. Результати проведеного дослідження також узгоджуються з даними метааналізу Zhang et al. (2026), в якому встановлено, що оптимальна густина стояння рослин кукурудзи суттєво залежить від рівня вологозабезпечення, властивостей ґрунту та просторової неоднорідності поля. Автори підкреслюють, що саме ресурсний потенціал окремих зон визначає межу ефективного загущення посівів.

На рисунку 4.4 зображено відхилення врожайності зерна кукурудзи від контрольної норми висіву 75 тис./га у середній зоні продуктивності. Отримані результати свідчать про те, що саме контрольна норма висіву була найбільш оптимальною для даної зони. Практично у всі роки досліджень як зрідження, так і загущення посівів призводило до зниження врожайності. Найбільше зменшення врожайності спостерігалось за норми 65 тис./га. Так, у 2025 році

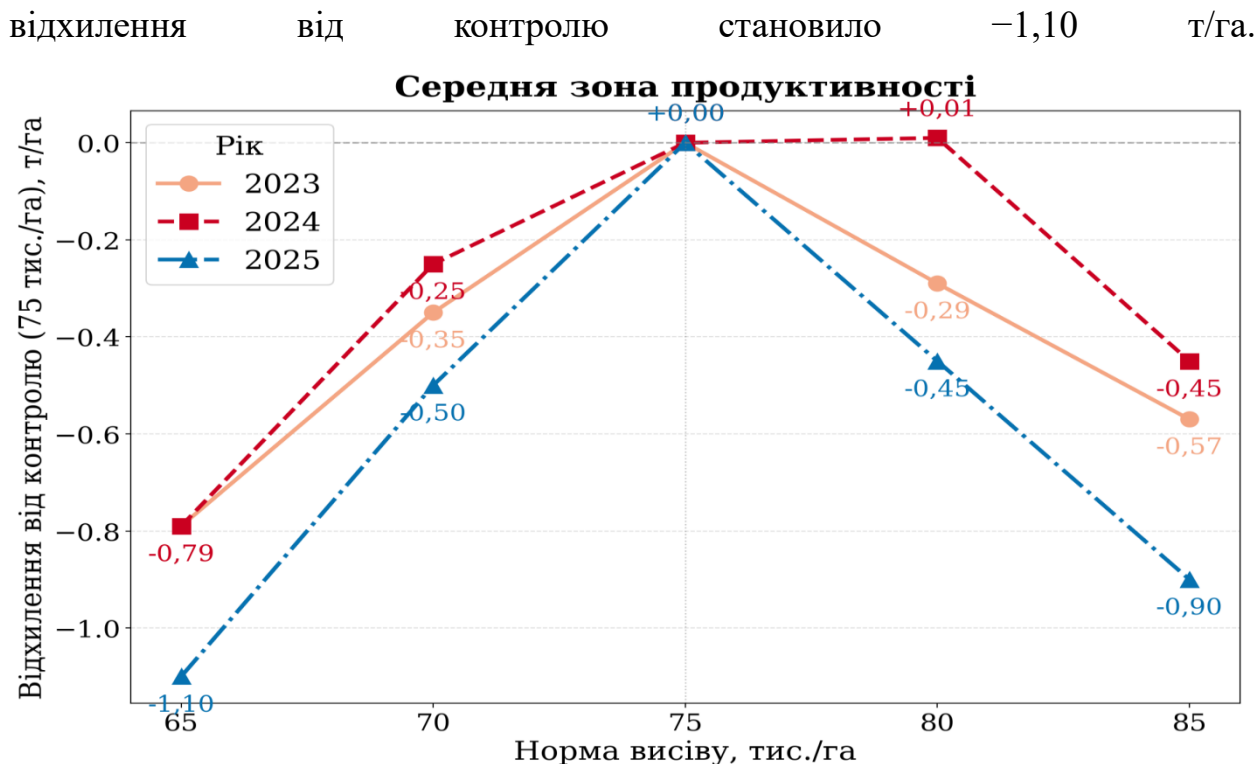


Рис. 4.4. Реакція урожайності кукурудзи ДКС 3939 на норму висіву у зоні середньої продуктивності в різні роки досліджень (відхилення від контролю 75 тис./га)

Загущення посівів до 80 тис./га в окремі роки практично не впливало на врожайність, проте подальше збільшення норми до 85 тис./га у всі роки призводило до стабільного зниження врожайності. Це свідчить про те, що середньопродуктивна зона має обмежений ресурсний потенціал і найкраще реалізує продуктивність саме за помірної густоти посіву.

На рисунку 4.5 зображено відхилення врожайності зерна кукурудзи від контрольної норми висіву 75 тис./га у зоні низької продуктивності. Отримані результати демонструють, що для даної зони найкраще себе показала норма висіву 70 тис./га. У всі роки досліджень саме цей варіант забезпечував позитивне відхилення врожайності від контролю, яке становило від +0,14 до +0,28 т/га. Загущення посівів до 80 та 85 тис./га призводило до суттєвого зниження врожайності. Найбільше негативне відхилення спостерігалось у 2025 році за норми 85 тис./га і становило - 0,78 т/га.

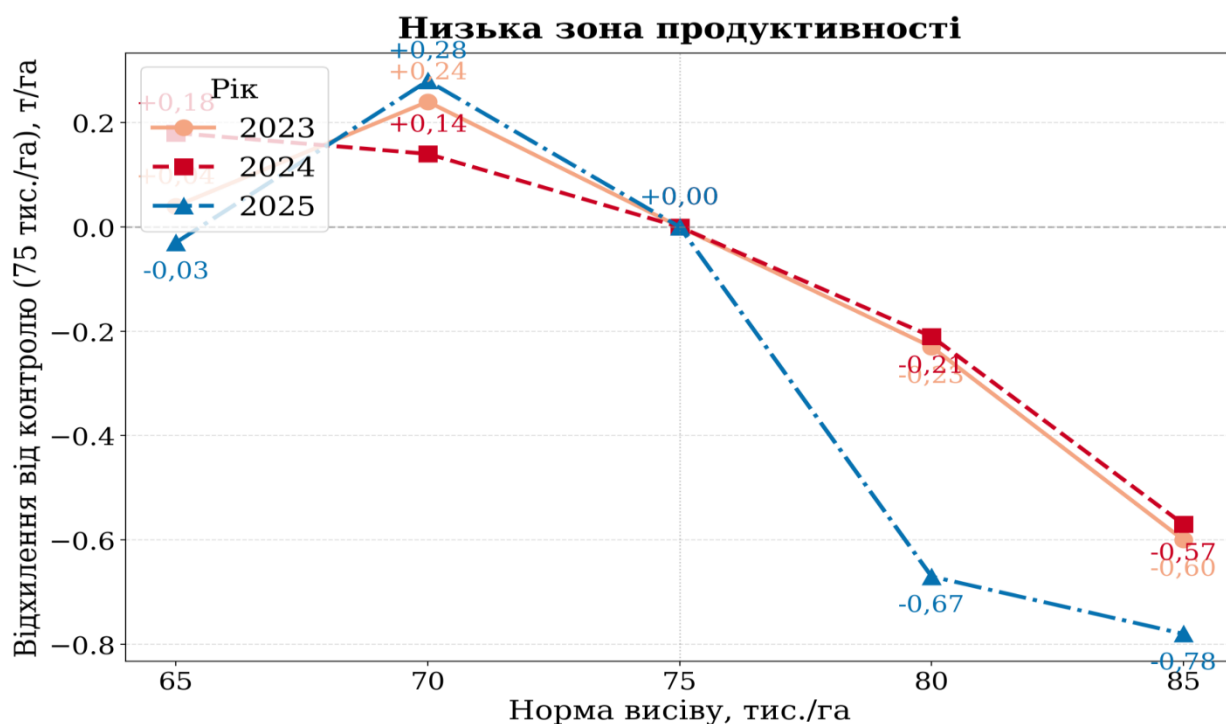


Рис. 4.5. Реакція урожайності кукурудзи ДКС 3939 на норму висіву у зоні низької продуктивності у різні роки досліджень (відхилення від контролю 75 тис./га)

Отримані результати свідчать про те, що низькопродуктивна зона має обмежений ресурсний потенціал, тому загущення посівів у таких умовах посилює внутрішньовидову конкуренцію та негативно впливає на формування врожайності. Guangxin Zhang et al. (2024) у сучасному огляді щодо доцільності подальшого підвищення густоти стояння рослин кукурудзи зазначають, що ефективність загущення значною мірою залежить від ґрунтово-кліматичних умов та потенціалу конкретної ділянки поля. Автори наголошують, що універсального підходу до підвищення густоти не існує, а оптимальні рішення повинні враховувати локальні умови вирощування.

4.2. Вплив норм висіву та зон продуктивності поля на якісні показники зерна та побічної продукції

Вологість зерна за збирання є одним із ключових технологічних показників виробництва кукурудзи. Він безпосередньо визначає витрати на сушіння, якість зберігання і кінцеву собівартість продукції. У нашому досліді збирання проводилось в одну дату для всіх варіантів дослідження. Це зробило вологість зерна індикатором сукупного впливу зони продуктивності і норми висіву на темп дозрівання та підсихання зерна. Результати трирічних досліджень демонструють чітку диференціацію вологості зерна між варіантами досліду і висвітлені в таблиці 4.4.

Відповідно до отриманих даних, найвища вологість зерна спостерігалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. При цьому ми також спостерігали лінійну залежність вологості зерна від норми висіву. По мірі збільшення норми висіву вологість зерна знижувалася, а по мірі зменшення норми висіву зростала. У високопродуктивній зоні найбільша вологість зерна була зафіксована за норми 65 тис./га і становила 25,6 %. Найнижча вологість фіксувалася за норми 85 тис./га і становила 23,7 %. У середньопродуктивній зоні контрольний варіант досліду мав вологість зерна 23,7 %. Норма висіву 65 тис./га мала найвищий показник вологості, а саме 25,1%. Найбільша норма висіву 85 тис./га мала найнижчий показник вологості у даній зоні, який становив 22,5 %. У низькопродуктивній зоні вологість зерна була найнижчою. У контрольному варіанті вона становила 20,6 %, у варіанті з нормою висіву 65 тис./га вологість становила 21,2 %, а за найбільшої нормі висіву 85 тис./га вона становила 20,0 % (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Вологість зерна кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) за збирання залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Високої	65	28,2	22,0	26,6	25,6
	70	27,8	21,8	26,0	25,2
	75	27,5	21,2	25,4	24,7
	80	27,1	20,8	24,7	24,2
	85	26,7	20,4	24,1	23,7
Середньої	65	27,6	21,7	25,9	25,1
	70	27,2	21,3	25,1	24,5
	75	26,6	20,5	24,0	23,7
	80	26,1	19,9	23,1	23,0
	85	25,6	19,5	22,3	22,5
Низької	65	24,8	18,0	20,8	21,2
	70	24,6	17,6	20,3	20,8
	75	24,3	17,4	20,1	20,6
	80	24,1	17,0	19,9	20,3
	85	23,8	16,6	19,5	20,0
<i>НІР₀₅ фактор А (зона)</i>		<i>0,38</i>	<i>0,31</i>	<i>0,29</i>	—
<i>НІР₀₅ фактор Б (норма висіву)</i>		<i>0,21</i>	<i>0,18</i>	<i>0,17</i>	—
<i>НІР₀₅ взаємодія А×Б</i>		<i>0,37</i>	<i>0,31</i>	<i>0,29</i>	—

Зона продуктивності виявилась найпотужнішим фактором диференціації вологості зерна при збиранні. Середня вологість зерна за три роки у високопродуктивній зоні (контрольна норма 75 тис/га) становила 24,7 %, у

середньопродуктивній – 23,7 %, у низькопродуктивній – лише 20,6 %. Різниця між крайніми зонами за однакової норми висіву становила 4,1 в.п. – показник, що суттєво перевищує HP_{05} для фактора А (0,29–0,38) і є статистично достовірним у всі роки досліджень. Механізм зональної диференціації вологості зерна безпосередньо пов'язаний із закономірностями фенологічного розвитку. Рослини у низькопродуктивній зоні внаслідок drought escape проходили фазу R5 на 14–19 діб раніше ніж у високопродуктивній зоні. Це забезпечувало значно більше часу для природного підсихання зерна до єдиної дати збирання.

Li et al. (2021, Crop Science) показали, що мінливість вологості зерна між середовищами за фізіологічної стиглості є суттєвою. Вона визначається передусім термічними умовами і тривалістю підперіоду від R5 до збирання. А не лише генотиповими характеристиками гібриду. Це підтверджує, що виявлені нами зональні відмінності вологості є закономірним наслідком різної тривалості періоду природної дегідратації між зонами, а не випадковою варіацією.

На рисунку 4.6 зображено теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2023 році. На рисунку добре помітно, що найбільша вологість зерна формувалася у зоні високої продуктивності, а найменша – у низькопродуктивній зоні. Також чітко простежується тенденція до поступового зниження вологості зерна зі збільшенням норми висіву. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 28,2 % за норми 65 тис./га до 26,7 % за норми 85 тис./га. У середньопродуктивній зоні аналогічна тенденція спостерігалася в межах від 27,6 % до 25,6 %, а у низькопродуктивній зоні від 24,8 % до 23,8 %. Контрольний варіант із нормою висіву 75 тис./га, який виділено рамкою, займав проміжне положення між зрідженими та загущеними варіантами дослідів.

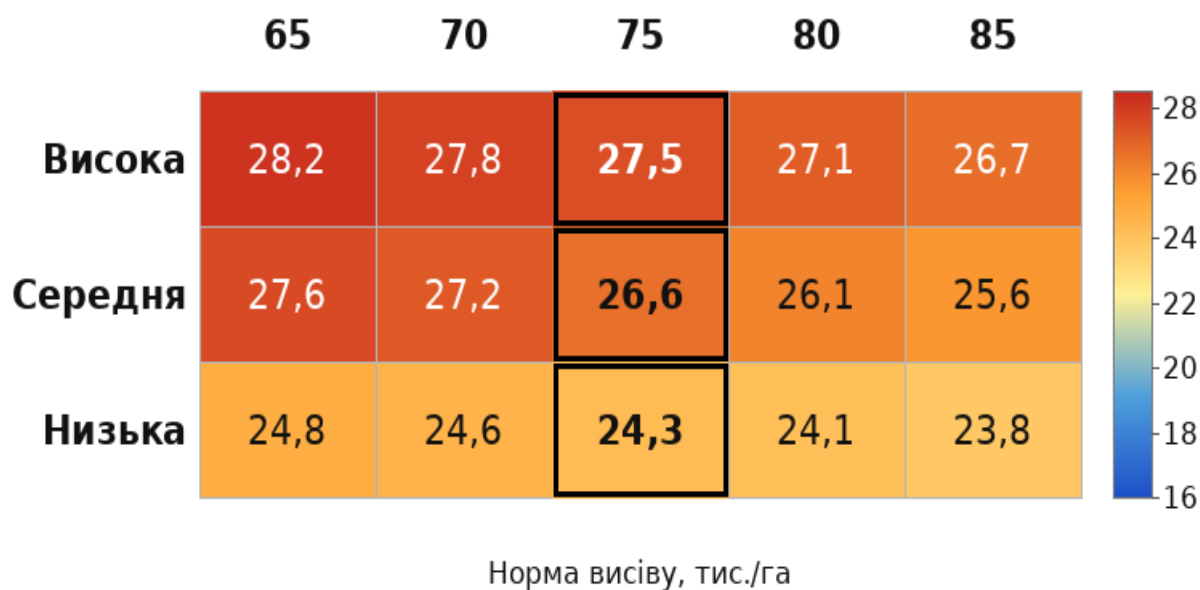


Рис. 4.6. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2023 р.

На рисунку 4.7 зображено теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2024 році. Порівняно з 2023 роком добре помітно загальне зниження вологості зерна у всіх зонах продуктивності, що пояснюється більш посушливими умовами року. Як і в попередньому році, найбільша вологість зерна спостерігалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 22,0 % за норми 65 тис./га до 20,4 % за норми 85 тис./га. У середньопродуктивній зоні показники становили від 21,7 % до 19,5 %, а у низькопродуктивній зоні від 18,0 % до 16,6 %.

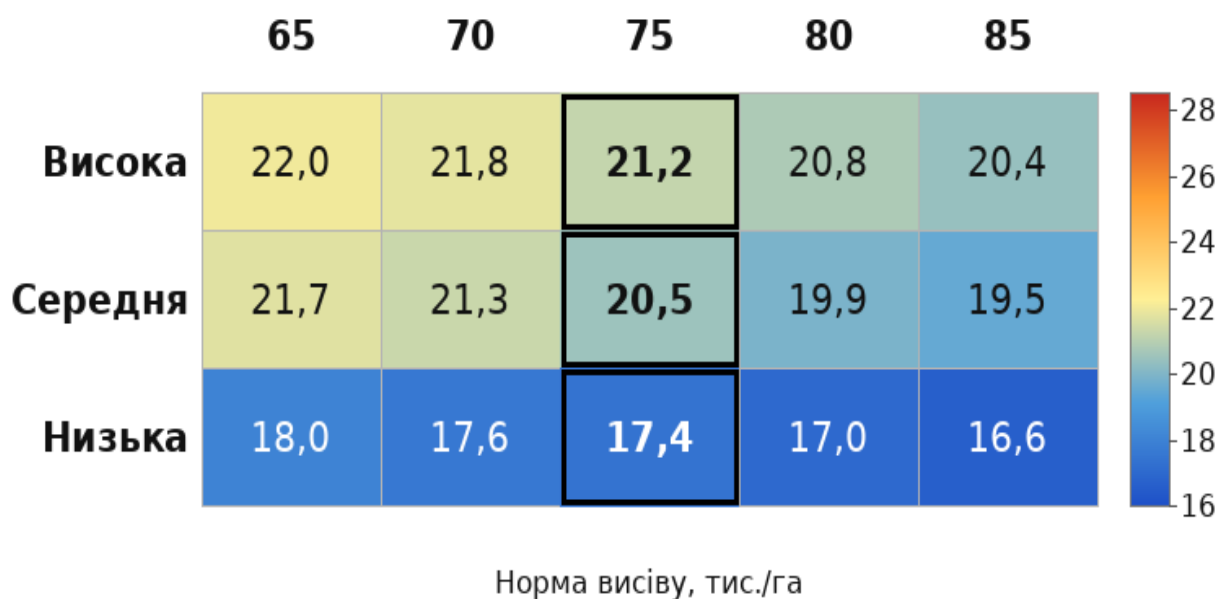


Рис. 4.7. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2024 р.

На рисунку 4.8 зображено теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2025 році. Отримані результати підтверджують закономірності, які спостерігалися і в попередні роки досліджень. Найвища вологість зерна формувалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 26,6 % за норми 65 тис./га до 24,1 % за норми 85 тис./га. У середньопроодуктивній зоні показники становили від 25,9 % до 22,3 %, а у низькопродуктивній зоні від 20,8 % до 19,5 %.

На рисунку 4.9 зображено усереднену за 2023–2025 роки теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву. Отримані результати підтверджують загальну закономірність, яка спостерігалася у всі роки досліджень. Найвища вологість зерна формувалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 25,6 % за норми 65 тис./га до 23,7 % за норми 85 тис./га. У зоні середньої продуктивності

показники становили від 25,1 % до 22,5 %, а у низькопродуктивній зоні від 21,2 % до 20,0 %.

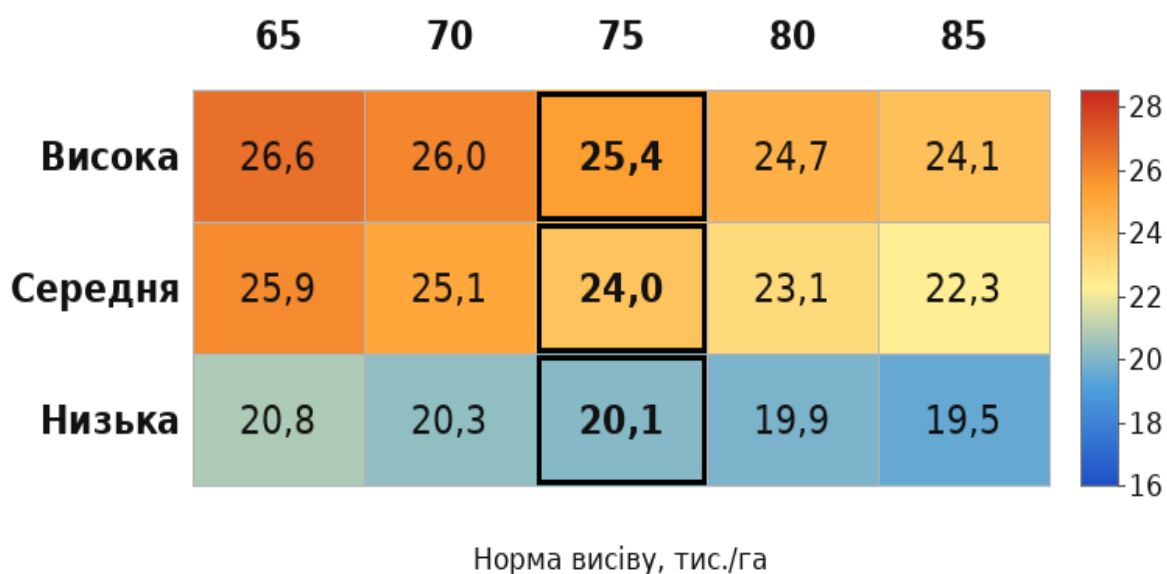


Рис. 4.8. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2025 р.

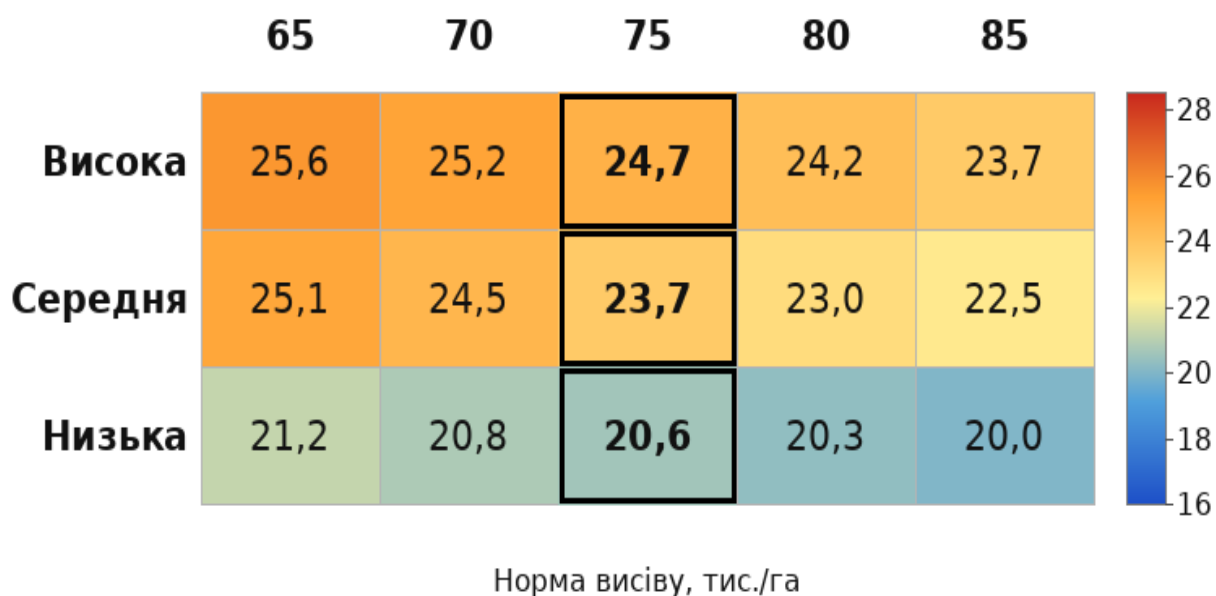


Рис. 4.9. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, середнє за 2023–2025 рр.

Норма висіву чинила статистично достовірний, але менш виражений вплив на вологість зерна порівняно із зоною продуктивності. За збільшення

норми від 65 до 85 тис./га вологість зерна знижувалась у всіх зонах і роках досліджень. У середньому по зонах і роках різниця між нормами 65 і 85 тис./га становила 0,9 – 1,1 в.п. – достовірна на рівні НР₀₅ для фактора Б (0,17–0,21).

На рисунку 4.10 зображено динаміку вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у високопродуктивній зоні в роки досліджень. Отримані результати показують чітку тенденцію до поступового зниження вологості зерна зі збільшенням норми висіву у всі роки досліджень. Найвищі показники вологості зерна спостерігалися у 2023 році. За норми 65 тис./га вологість становила близько 28,8 %, а за норми 85 тис./га знижувалася до 27,2 %.

У 2024 році, який характеризувався більш посушливими умовами, показники вологості були найнижчими і змінювалися в межах від 22,5 % до 20,9 %. У 2025 році показники займали проміжне положення між попередніми роками. Середні значення за роки досліджень також підтверджують стабільне зниження вологості зерна зі збільшенням густоти стояння рослин. Це свідчить про те, що підвищення норми висіву у високопродуктивній зоні сприяло швидшій втраті вологи зерном перед збиранням.

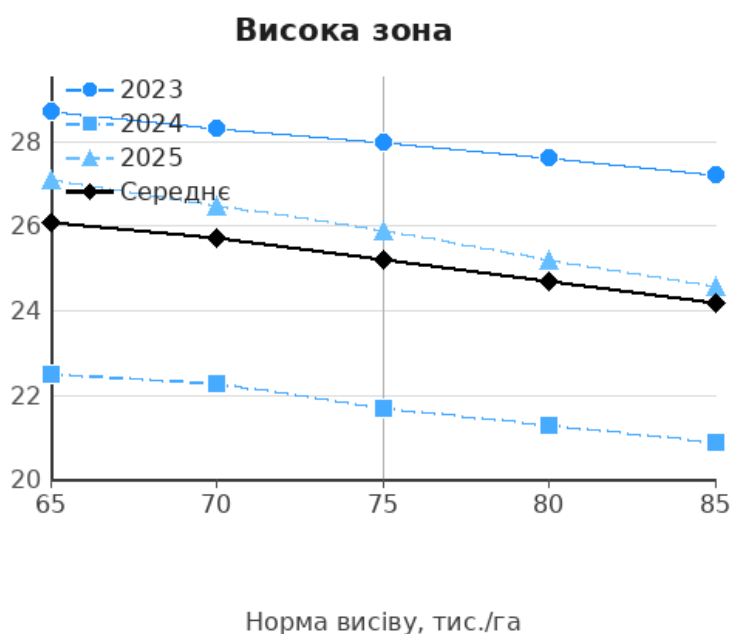


Рис. 4.10. Динаміка вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у високопродуктивній зоні в роки досліджень

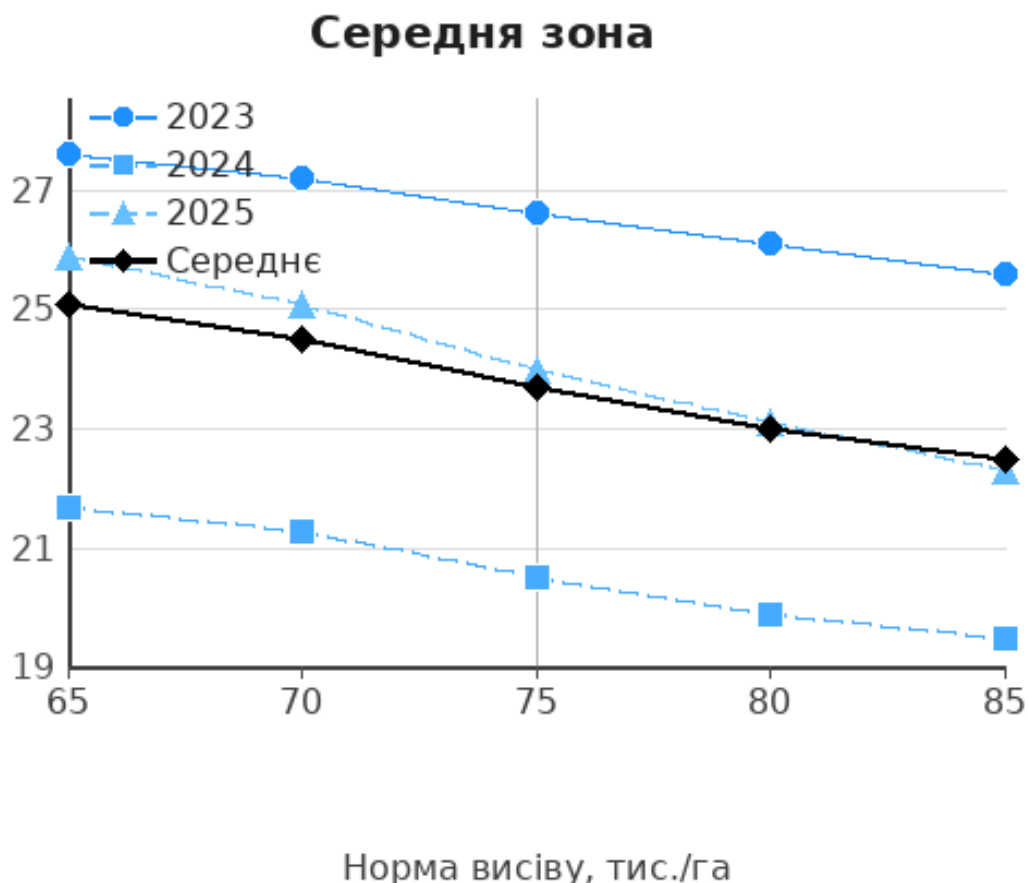


Рис. 4.11. Динаміка вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у середньопродуктивній зоні в роки досліджень

На рисунку 4.11 зображено динаміку вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у середньопродуктивній зоні в роки досліджень. Отримані результати показують, що в усі роки досліджень зі збільшенням норми висіву вологість зерна поступово знижувалася

Найвищі показники вологості зерна були характерні для 2023 року. За норми 65 тис./га вологість становила близько 27,6 %, а за норми 85 тис./га знижувалася до 25,5 %. У 2024 році спостерігалися найнижчі показники вологості зерна, які змінювалися від 21,7 % до 19,5 %. У 2025 році значення займали проміжне положення між попередніми роками.

На рисунку 4.12 зображено динаміку вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у низькопродуктивній зоні в роки досліджень. Отримані результати показують, що в усі роки досліджень у

низькопродуктивній зоні спостерігалася найнижча вологість зерна порівняно з іншими зонами продуктивності. Також, як і в попередніх зонах, простежувалася тенденція до поступового зниження вологості зерна зі збільшенням норми висіву. У 2023 році вологість зерна змінювалася від 25,2 % за норми 65 тис./га до 24,2 % за норми 85 тис./га. У 2024 році показники були найнижчими та становили від 18,5 % до 17,0 %, а у 2025 році від 21,2 % до 20,0 %.

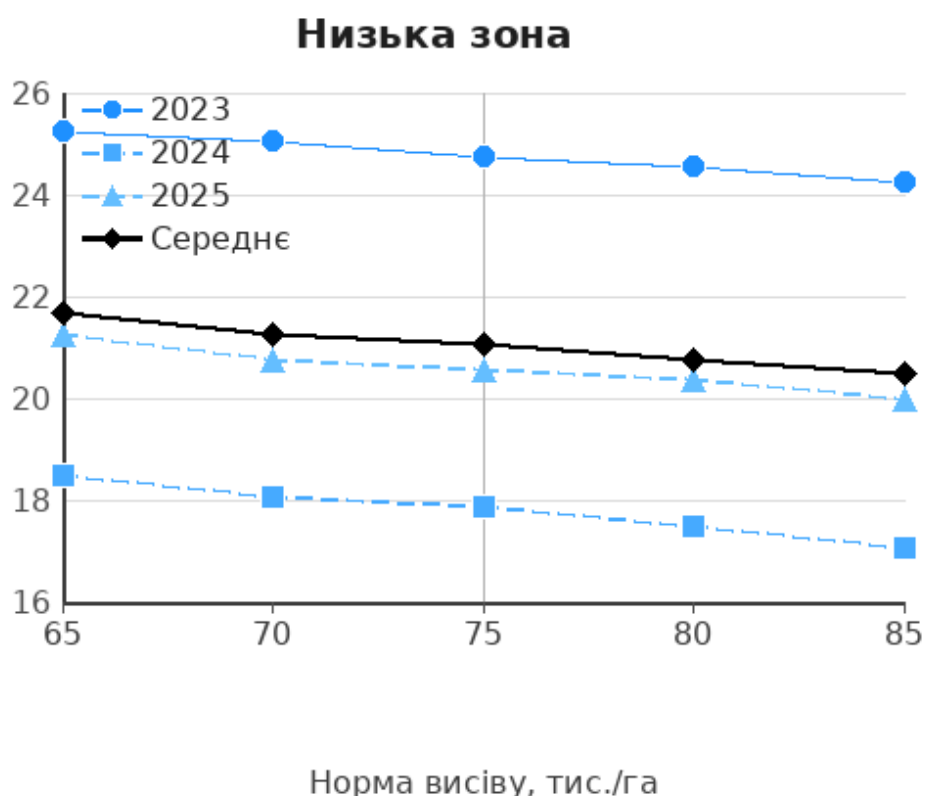


Рис. 4.12. Динаміка вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у низькопродуктивній зоні в роки досліджень

Механізм впливу норми висіву на вологість зерна за збирання подвійним. По-перше, загущений посів прискорює проходження фенологічних фаз. Зокрема періоду V6–VT і генеративного періоду. Це зміщує дату настання R5 на більш ранні строки і збільшує тривалість природної дегідратації до дати збирання. По-друге, загущення змінює мікрокліматичні умови в посіві – підвищує відносну вологість повітря в міжрядному просторі і знижує

швидкість вітру, що теоретично могло б сповільнювати дегідратацію. Однак перший ефект у наших умовах домінував: вологість зерна за вищих норм була нижчою.

Guo et al. (2022) у прямому досліді з різними густотами підтвердили, що підвищення густоти посіву прискорює дегідратацію зерна після фізіологічної стиглості через вищу транспірацію і прискорений перехід до деградації листового апарату, що посилює відтік води від зерна. HR_{05} для взаємодії зони і норми висіву становило 0,29–0,37 в.п. Це свідчить про статистично достовірний ефект взаємодії у всі роки досліджень.

Li et al. (2021, *Journal of Integrative Agriculture*) підкреслюють, що практичні наслідки вологості зерна за збирання для механізованого збирання і витрат на сушіння є одним із ключових критеріїв оптимізації строків і технології збирання кукурудзи.

Yang et al. (2025) у дослідженні з гібридами різних груп стиглості показали, що темп дегідратації зерна після R5 є гібрид специфічним. Також він суттєво залежить від температури і вологості повітря в підперіод збирання. А зміна цих умов між роками може перекривати за масштабом агротехнічні ефекти норми висіву. Це і спостерігається у наших даних.

Li et al. (2021, *AgroNomy Journal*) у регіональному аналізі моделі прогнозу вологості зерна до збирання встановили, що просторова варіабельність вологості між ділянками поля корелює з варіабельністю термічних умов і водного режиму зон. Тобто внутрішньопольова диференціація вологості зерна є закономірним відображенням зональної неоднорідності поля. Це підтверджує, що виявлена нами різниця вологості між зонами є стійкою характеристикою поля, а не ситуативним явищем окремого сезону.

Вміст білку у зерні кукурудзи є ключовим показником поживної цінності зерна і важливим критерієм його технологічної якості. На відміну від більшості морфологічних і продуктивних показників, вміст білку часто змінюється у напрямку, протилежному до врожайності. Результати трирічних

досліджень демонструють виражену диференціацію вмісту білку між зонами продуктивності та певну залежність від норми висіву. У таблиці 4.5 подано результати аналізу зерна кукурудзи на вміст білку залежно від норм висіву та зони продуктивності поля. Дані свідчать про те, що існує залежність між зоною продуктивності і вона більш виражена.

Таблиця 4.5.

Вміст білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Високопродуктивна	65	8,4	8,6	8,2	8,4
	70	8,3	8,5	8,1	8,3
	75	8,2	8,4	8,0	8,2
	80	8,1	8,3	7,8	8,1
	85	8,2	8,4	8,1	8,2
	Середнє по зоні	8,2	8,4	8,0	8,2
Середньопродуктивна	65	8,8	9,0	8,5	8,8
	70	8,7	8,9	8,4	8,7
	75	8,6	8,8	8,3	8,6
	80	8,6	8,8	8,4	8,6
	85	8,7	8,9	8,5	8,7
	Середнє по зоні	8,7	8,9	8,4	8,7
Низькопродуктивна	65	9,2	9,7	9,0	9,3
	70	9,1	9,6	8,8	9,2
	75	9,1	9,6	8,9	9,2
	80	9,3	9,8	9,1	9,4
	85	9,5	10,0	9,2	9,6
	Середнє по зоні	9,2	9,7	9,0	9,3

Зона продуктивності виявилась найбільш потужним фактором диференціації вмісту білку у зерні. Середній вміст білку за три роки у високопродуктивній зоні (контрольна норма 75 тис./га) становив 8,2 %, у середньопродуктивній – 8,6 %, у низькопродуктивній – 9,2 %. Таким чином, зі зниженням продуктивності зони вміст білку закономірно зростав. Різниця між крайніми зонами за контрольної норми становила 1,0 в. п. Ця закономірність є прямим відображенням ефекту розбавлення білку. У високопродуктивній зоні рослини формують більшу масу зерна з вищим вмістом крохмалю. Це призводить до відносного зниження концентрації білкових фракцій. У низькопродуктивній зоні, де врожайність суттєво нижча, наприклад 7,41 т/га проти 10,67 т/га у високій зоні, синтез крохмалю обмежений стресовими умовами. В той час, як накопичення азотовмісних сполук є відносно менш чутливим до дефіциту ресурсів.

Correndo et al. (2021) підтверджують, що дефіцит вологи в генеративний підперіод призводить до порушення балансу між накопиченням крохмалю і білку у зерні на користь білкових фракцій. Саме цей механізм і реалізується у низькопродуктивній зоні нашого дослідження де водний стрес є системним явищем. Залежність вмісту білку від норми висіву виявилась нелінійною і різною за характером у різних зонах продуктивності. У високопродуктивній зоні мінімальний вміст білку зафіксовано за норм 80 тис./га. За підвищення норми до 85 тис./га вміст білку незначно зростав до 8,2 %. Тобто у цій зоні вплив норми висіву на вміст білку є мінімальним.

Konuskan et al. (2022) у досліді з густотою і якісними показниками зерна кукурудзи встановили, що за помірних густот в умовах достатнього ресурсного забезпечення зміни вмісту білку між варіантами густоти є несуттєвими. Вирішальну роль відіграє забезпечення рослин азотом на одиницю біомаси. У середньопродуктивній зоні ситуація змінюється. Вміст білку за норм 65–70 тис./га становив 8,8 і 8,7 %, відповідно. За норм 75–80 тис./га (8,6%) знижувався до мінімуму і незначно зростав до 8,7% за норми 85 тис./га. Такий параболічний характер залежності із мінімумом за контрольних норм

узгоджується з даними Yan et al. (2025), які показали, що за оптимальної густоти посіву рослини кукурудзи досягають максимальної продуктивності. Це, у свою чергу, супроводжується максимальним ефектом розбавлення білку. Тоді, як відхилення від оптимуму, як у бік зменшення, так і у бік збільшення, призводять до зростання відносного вмісту білку.

Найвиразніша реакція вмісту білку на норму висіву спостерігалась у низькопродуктивній зоні. Тут вміст білку за норми 65 тис./га (9,2–9,3 %) зростав із збільшенням норми. Максимум було досягнуто за норми 85 тис./га 9,5–9,6 % у середньому за роки. Приріст становив 0,3–0,4 в. п. між крайніми нормами. Механізм цього ефекту є подвійним. По-перше, за загущення в умовах обмеженого ресурсного забезпечення зони, синтез крохмалю пригнічується сильніше ніж синтез білку. Це підвищує відносний вміст останнього. По-друге, скорочення тривалості наливу зерна за загущення і в умовах drought escape призводить до неповного виповнення зерна крохмалем.

Ochieng' et al. (2021) показали, що доступність азоту на одиницю сформованої зернової маси є ключовим регулятором вмісту білку у зерні кукурудзи. А також, що в умовах обмеженого накопичення сухої маси зерна, вміст білку закономірно зростає навіть за незмінного азотного живлення.

На рисунку 4.13 зображено теплову карту вмісту білку у зерні кукурудзи гібриду ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2023 році. Отримані результати показують, що найбільший вплив на вміст білку мала саме зона продуктивності поля. Найвищі показники вмісту білку формувалися у низькопродуктивній зоні, а найнижчі у високопродуктивній зоні. У високій зоні продуктивності вміст білку змінювався в межах від 8,1 %

до 8,4 %. У середньопродуктивній зоні продуктивності показники становили 8,6–8,8 %, а у низькопродуктивній зоні від 9,1 % до 9,5 %.

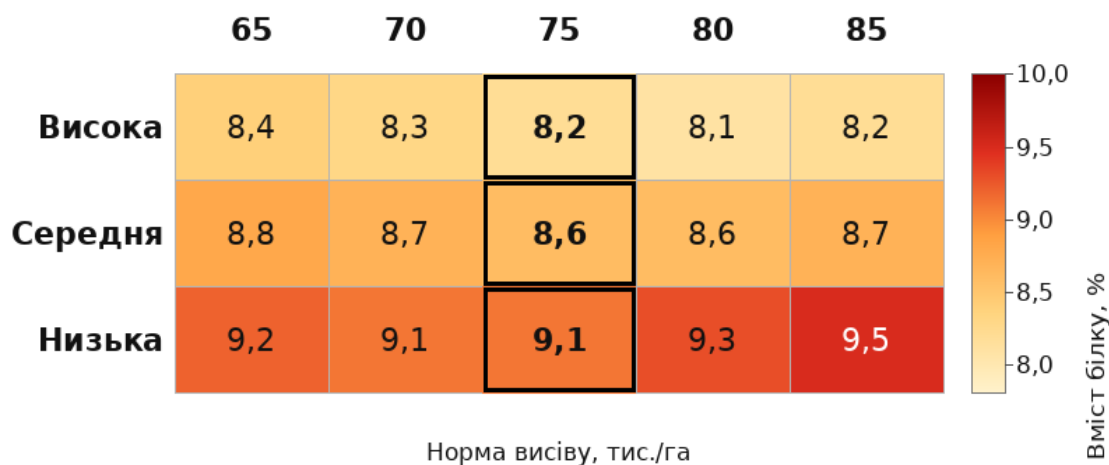


Рис. 4.13. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2023 р.

При цьому вплив норми висіву був менш вираженим, ніж вплив самої зони продуктивності. Контрольний варіант із нормою висіву 75 тис./га, який виділено рамкою, займав проміжне положення між іншими варіантами дослідів.

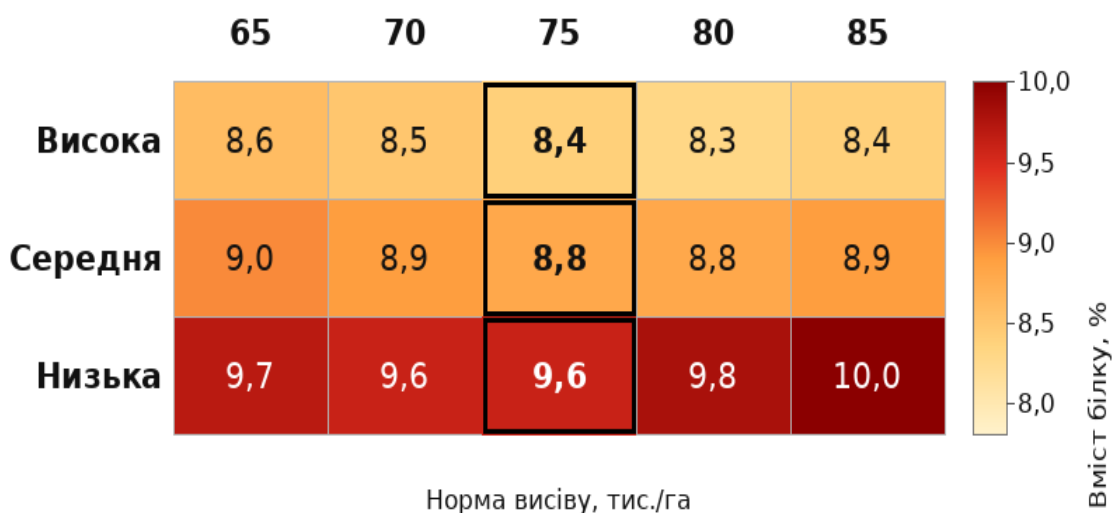


Рис. 4.14. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2024 р.

На рисунку 4.14 зображено теплову карту вмісту білку у зерні кукурудзи гібриду ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2024 році. Отримані результати підтверджують закономірність попереднього року

досліджень. Найвищий вміст білку формувався у низькопродуктивній зоні, а найнижчий у високопродуктивній зоні. У високій зоні продуктивності вміст білку змінювався від 8,3 % до 8,6 %, у середньопродуктивній зоні від 8,8 % до 9,0 %, а у низькопродуктивній зоні від 9,6 % до 10,0 %. Вплив норми висіву був менш вираженим порівняно із впливом самої зони продуктивності.

На рисунку 4.15 зображено теплову карту вмісту білку у зерні кукурудзи гібриду ДКС 3939 у 2025 році. Отримані результати також підтверджують загальну тенденцію попередніх років. Найнижчий вміст білку формувався у зоні високої продуктивності, де показники змінювалися від 7,8 % до 8,2 %, а найвищий у низькопродуктивній зоні, де вміст білку становив від 8,8 % до 9,2 %. У середньопродуктивній зоні продуктивності показники займали проміжне положення та змінювалися в межах 8,3–8,5 %.

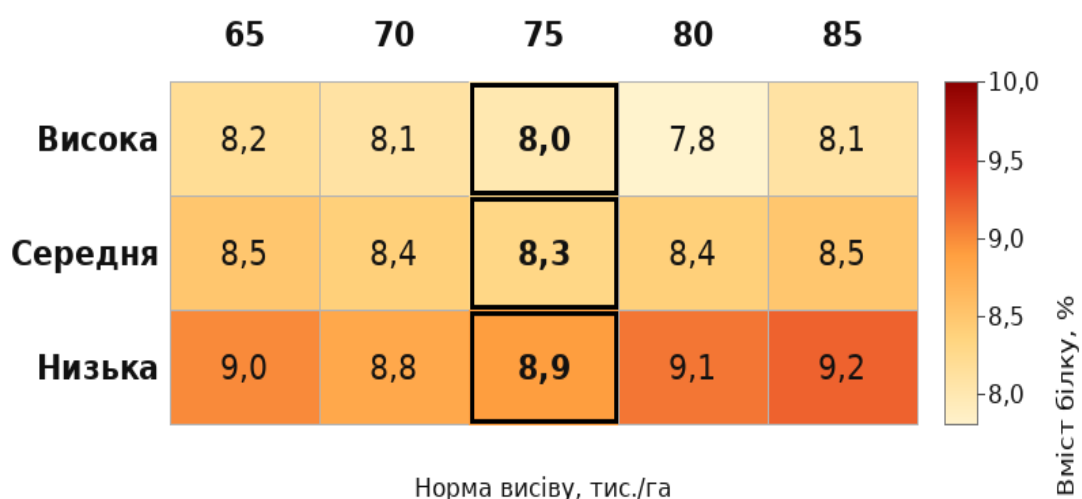


Рис. 4.15. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2025 р.

На рисунку 4.16 подано усереднену за 2023–2025 рр. теплову карту вмісту білку у зерні кукурудзи залежно від зони продуктивності та норми висіву. Отримані результати підтверджують, що саме зона продуктивності поля була основним фактором впливу на вміст білку у зерні. У високій зоні продуктивності вміст білку змінювався в межах 8,1–8,4 %, у середньопродуктивній зоні становив 8,6–8,8 %, а у низькопродуктивній зоні

досягав 9,2–9,6 %. Вплив норми висіву був менш помітним і проявлявся лише у незначних коливаннях показника між варіантами досліду.

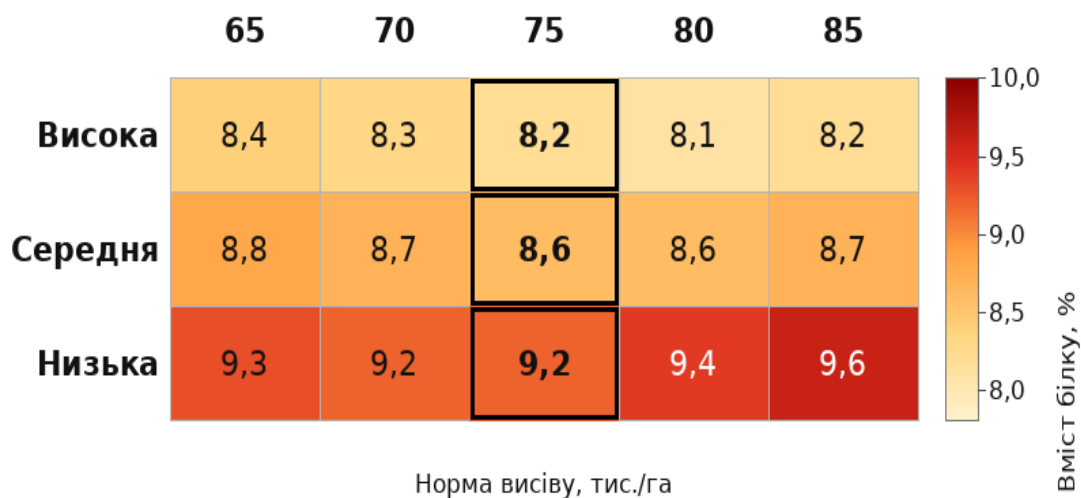


Рис. 4.16. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, середнє за 2023–2025 рр.

Yin et al. (2025) підтверджують, що стресові умови вегетаційного сезону, зокрема дефіцит вологи у період наливу зерна, суттєво підвищують вміст білку. Цей механізм працює через скорочення накопичення крохмалю, причому ефект є найбільш вираженим у верхівковій частині початку. Тобто, у зонах із найнижчим пріоритетом для відтоку асимілятів.

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи є важливим показником якості врожаю, оскільки він формується під час наливу зерна і залежить від здатності рослини накопичувати та перерозподіляти продукти фотосинтезу.

Yue et al. (2022) зазначають, що забезпечення рослин азотом впливає на налив зерна та накопичення крохмалю через зміну активності ферментів, які беруть участь у його синтезі. Це підтверджує, що вміст крохмалю є чутливим показником до умов живлення та загального ресурсного забезпечення рослин.

Результати досліджень (табл. 4.7) показують, що найбільший вміст крохмалю формувався у зоні високої продуктивності. У середньому за 2023–2025 роки він становив 72,1 %. У зоні середньої продуктивності середній показник був нижчим і становив 70,8 %, а у низькопродуктивній зоні продуктивності – лише 68,9 %. Це свідчить про те, що кращі умови

забезпечення рослин у високопродуктивній зоні сприяли активнішому накопиченню крохмалю в зерні. Вплив норми висіву був менш помітним, ніж вплив самої зони продуктивності. У зоні високої продуктивності найвищий середній показник крохмалю був зафіксований за норми 80 тис./га і становив 72,5 %. У середньопродуктивній зоні найкращий результат показала норма 75 тис./га, де вміст крохмалю становив 71,0 %. У низькопродуктивній зоні різниця між нормами висіву була незначною, проте найнижчий показник спостерігався за норми 85 тис./га і становив 68,5 %. Загалом отримані результати показують, що зона продуктивності мала значно більший вплив на накопичення крохмалю в зерні, ніж зміна норми висіву.

Таблиця 4.7

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від
норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025
Високопродуктивна	65	71,8	71,0	72,4	71,7
	70	72,0	71,2	72,7	72,0
	75	72,3	71,4	72,9	72,2
	80	72,6	71,6	73,4	72,5
	85	72,2	71,3	72,6	72,0
Середньопродуктивна	65	70,5	69,8	71,2	70,5
	70	70,8	70,0	71,5	70,8
	75	71,1	70,2	71,8	71,0
	80	70,9	70,1	71,6	70,9
	85	70,7	69,9	71,3	70,6
Низькопродуктивна	65	69,2	67,8	69,8	68,9
	70	69,5	68,0	70,2	69,2
	75	69,4	67,9	70,0	69,1
	80	69,1	67,7	69,7	68,8
	85	68,7	67,3	69,4	68,5
Середнє – Високопродуктивна зона		72,2	71,3	72,8	72,1
Середнє – Середньопродуктивна зона		70,8	70,0	71,5	70,8
Середнє – Низькопродуктивна зона		69,2	67,7	69,8	68,9

Отримані нами результати, можна пояснити тим, що різні зони продуктивності мають неоднакове ресурсне забезпечення, зокрема за вологою та елементами живлення.

Feng et al. (2024) також показали, що рівень азотного живлення змінює обмін азоту і вуглеводів у зерні кукурудзи, що безпосередньо впливає на накопичення крохмалю. Тому різниця між зонами продуктивності може бути пов'язана не лише з урожайністю, а й з різною інтенсивністю формування запасних речовин у зерні.

У таблиці 4.8 наведено вміст крохмалю у зерні кукурудзи залежно від зони продуктивності поля. Отримані результати показують, що найбільший вміст крохмалю формувався у зоні високої продуктивності. У середньому за 2023–2025 роки цей показник становив 72,1 %.

Таблиця 4.8

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від зони продуктивності, % (середнє за нормами висіву)

Зона продуктивності	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Високопродуктивна	72,2	71,3	72,8	72,1
Середньопродуктивна	70,8	70,0	71,5	70,8
Низькопродуктивна	69,2	67,7	69,8	68,9
Різниця Високопродуктивна–Низькопродуктивна	3,0	3,6	3,0	3,2

У середньопродуктивній зоні продуктивності вміст крохмалю становив 70,8 %, а у низькопродуктивній зоні – 68,9 %. Різниця між високо- та низькопродуктивними зонами в середньому становила 3,2 %, що свідчить про значний вплив умов вирощування на накопичення крохмалю в зерні. Також варто зазначити, що у 2024 році різниця між зонами була найбільшою і

становила 3,6 %, що, ймовірно, пов'язано з більш посушливими умовами року. У таблиці 4.9 наведено вміст крохмалю залежно від норми висіву. Отримані результати показують, що вплив норми висіву був меншим, ніж вплив зони продуктивності. У зоні високої продуктивності найвищий показник крохмалю був отриманий за норми 80 тис./га і становив 72,5 %. У середньопродуктивній зоні найкращий результат показала норма 75 тис./га, де вміст крохмалю становив 71,0 %.

Таблиця 4.9

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву, % (середнє за роками досліджень 2023–2025 рр.)

Зона продуктивності	65	70	75	80	85	Середнє по зоні
Високопродуктивна	71,7	72,0	72,2	72,5	72,0	72,1
Середньопродуктивна	70,5	70,8	71,0	70,9	70,6	70,8
Низькопродуктивна	68,9	69,2	69,1	68,8	68,5	68,9
Середнє по нормах	70,4	70,7	70,8	70,7	70,4	70,6

У низькопродуктивній зоні продуктивності різниця між нормами висіву була незначною, проте, найнижчий показник спостерігався за норми 85 тис./га і становив 68,5 %. Загалом можна зробити висновок, що зона продуктивності більше впливала на накопичення крохмалю в зерні, ніж зміна норми висіву. Вплив норми висіву на вміст крохмалю можна розглядати через зміну конкуренції між рослинами. За загущення посівів кожна рослина отримує менше світла, вологи та поживних речовин, що може впливати на процес наливу зерна.

Zhang et al. (2022) підкреслюють, що поєднання азотного і калійного живлення суттєво впливає на врожайність і якість зерна кукурудзи, у тому

числі на показники, пов'язані з крохмалем. Тому реакція крохмалю на густоту посіву може бути пов'язана з тим, наскільки рослина забезпечена основними елементами живлення.

У 2023 році (рис. 4.20) найбільший вміст крохмалю формувався у зоні високої продуктивності. Показники перевищували 72 %, тоді як у низькопродуктивній зоні вони переважно були нижчими за 69,5 %. Середньопродуктивна зона продуктивності займала проміжне положення. Вплив норми висіву був менш помітним, хоча у зоні продуктивності високої дещо кращі результати спостерігалися за норм 75–80 тис./га.

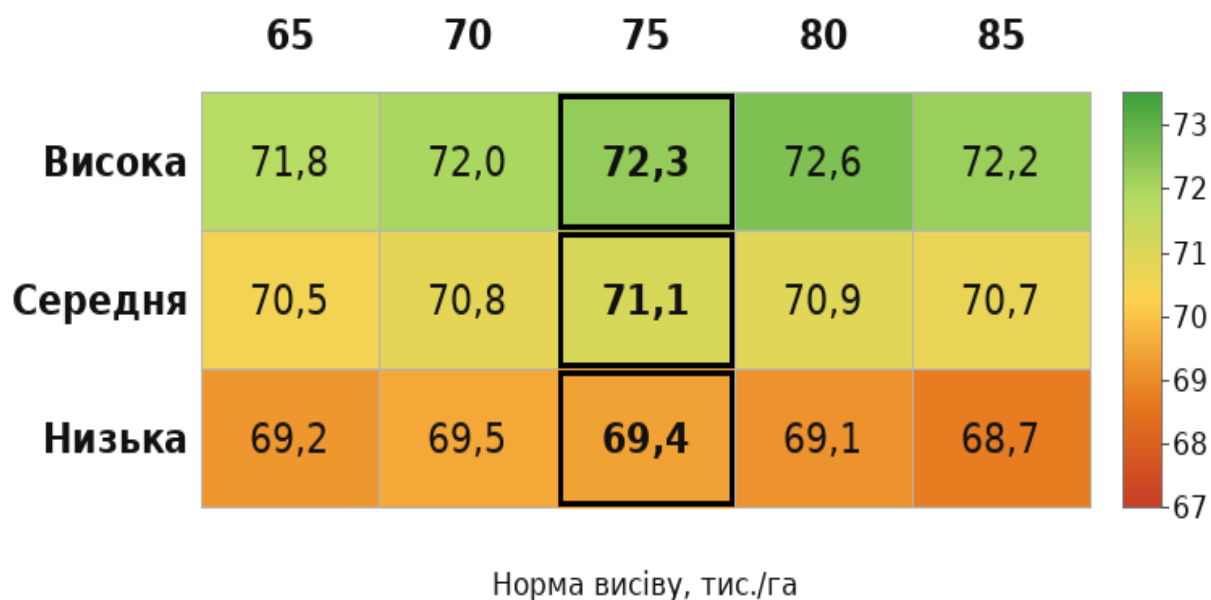


Рис. 4.20. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2023 р.

Відповідно до отриманих результатів (рис. 4.21) у 2024 році загальний вміст крохмалю був нижчим порівняно з іншими роками дослідження. Особливо це помітно у низькопродуктивній зоні продуктивності, де показники місцями знижувалися до 67,3 %. При цьому, навіть у менш сприятливих умовах високопродуктивна зона зберігала стабільно вищий вміст крохмалю. Це свідчить про кращі умови формування зерна у даній частині поля.

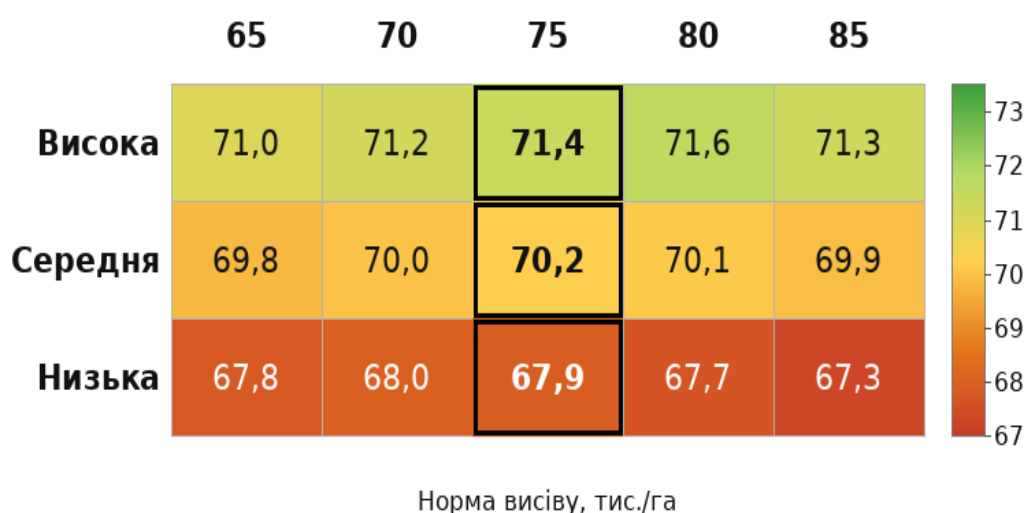


Рис. 4.21. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2024 р.

2025 рік був більш сприятливим для накопичення крохмалю (рис. 4.22). У зоні високої продуктивності показники досягали 73,4 %, що було найвищим результатом серед усіх років досліджень. У середньопродуктивній та низькопродуктивній зонах також спостерігалось певне покращення показників порівняно з 2024 роком.

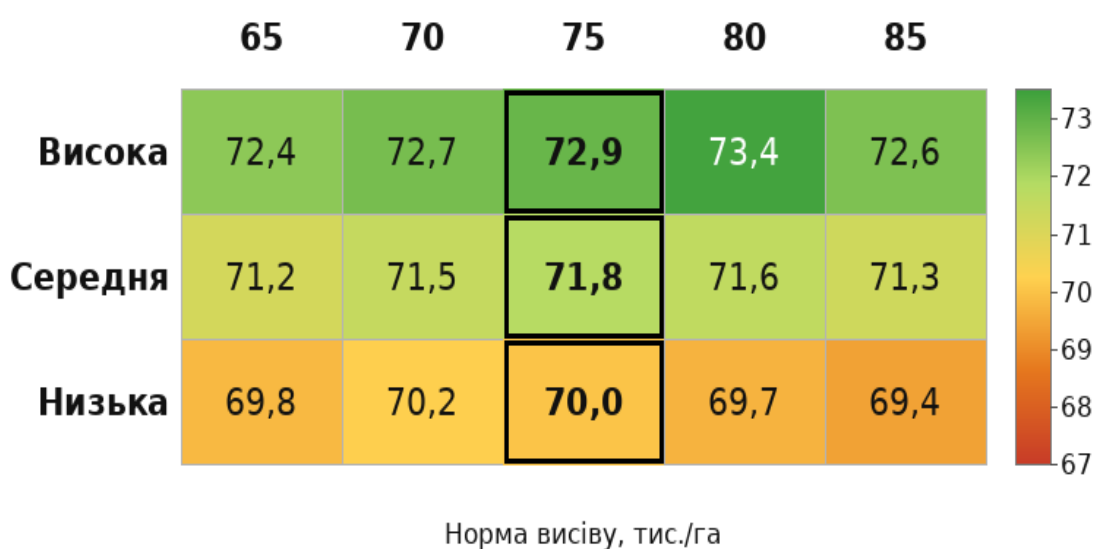


Рис. 4.22. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2025 р.

Усереднені результати за 2023–2025 роки (рис. 4.23), підтверджують загальну тенденцію. Найбільше крохмалю накопичувалося у зерні, сформованому у зоні високої продуктивності, а найменше у низькопродуктивній зоні. Різниця між нормами висіву була відносно невеликою, тому можна зробити висновок, що саме зона продуктивності мала основний вплив на вміст крохмалю в зерні кукурудзи.

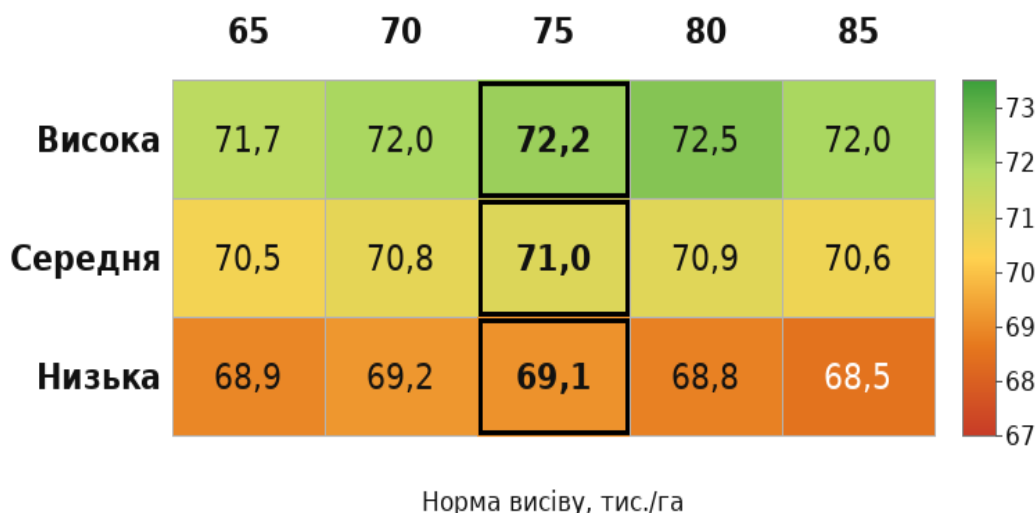


Рис. 4.23. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, середнє за 2023–2025 рр.

Таким чином, вміст крохмалю у зерні кукурудзи формується під впливом комплексу факторів. Wang and Lu (2022) показали, що різні режими удобрення можуть змінювати не лише кількість крохмалю, а й його властивості. Lou et al. (2025) також зазначають, що поєднання органічного та мінерального живлення впливає на структуру крохмалю. Це підтверджує, що якість зерна кукурудзи потрібно розглядати не окремо від умов вирощування, а як результат дії всієї системи агротехнологічних факторів. Вміст жиру у зерні кукурудзи є важливим показником якості врожаю, оскільки олія має харчове та технологічне значення. На формування цього показника впливають як умови вирощування, так і генетичні особливості гібриду. Luo et al. (2023) зазначають, що накопичення жиру в зерні кукурудзи значною мірою контролюється генетично та пов'язане з роботою генів, які відповідають за синтез жирних кислот і олії в зерні. Тому зміна умов вирощування може впливати на вміст

жиру, проте базовий рівень цього показника визначається особливостями конкретного гібриду. Результати дослідження вмісту жирів в зерні кукурудзи залежно від норм висіву та зон продуктивності подано в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10

Вміст жиру у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025
Високопродуктивна	65	4,2	4,3	4,0	4,2
	70	4,1	4,2	3,9	4,1
	75	4,1	4,2	3,9	4,1
	80	4,0	4,1	3,8	4,0
	85	4,1	4,2	3,9	4,1
Середньопродуктивна	65	4,4	4,5	4,2	4,4
	70	4,3	4,4	4,1	4,3
	75	4,3	4,4	4,1	4,3
	80	4,3	4,4	4,1	4,3
	85	4,4	4,5	4,2	4,4
Низькопродуктивна	65	4,7	4,9	4,5	4,7
	70	4,6	4,8	4,4	4,6
	75	4,6	4,8	4,4	4,6
	80	4,7	4,9	4,6	4,7
	85	4,8	5,0	4,7	4,8
<i>Середнє – Високопродуктивна зона</i>		<i>4,1</i>	<i>4,2</i>	<i>3,9</i>	<i>4,1</i>
<i>Середнє – Середньопродуктивна зона</i>		<i>4,3</i>	<i>4,4</i>	<i>4,1</i>	<i>4,3</i>
<i>Середнє – Низькопродуктивна зона</i>		<i>4,7</i>	<i>4,9</i>	<i>4,5</i>	<i>4,7</i>

Отримані результати показують, що найбільший вміст жиру у зерні формувався у низькопродуктивній зоні. У середньому за роки досліджень цей показник становив 4,7 %. У середньопродуктивній зоні продуктивності вміст жиру був нижчим і становив 4,3 %, а у зоні високої продуктивності

найнижчим, лише 4,1 %. Таким чином, простежується чітка тенденція: зі зниженням продуктивності зони вміст жиру у зерні зростає. Вміст жиру у зерні кукурудзи, як і інші якісні показники, залежить не лише від генетичних особливостей гібриду, а й від умов вирощування.

Nieweglowski et al. (2024) встановили, що рівень азотного живлення та застосування біостимуляторів можуть змінювати хімічний склад зерна кукурудзи. Зокрема, автори відмічають, що азотне удобрення сприяло зменшенню вмісту крохмалю та підвищенню вмісту жиру в зерні.

Якщо аналізувати вплив норми висіву, то зміни були не такими помітними. У високо- та середньопродуктивній зонах продуктивності показники між варіантами майже не відрізнялися. Найбільші зміни спостерігалися у низькопродуктивній зоні продуктивності, де за збільшення норми висіву до 85 тис./га вміст жиру зростає до 4,8 % (табл. 4.10). Загалом, можна сказати, що норма висіву мала слабший вплив на вміст жиру порівняно із самою зоною продуктивності поля. Незначні коливання вмісту жиру між нормами висіву можуть пояснюватися тим, що ця ознака значною мірою контролюється генетично.

Zhang et al. (2023) встановили, що більша частина мінливості вмісту олії у зерні кукурудзи пов'язана з генетичними факторами. Подібні висновки роблять і Fang et al. (2021) які показали, що показники, пов'язані з олійністю зерна, мають складну генетичну основу. Саме тому, вплив агротехнічних прийомів на вміст жиру часто є менш помітним порівняно з впливом генотипу рослин.

Результати досліджень свідчать, що між роками досліджень спостерігалася певна різниця у показниках. Найвищі показники вмісту жиру були отримані у 2024 році. У низькопродуктивній зоні продуктивності показник досягав 4,9 %. У 2025 році, навпаки, вміст жиру був найнижчим у всіх зонах продуктивності. 2023 рік займав проміжне положення між ними. Це свідчить про те, що погодні умови року також впливали на формування вмісту жиру у зерні кукурудзи.

Побічна продукція кукурудзи є важливою складовою загальної біологічної продуктивності посівів. Окрім формування зерна, рослини кукурудзи накопичують значну кількість органічної маси у вигляді стебел, листків та стрижнів початків. Саме тому, оцінка якісних показників побічної продукції має важливе значення для розуміння ефективності використання рослинами елементів живлення та формування загальної біомаси. Одними з основних показників якості побічної продукції є вміст азоту та сухої речовини. Вміст азоту характеризує рівень накопичення поживних речовин у вегетативній масі рослин, а показник сухої речовини дозволяє оцінити інтенсивність формування органічної маси та ступінь досягання рослин. На ці показники можуть впливати як умови року, так і зона продуктивності поля та норма висіву рослин. Отримані результати (табл. 4.11) показують, що найбільший вміст сухої речовини у побічній продукції формувалася у зоні високої продуктивності. У середньому показники тут становили близько 30–31 %, тоді як у низькопродуктивній зоні продуктивності вони переважно були на рівні 22–24 %. Це свідчить про те, що рослини у високопродуктивній зоні швидше накопичували вегетативну масу та формували більш розвинений листостебловий апарат. Вплив норми висіву був менш стабільним. У високій зоні найкращий результат спостерігався за норми 70 тис./га, де середній вміст сухої речовини становив 31,3 %. У середньопродуктивній та низькопродуктивній зонах чіткої закономірності між нормами висіву практично не спостерігалось. Це може свідчити про те, що на ранніх етапах розвитку кукурудзи зона продуктивності поля сильніше впливала на формування сухої речовини, ніж сама густота стояння рослин. Подібні результати отримали Cai et al. (2023), які зазначають, що накопичення сухої речовини у кукурудзи значною мірою залежить від умов вологозабезпечення та загального рівня розвитку рослин. Автори підкреслюють, що стресові умови можуть змінювати розподіл сухої речовини між органами рослини.

Дані таблиці 4.12 показують, що найбільший вміст азоту у побічній продукції спостерігався у зоні високої продуктивності. У середньому показник

тут становив близько 4,5–4,6 %, тоді як у зоні низької продуктивності він був нижчим і переважно знаходився на рівні 3,9–4,0 %.

Таблиця 4.11

Вміст сухої речовини у рослинах кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу V2–V4 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Суха речовина, %				
Високопродуктивна	65	32,3	27,6	29,9	29,93	–0,43
	70	33,5	29,4	31,0	31,30	+0,93
	75	32,6	28,3	30,2	30,37	–
	80	30,5	29,7	30,0	30,07	–0,30
	85	31,4	28,6	29,5	29,83	–0,53
Середньопродуктивна	65	29,8	26,2	28,0	28,00	+1,83
	70	28,8	26,6	27,7	27,70	+1,53
	75	27,2	25,1	26,2	26,17	–
	80	29,4	25,1	27,3	27,27	+1,10
	85	27,5	26,3	26,9	26,90	+0,73
Низькопродуктивна	65	25,7	20,9	23,3	23,30	+0,53
	70	25,5	22,0	24,0	23,83	+1,07
	75	24,6	20,7	23,0	22,77	–
	80	24,6	20,6	23,2	22,80	+0,03
	85	25,6	21,8	23,7	23,70	+0,93
Примітка. Курсивом виділено контрольний варіант (75 тис./га) у кожній зоні. Δ – відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

Це свідчить про кращу забезпеченість рослин азотом у високопродуктивній зоні поля. На відміну від сухої речовини, показники азоту між нормами висіву змінювалися не дуже сильно. У більшості випадків різниця між варіантами була мінімальною. Це говорить про те, що у фазу V2–V4 рослини ще не створювали настільки сильну конкуренцію між собою, щоб суттєво вплинути на накопичення азоту у вегетативній масі.

Galindo et al. (2021) також відзначають, що накопичення азоту у вегетативній масі кукурудзи тісно пов'язане із загальною продуктивністю рослин та доступністю елементів живлення у ґрунті.

Таблиця 4.12

Вміст азоту у рослинах кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу V2–V4 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Азот, %				
Високопродуктивна	65	4,59	4,60	4,62	4,60	+0,09
	70	4,71	4,22	4,48	4,47	−0,03
	75	4,62	4,40	4,50	4,50	—
	80	4,68	4,47	4,56	4,57	+0,06
	85	4,82	4,26	4,53	4,53	+0,03
Середньопродуктивна	65	4,70	4,26	4,48	4,48	+0,25
	70	4,31	3,98	4,12	4,13	−0,09
	75	4,45	4,01	4,23	4,23	—
	80	4,40	4,12	4,26	4,26	+0,03
	85	4,31	4,30	4,29	4,30	+0,07
Низькопродуктивна	65	3,99	3,82	3,97	3,92	−0,09
	70	4,31	3,54	3,88	3,91	−0,10
	75	4,35	3,75	3,95	4,01	—
	80	4,12	3,64	3,92	3,89	−0,12
	85	4,36	3,69	3,98	4,01	−0,00
Δ – відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

У фазу R1 різниця між зонами продуктивності по вмісту сухої речовини у листках стала ще більш помітною (табл. 4.13). У високій зоні продуктивності середні показники перевищували 40 %, тоді як у низькопродуктивній зоні вони переважно знаходилися на рівні 34–36 %. Це свідчить про те, що рослини у високопродуктивній зоні формували більш потужний асиміляційний апарат та

активніше накопичували органічну масу. Зі збільшенням норми висіву вміст сухої речовини у листках поступово знижувався майже у всіх зонах продуктивності. Найкращі результати переважно спостерігалися за норм 65–70 тис./га, а за загушення до 85 тис./га показники були найнижчими. Це може пояснюватися посиленням конкуренції між рослинами за світло та вологу.

Yan et al. (2023) зазначають, що при дефіциті води та підвищеній конкуренції між рослинами змінюється розподіл біомаси, а накопичення сухої речовини у листках знижується.

У фазу R1 вміст азоту у листках був найбільшим у зоні високої продуктивності, дані подано у таблиці 4.14. У середньому показники становили близько 2,8–3,1 %, тоді як у низькопродуктивній зоні вони знижувалися до 2,4–2,6 %. Це свідчить про те, що рослини у високопродуктивній зоні довше зберігали активний фізіологічний стан листового апарату. Зі збільшенням норми висіву вміст азоту у листках поступово знижувався. Найвищі показники переважно спостерігалися за норми 65 тис./га, а найнижчі за 85 тис./га. Це може бути пов'язано із посиленням конкуренції за елементи живлення за загушення посівів.

Таблиця 4.13

Вміст сухої речовини у рослинах кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу R1
залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Суха речовина, %				
Високопродуктивна	65	42,2	40,6	41,2	41,33	+1,03
	70	41,7	40,1	40,8	40,87	+0,57
	75	41,2	39,5	40,2	40,30	—
	80	40,7	39,1	39,8	39,87	−0,43
	85	40,1	38,5	39,3	39,30	−1,00
Середньопродуктивна	65	40,1	38,4	38,9	39,13	+1,00
	70	39,6	37,9	38,5	38,67	+0,53
	75	39,1	37,3	38,0	38,13	—
	80	38,6	36,8	37,6	37,67	−0,47
	85	38,1	36,2	37,1	37,13	−1,00
Низькопродуктивна	65	37,2	35,6	36,4	36,40	+0,93
	70	36,8	35,1	36,0	35,97	+0,50
	75	36,3	34,5	35,6	35,47	—
	80	35,8	34,0	35,1	34,97	−0,50
	85	35,3	33,4	34,6	34,43	−1,03
Δ – відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

Liu et al. (2023) також показали, що рівень накопичення азоту у рослинах кукурудзи значною мірою залежить від умов живлення та конкуренції між рослинами у посівах.

Таблиця 4.14

Вміст азоту у листі кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу R1 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Азот, %				
Високопродуктивна	65	3,15	3,03	3,08	3,08	+0,16
	70	3,07	2,95	3,00	3,00	+0,08
	75	2,98	2,86	2,92	2,92	—
	80	2,92	2,78	2,86	2,85	−0,06
	85	2,85	2,71	2,79	2,78	−0,13
Середньопродуктивна	65	2,93	2,80	2,86	2,86	+0,12
	70	2,86	2,73	2,79	2,79	+0,05
	75	2,80	2,67	2,74	2,737	—
	80	2,74	2,61	2,68	2,67	−0,06
	85	2,67	2,55	2,61	2,61	−0,12
Низькопродуктивна	65	2,74	2,60	2,66	2,66	+0,12
	70	2,67	2,54	2,59	2,60	+0,05
	75	2,61	2,48	2,54	2,54	—
	80	2,55	2,43	2,49	2,49	−0,05
	85	2,49	2,37	2,43	2,43	−0,11
Примітка. Δ –відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

На рисунку 4.24 показано зміну вмісту сухої речовини у побічній продукції кукурудзи залежно від норми висіву та зони продуктивності поля. У фазу V2–V4 найвищі показники сухої речовини формувалися у зоні високої продуктивності. Тут середні значення знаходилися на рівні близько 30–31%, тоді як у низькопродуктивній зоні вони не перевищували 24 %. Різниця між нормами висіву була відносно невеликою. У середньопродуктивній та низькопродуктивній зонах спостерігалися лише незначні коливання показників між варіантами дослідів. У фазу R1 різниця між зонами стала ще

помітнішою. У зоні високої продуктивності вміст сухої речовини перевищував 39 %, а у низькопродуктивній зоні поступово знижувався до 34–35 %. Спостерігається загальну тенденцію до зменшення вмісту сухої речовини за збільшення норми висіву. Особливо чітко це проявилось у високо- та середньопродуктивній зонах продуктивності. Це свідчить про те, що за загущення посівів рослини формували менш розвинену вегетативну масу через сильнішу конкуренцію між собою.

На рисунку 4.25 наведено динаміку вмісту азоту у побічній продукції кукурудзи. У фазу R1 найвищі показники вмісту азоту спостерігалися у зоні високої продуктивності, де вони знаходилися в межах 2,8–3,1 %. У середньопродуктивній зоні значення були дещо нижчими, а у низькопродуктивній зоні – найменшими. Зі збільшенням норми висіву вміст азоту поступово знижувався в усіх зонах продуктивності. Інша ситуація спостерігалася у фазу V2–V4. Тут зміни між нормами висіву були менш вираженими, а самі показники азоту залишалися відносно стабільними. Найвищий вміст азоту також формувався у зоні високої продуктивності. Це свідчить про те, що на ранніх етапах розвитку рослин основний вплив на накопичення азоту мала саме зона продуктивності поля, а не густота стояння рослин.

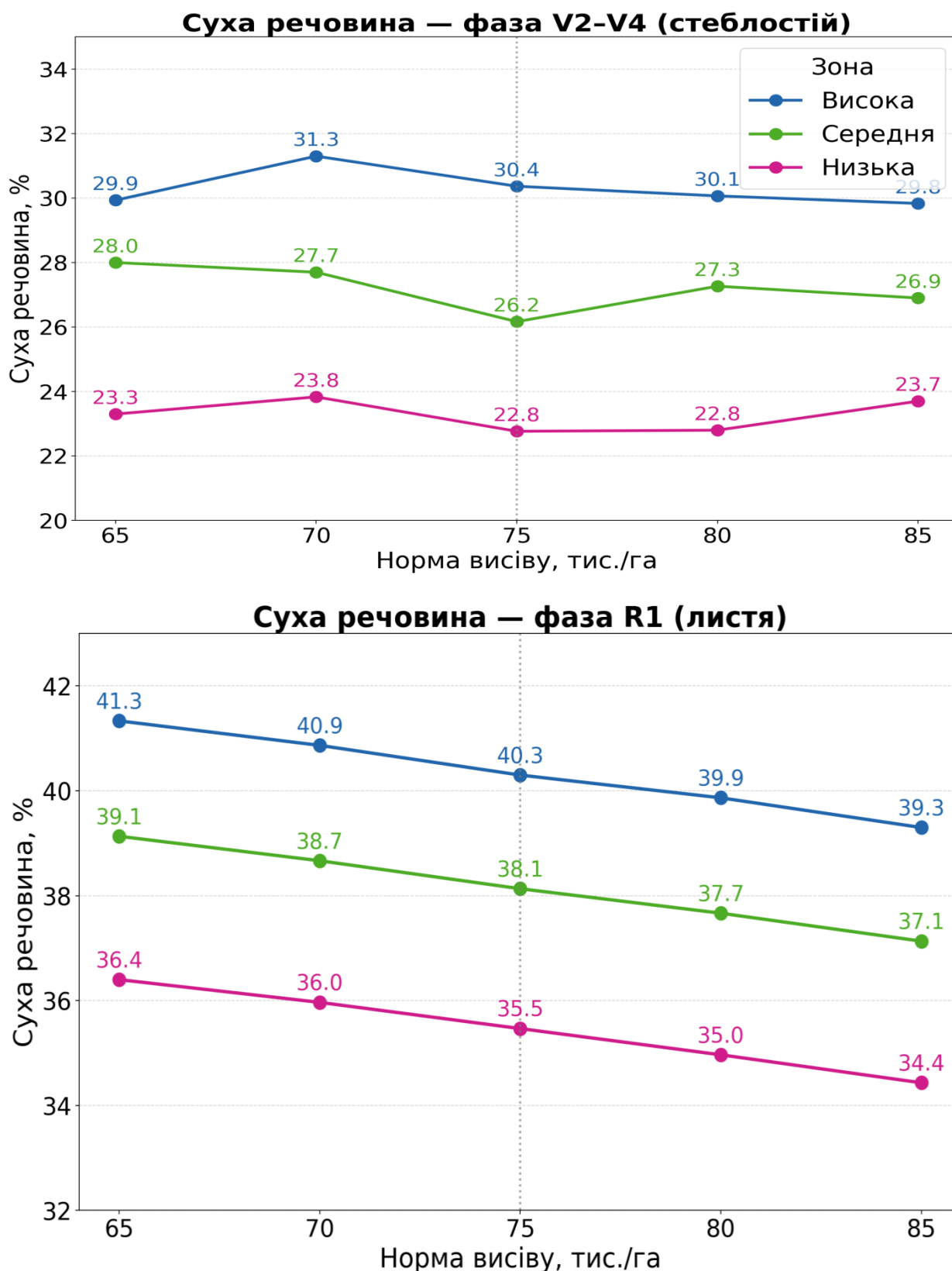


Рис. 4.24. Вміст сухої речовини в побічній продукції кукурудзи ДКС 3939 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля у фазах V2–V4 і R1 (середнє за 2023–2025 рр.)

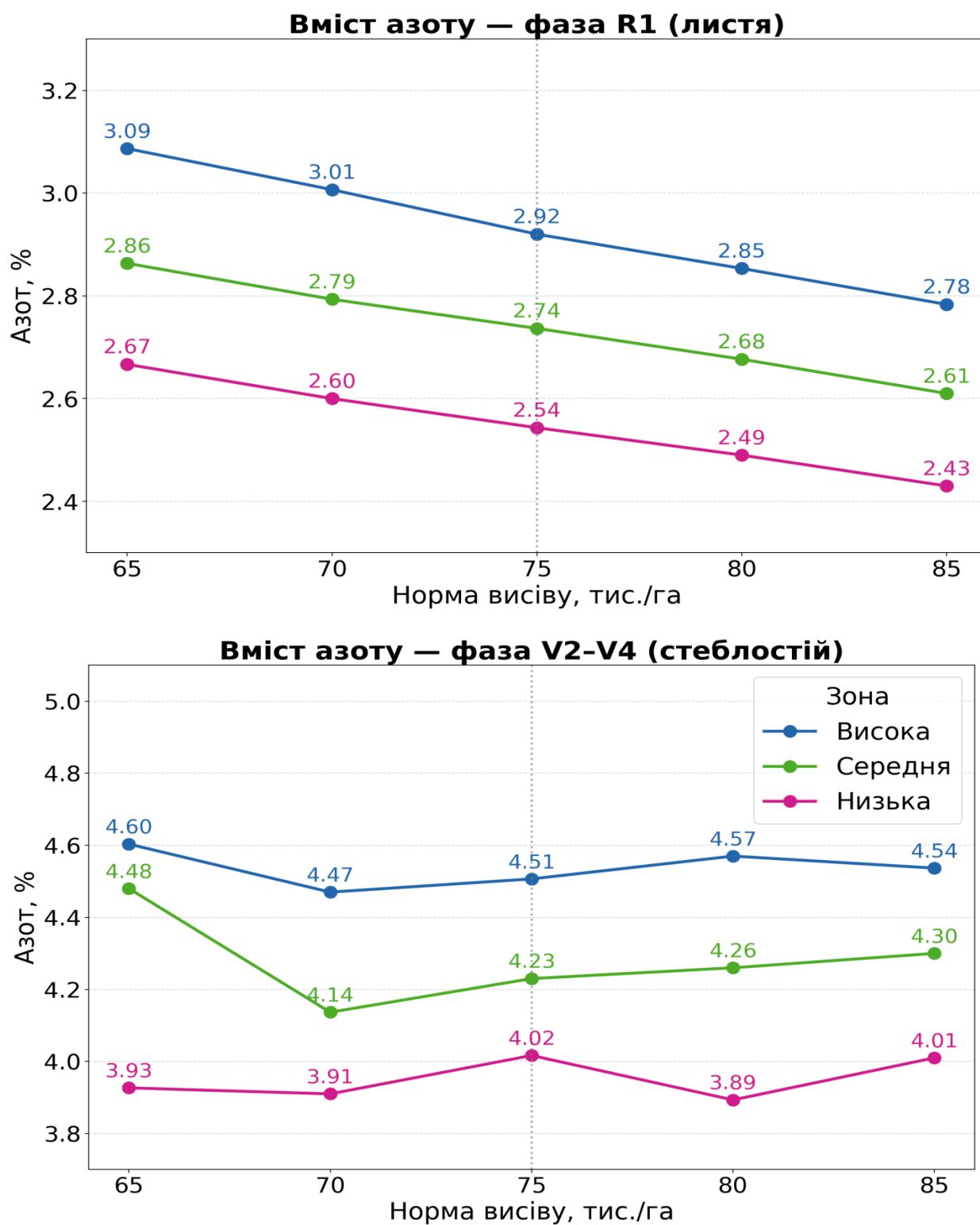


Рис. 4.25. Вміст азоту в побічній продукції кукурудзи ДКС 3939 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля у фазах V2–V4 і R1, % (середнє за 2023–2025 рр.)

Вологість зерна за збирання є одним із ключових технологічних показників виробництва кукурудзи. Він безпосередньо визначає витрати на сушіння, якість зберігання і кінцеву собівартість продукції. У нашому досліді збирання проводилось в одну дату для всіх варіантів дослідження. Це зробило вологість зерна індикатором сукупного впливу зони продуктивності і норми висіву на темп дозрівання та підсихання зерна. Результати трирічних досліджень демонструють чітку диференціацію вологості зерна між варіантами досліді і висвітлені в таблиці 4.4.

Відповідно до отриманих даних, найвища вологість зерна спостерігалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. При цьому ми також спостерігали лінійну залежність вологості зерна від норми висіву. По мірі збільшення норми висіву вологість зерна знижувалася, а по мірі зменшення норми висіву зростала. У високопродуктивній зоні найбільша вологість зерна була зафіксована за норми 65 тис./га і становила 25,6 %. Найнижча вологість фіксувалася за норми 85 тис./га і становила 23,7 %. У середньопродуктивній зоні контрольний варіант досліді мав вологість зерна 23,7 %. Норма висіву 65 тис./га мала найвищий показник вологості, а саме 25,1%. Найбільша норма висіву 85 тис./га мала найнижчий показник вологості у даній зоні, який становив 22,5 %. У низькопродуктивній зоні вологість зерна була найнижчою. У контрольному варіанті вона становила 20,6 %, у варіанті з нормою висіву 65 тис./га вологість становила 21,2 %, а за найбільшої нормі висіву 85 тис./га вона становила 20,0 % (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Вологість зерна кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) за збирання залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Високої	65	28,2	22,0	26,6	25,6
	70	27,8	21,8	26,0	25,2
	75	27,5	21,2	25,4	24,7
	80	27,1	20,8	24,7	24,2
	85	26,7	20,4	24,1	23,7
Середньої	65	27,6	21,7	25,9	25,1
	70	27,2	21,3	25,1	24,5
	75	26,6	20,5	24,0	23,7
	80	26,1	19,9	23,1	23,0
	85	25,6	19,5	22,3	22,5
Низької	65	24,8	18,0	20,8	21,2
	70	24,6	17,6	20,3	20,8
	75	24,3	17,4	20,1	20,6
	80	24,1	17,0	19,9	20,3
	85	23,8	16,6	19,5	20,0
<i>НІР₀₅ фактор А (зона)</i>		<i>0,38</i>	<i>0,31</i>	<i>0,29</i>	—
<i>НІР₀₅ фактор Б (норма висіву)</i>		<i>0,21</i>	<i>0,18</i>	<i>0,17</i>	—
<i>НІР₀₅ взаємодія А×Б</i>		<i>0,37</i>	<i>0,31</i>	<i>0,29</i>	—

Зона продуктивності виявилась найпотужнішим фактором диференціації вологості зерна при збиранні. Середня вологість зерна за три роки у високопродуктивній зоні (контрольна норма 75 тис/га) становила 24,7 %, у

середньопродуктивній – 23,7 %, у низькопродуктивній – лише 20,6 %. Різниця між крайніми зонами за однакової норми висіву становила 4,1 в.п. – показник, що суттєво перевищує HP_{05} для фактора А (0,29–0,38) і є статистично достовірним у всі роки досліджень. Механізм зональної диференціації вологості зерна безпосередньо пов'язаний із закономірностями фенологічного розвитку. Рослини у низькопродуктивній зоні внаслідок drought escape проходили фазу R5 на 14–19 діб раніше ніж у високопродуктивній зоні. Це забезпечувало значно більше часу для природного підсихання зерна до єдиної дати збирання.

Li et al. (2021, Crop Science) показали, що мінливість вологості зерна між середовищами за фізіологічної стиглості є суттєвою. Вона визначається передусім термічними умовами і тривалістю підперіоду від R5 до збирання. А не лише генотиповими характеристиками гібриду. Це підтверджує, що виявлені нами зональні відмінності вологості є закономірним наслідком різної тривалості періоду природної дегідратації між зонами, а не випадковою варіацією.

На рисунку 4.6 зображено теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2023 році. На рисунку добре помітно, що найбільша вологість зерна формувалася у зоні високої продуктивності, а найменша – у низькопродуктивній зоні. Також чітко простежується тенденція до поступового зниження вологості зерна зі збільшенням норми висіву. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 28,2 % за норми 65 тис./га до 26,7 % за норми 85 тис./га. У середньопродуктивній зоні аналогічна тенденція спостерігалася в межах від 27,6 % до 25,6 %, а у низькопродуктивній зоні від 24,8 % до 23,8 %. Контрольний варіант із нормою висіву 75 тис./га, який виділено рамкою, займав проміжне положення між зрідженими та загущеними варіантами дослідів.

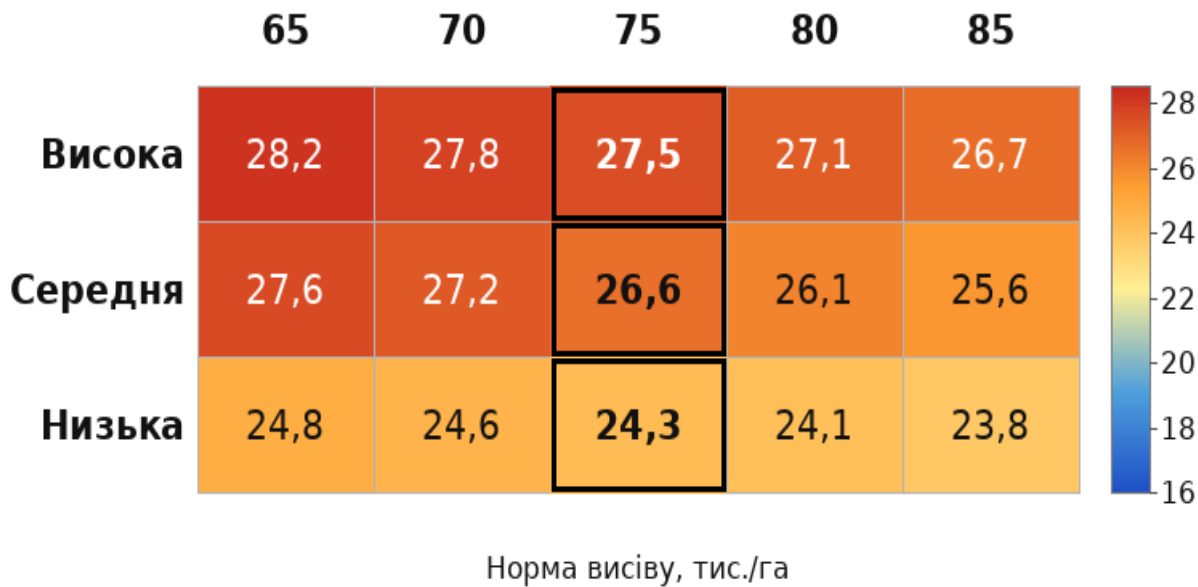


Рис. 4.6. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2023 р.

На рисунку 4.7 зображено теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2024 році. Порівняно з 2023 роком добре помітно загальне зниження вологості зерна у всіх зонах продуктивності, що пояснюється більш посушливими умовами року. Як і в попередньому році, найбільша вологість зерна спостерігалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 22,0 % за норми 65 тис./га до 20,4 % за норми 85 тис./га. У середньопродуктивній зоні показники становили від 21,7 % до 19,5 %, а у низькопродуктивній зоні від 18,0 % до 16,6 %.

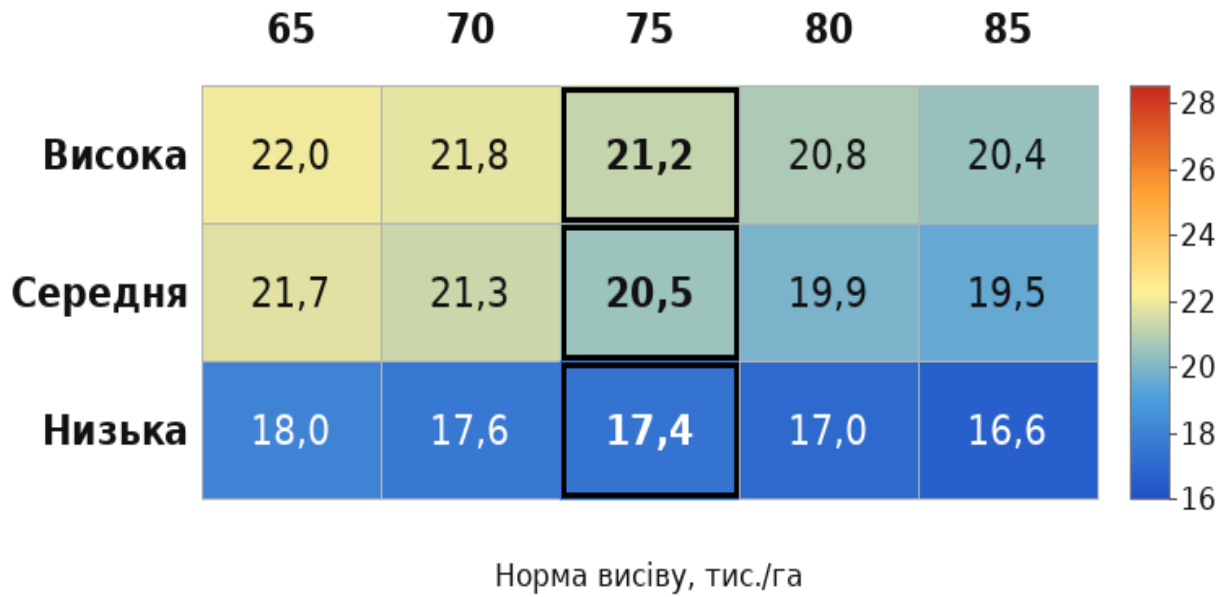


Рис. 4.7. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2024 р.

На рисунку 4.8 зображено теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2025 році. Отримані результати підтверджують закономірності, які спостерігалися і в попередні роки досліджень. Найвища вологість зерна формувалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 26,6 % за норми 65 тис./га до 24,1 % за норми 85 тис./га. У середньопродуктивній зоні показники становили від 25,9 % до 22,3 %, а у низькопродуктивній зоні від 20,8 % до 19,5 %.

На рисунку 4.9 зображено усереднену за 2023–2025 роки теплову карту вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву. Отримані результати підтверджують загальну закономірність, яка спостерігалася у всі роки досліджень. Найвища вологість зерна формувалася у зоні високої продуктивності, а найнижча у низькопродуктивній зоні. У зоні високої продуктивності вологість зерна змінювалася від 25,6 % за норми 65 тис./га до 23,7 % за норми 85 тис./га. У зоні середньої продуктивності

показники становили від 25,1 % до 22,5 %, а у низькопродуктивній зоні від 21,2 % до 20,0 %.

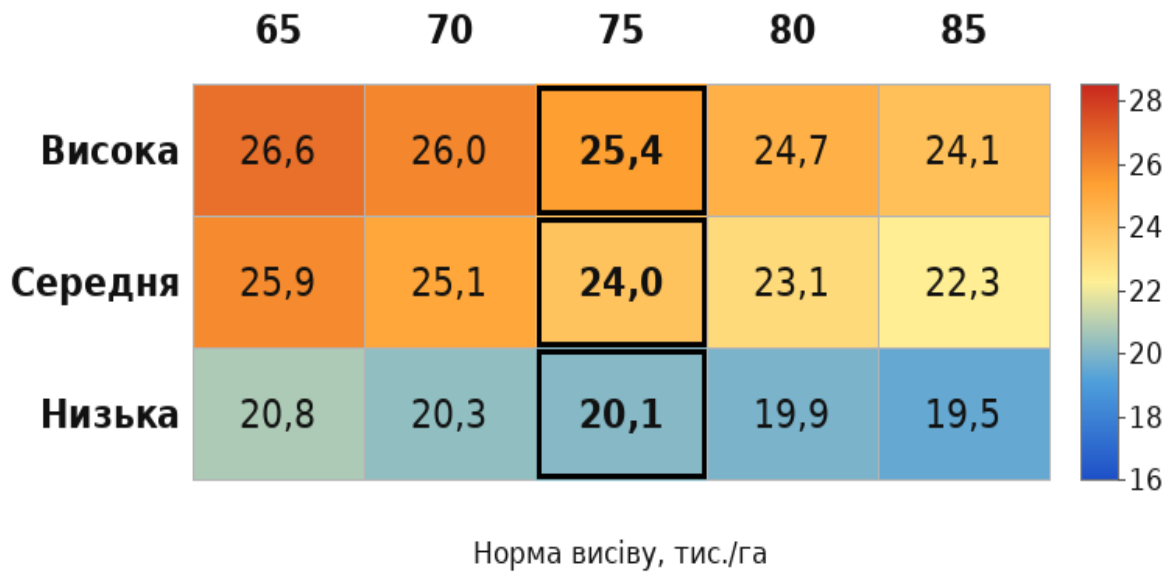


Рис. 4.8. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2025 р.

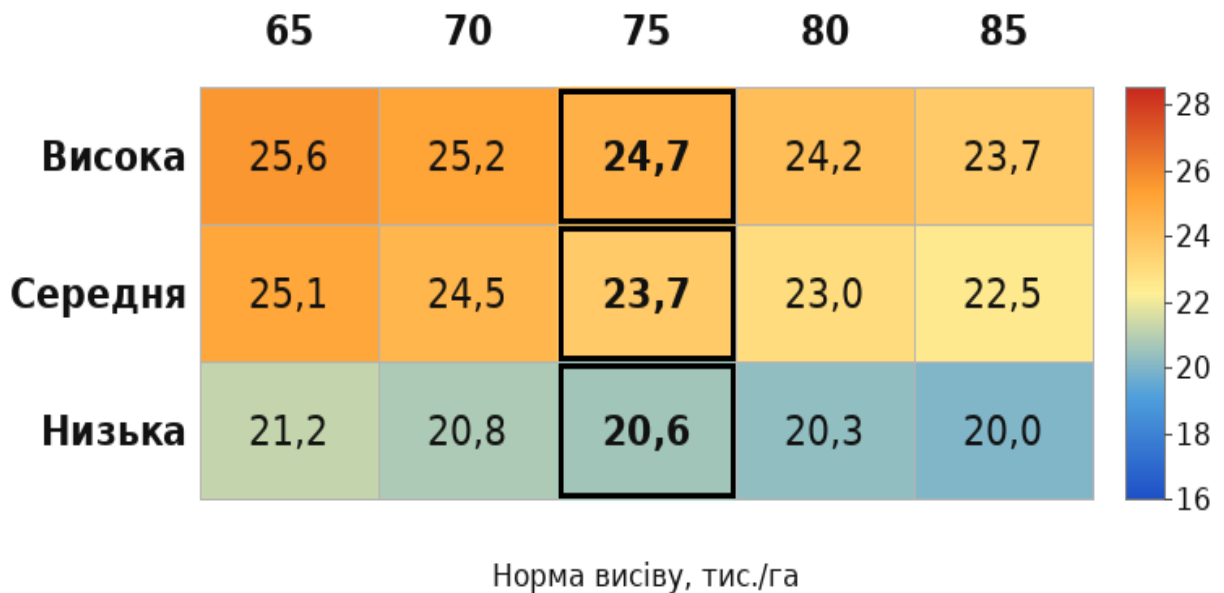


Рис. 4.9. Теплова карта вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від зони продуктивності та норми висіву, середнє за 2023–2025 рр.

Норма висіву чинила статистично достовірний, але менш виражений вплив на вологість зерна порівняно із зоною продуктивності. За збільшення

норми від 65 до 85 тис./га вологість зерна знижувалась у всіх зонах і роках досліджень. У середньому по зонах і роках різниця між нормами 65 і 85 тис./га становила 0,9 – 1,1 в.п. – достовірна на рівні НР₀₅ для фактора Б (0,17–0,21).

На рисунку 4.10 зображено динаміку вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у високопродуктивній зоні в роки досліджень. Отримані результати показують чітку тенденцію до поступового зниження вологості зерна зі збільшенням норми висіву у всі роки досліджень. Найвищі показники вологості зерна спостерігалися у 2023 році. За норми 65 тис./га вологість становила близько 28,8 %, а за норми 85 тис./га знижувалася до 27,2 %.

У 2024 році, який характеризувався більш посушливими умовами, показники вологості були найнижчими і змінювалися в межах від 22,5 % до 20,9 %. У 2025 році показники займали проміжне положення між попередніми роками. Середні значення за роки досліджень також підтверджують стабільне зниження вологості зерна зі збільшенням густоти стояння рослин. Це свідчить про те, що підвищення норми висіву у високопродуктивній зоні сприяло швидшій втраті вологи зерном перед збиранням.

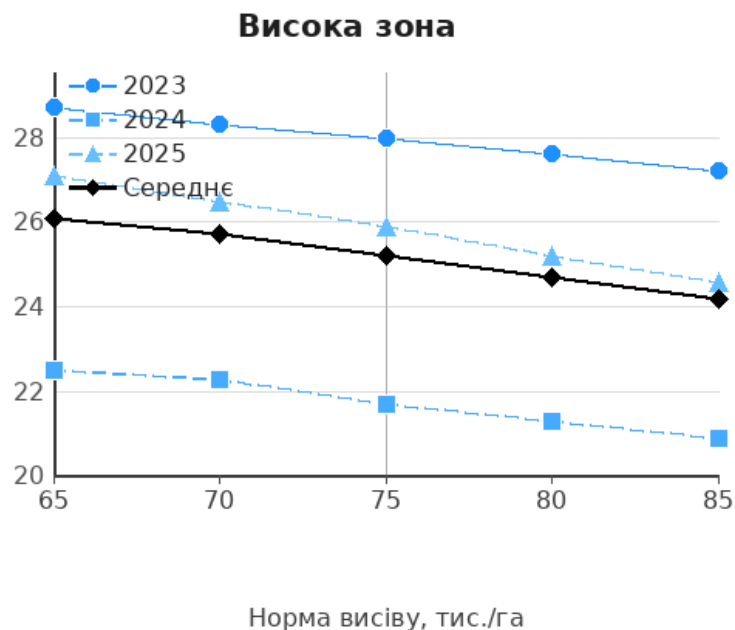


Рис. 4.10. Динаміка вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у високопродуктивній зоні в роки досліджень

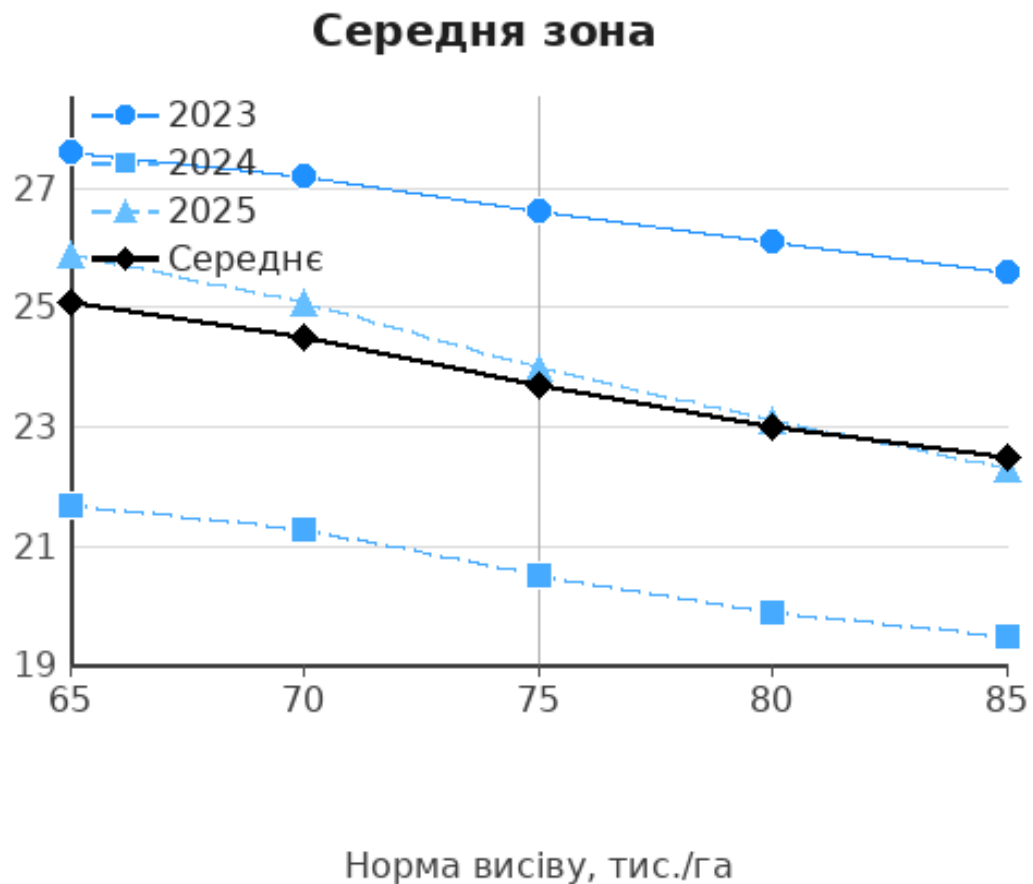


Рис. 4.11. Динаміка вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у середньопродуктивній зоні в роки досліджень

На рисунку 4.11 зображено динаміку вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у середньопродуктивній зоні в роки досліджень. Отримані результати показують, що в усі роки досліджень зі збільшенням норми висіву вологість зерна поступово знижувалася

Найвищі показники вологості зерна були характерні для 2023 року. За норми 65 тис./га вологість становила близько 27,6 %, а за норми 85 тис./га знижувалася до 25,5 %. У 2024 році спостерігалися найнижчі показники вологості зерна, які змінювалися від 21,7 % до 19,5 %. У 2025 році значення займали проміжне положення між попередніми роками.

На рисунку 4.12 зображено динаміку вологості зерна кукурудзи гібриду ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у низькопродуктивній зоні в роки досліджень. Отримані результати показують, що в усі роки досліджень у

низькопродуктивній зоні спостерігалася найнижча вологість зерна порівняно з іншими зонами продуктивності. Також, як і в попередніх зонах, простежувалася тенденція до поступового зниження вологості зерна зі збільшенням норми висіву. У 2023 році вологість зерна змінювалася від 25,2 % за норми 65 тис./га до 24,2 % за норми 85 тис./га. У 2024 році показники були найнижчими та становили від 18,5 % до 17,0 %, а у 2025 році від 21,2 % до 20,0 %.

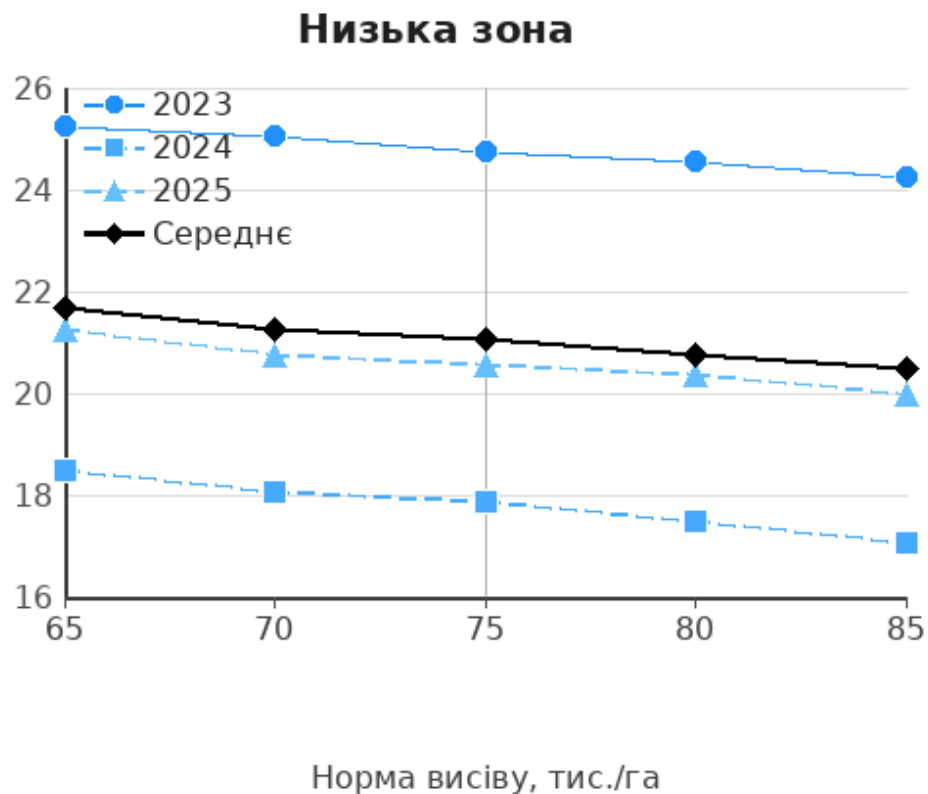


Рис. 4.12. Динаміка вологості зерна кукурудзи ДКС 3939 за збирання залежно від норми висіву у низькопродуктивній зоні в роки досліджень

Механізм впливу норми висіву на вологість зерна за збирання подвійним. По-перше, загущений посів прискорює проходження фенологічних фаз. Зокрема періоду V6–VT і генеративного періоду. Це зміщує дату настання R5 на більш ранні строки і збільшує тривалість природної дегідратації до дати збирання. По-друге, загущення змінює мікрокліматичні умови в посіві – підвищує відносну вологість повітря в міжрядному просторі і знижує

швидкість вітру, що теоретично могло б сповільнювати дегідратацію. Однак перший ефект у наших умовах домінував: вологість зерна за вищих норм була нижчою.

Guo et al. (2022) у прямому досліді з різними густотами підтвердили, що підвищення густоти посіву прискорює дегідратацію зерна після фізіологічної стиглості через вищу транспірацію і прискорений перехід до деградації листового апарату, що посилює відтік води від зерна. HR_{05} для взаємодії зони і норми висіву становило 0,29–0,37 в.п.б Це свідчить про статистично достовірний ефект взаємодії у всі роки досліджень.

Li et al. (2021, Journal of Integrative Agriculture) підкреслюють, що практичні наслідки вологості зерна за збирання для механізованого збирання і витрат на сушіння є одним із ключових критеріїв оптимізації строків і технології збирання кукурудзи.

Yang et al. (2025) у дослідженні з гібридами різних груп стиглості показали, що темп дегідратації зерна після R5 є гібрид специфічним. Також він суттєво залежить від температури і вологості повітря в підперіод збирання. А зміна цих умов між роками може перекривати за масштабом агротехнічні ефекти норми висіву. Це і спостерігається у наших даних.

Li et al. (2021, AgroNomy Journal) у регіональному аналізі моделі прогнозу вологості зерна до збирання встановили, що просторова варіабельність вологості між ділянками поля корелює з варіабельністю термічних умов і водного режиму зон. Тобто внутрішньопольова диференціація вологості зерна є закономірним відображенням зональної неоднорідності поля. Це підтверджує, що виявлена нами різниця вологості між зонами є стійкою характеристикою поля, а не ситуативним явищем окремого сезону.

Вміст білку у зерні кукурудзи є ключовим показником поживної цінності зерна і важливим критерієм його технологічної якості. На відміну від більшості морфологічних і продуктивних показників, вміст білку часто змінюється у напрямку, протилежному до врожайності. Результати трирічних

досліджень демонструють виражену диференціацію вмісту білку між зонами продуктивності та певну залежність від норми висіву. У таблиці 4.5 подано результати аналізу зерна кукурудзи на вміст білку залежно від норм висіву та зони продуктивності поля. Дані свідчать про те, що існує залежність між зоною продуктивності і вона більш виражена.

Таблиця 4.5.

Вміст білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Високопродуктивна	65	8,4	8,6	8,2	8,4
	70	8,3	8,5	8,1	8,3
	75	8,2	8,4	8,0	8,2
	80	8,1	8,3	7,8	8,1
	85	8,2	8,4	8,1	8,2
	Середнє по зоні	8,2	8,4	8,0	8,2
Середньопродуктивна	65	8,8	9,0	8,5	8,8
	70	8,7	8,9	8,4	8,7
	75	8,6	8,8	8,3	8,6
	80	8,6	8,8	8,4	8,6
	85	8,7	8,9	8,5	8,7
	Середнє по зоні	8,7	8,9	8,4	8,7
Низькопродуктивна	65	9,2	9,7	9,0	9,3
	70	9,1	9,6	8,8	9,2
	75	9,1	9,6	8,9	9,2
	80	9,3	9,8	9,1	9,4
	85	9,5	10,0	9,2	9,6
	Середнє по зоні	9,2	9,7	9,0	9,3

Зона продуктивності виявилась найбільш потужним фактором диференціації вмісту білку у зерні. Середній вміст білку за три роки у високопродуктивній зоні (контрольна норма 75 тис./га) становив 8,2 %, у середньопродуктивній – 8,6 %, у низькопродуктивній – 9,2 %. Таким чином, зі зниженням продуктивності зони вміст білку закономірно зростає. Різниця між крайніми зонами за контрольної норми становила 1,0 в. п. Ця закономірність є прямим відображенням ефекту розбавлення білку. У високопродуктивній зоні рослини формують більшу масу зерна з вищим вмістом крохмалю. Це призводить до відносного зниження концентрації білкових фракцій. У низькопродуктивній зоні, де врожайність суттєво нижча, наприклад 7,41 т/га проти 10,67 т/га у високій зоні, синтез крохмалю обмежений стресовими умовами. В той час, як накопичення азотовмісних сполук є відносно менш чутливим до дефіциту ресурсів.

Correndo et al. (2021) підтверджують, що дефіцит вологи в генеративний підперіод призводить до порушення балансу між накопиченням крохмалю і білку у зерні на користь білкових фракцій. Саме цей механізм і реалізується у низькопродуктивній зоні нашого дослідження де водний стрес є системним явищем. Залежність вмісту білку від норми висіву виявилась нелінійною і різною за характером у різних зонах продуктивності. У високопродуктивній зоні мінімальний вміст білку зафіксовано за норм 80 тис./га. За підвищення норми до 85 тис./га вміст білку незначно зростає до 8,2 %. Тобто у цій зоні вплив норми висіву на вміст білку є мінімальним.

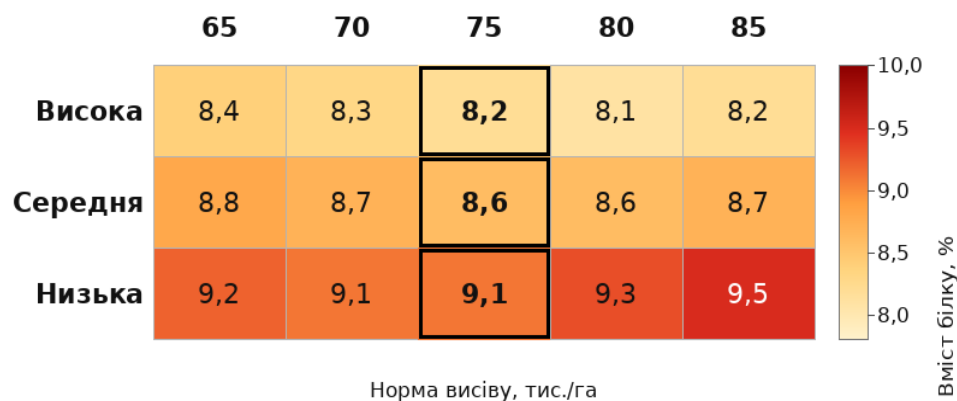
KOnuskan et al. (2022) у досліді з густотою і якісними показниками зерна кукурудзи встановили, що за помірних густот в умовах достатнього ресурсного забезпечення зміни вмісту білку між варіантами густоти є несуттєвими. Вирішальну роль відіграє забезпечення рослин азотом на одиницю біомаси. У середньопродуктивній зоні ситуація змінюється. Вміст білку за норм 65–70 тис./га становив 8,8 і 8,7 %, відповідно. За норм 75–80 тис./га (8,6%) знижувався до мінімуму і незначно зростає до 8,7% за норми 85 тис./га. Такий параболічний характер залежності із мінімумом за контрольних норм

узгоджується з даними Yan et al. (2025, які показали, що за оптимальної густоти посіву рослини кукурудзи досягають максимальної продуктивності. Це, у свою чергу, супроводжується максимальним ефектом розбавлення білку. Тоді, як відхилення від оптимуму, як у бік зменшення, так і у бік збільшення, призводять до зростання відносного вмісту білку.

Найвиразніша реакція вмісту білку на норму висіву спостерігалась у низькопродуктивній зоні. Тут вміст білку за норми 65 тис./га (92–9,3 %) зростає із збільшенням норми. Максимум було досягнуто за норми 85 тис./га 9,5–9,6 % у середньому за роки. Приріст становив 0,3–0,4 в. п. між крайніми нормами. Механізм цього ефекту є подвійним. По-перше, за загущення в умовах обмеженого ресурсного забезпечення зони, синтез крохмалю пригнічується сильніше ніж синтез білку. Це підвищує відносний вміст останнього. Подруге, скорочення тривалості наливу зерна за загущення і в умовах drought escape призводить до неповного виповнення зерна крохмалем.

Ochieng' et al. (2021) показали, що доступність азоту на одиницю сформованої зернової маси є ключовим регулятором вмісту білку у зерні кукурудзи. А також, що в умовах обмеженого накопичення сухої маси зерна, вміст білку закономірно зростає навіть за незмінного азотного живлення.

На рисунку 4.13 зображено теплову карту вмісту білка у зерні кукурудзи гібриду ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2023 році. Отримані результати показують, що найбільший вплив на вміст білка мала саме зона продуктивності поля. Найвищі показники вмісту білка формувалися у низькопродуктивній зоні, а найнижчі у високопродуктивній



зоні. У високій зоні продуктивності вміст білка змінювався в межах від 8,1 % до 8,4 %. У середньопродуктивній зоні продуктивності показники становили 8,6–8,8 %, а у низькопродуктивній зоні від 9,1 % до 9,5 %.

Рис. 4.13. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2023 р.

При цьому вплив норми висіву був менш вираженим, ніж вплив самої зони продуктивності. Контрольний варіант із нормою висіву 75 тис./га, який виділено рамкою, займав проміжне положення між іншими варіантами дослідів.

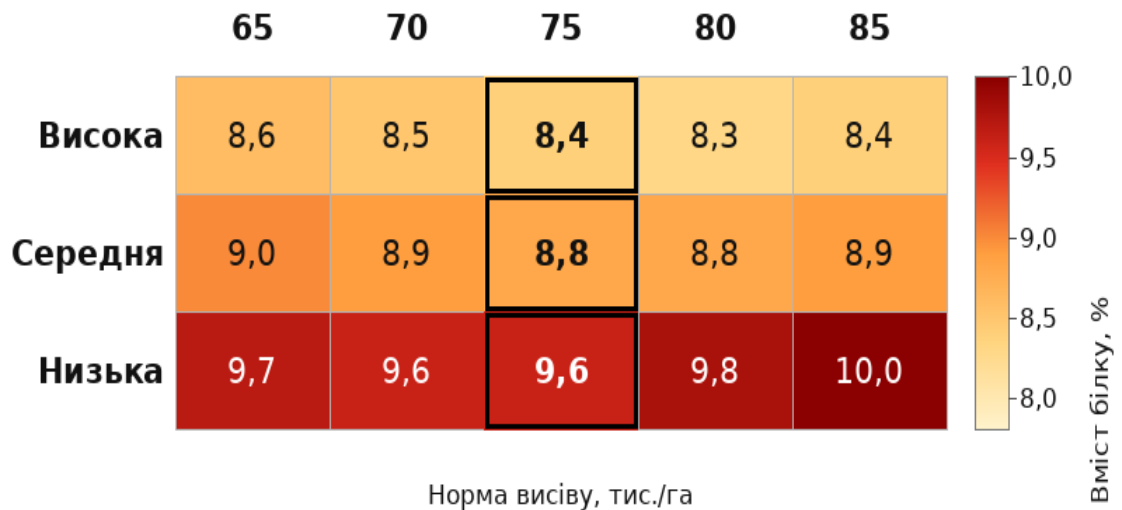


Рис. 4.14. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2024 р.

На рисунку 4.14 зображено теплову карту вмісту білка у зерні кукурудзи гібриду ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву у 2024 році. Отримані результати підтверджують закономірність попереднього року досліджень. Найвищий вміст білка формувалася у низькопродуктивній зоні, а найнижчий у високопродуктивній зоні. У високій зоні продуктивності вміст білка змінювався від 8,3 % до 8,6 %, у середньопродуктивній зоні від 8,8 % до 9,0 %, а у низькопродуктивній зоні від 9,6 % до 10,0 %. Вплив норми висіву був менш вираженим порівняно із впливом самої зони продуктивності.

На рисунку 4.15 зображено теплову карту вмісту білка у зерні кукурудзи гібриду ДКС 3939 у 2025 році. Отримані результати також підтверджують

загальну тенденцію попередніх років. Найнижчий вміст білка формувався у зоні високої продуктивності, де показники змінювалися від 7,8 % до 8,2 %, а найвищий у низькопродуктивній зоні, де вміст білка становив від 8,8 % до 9,2 %. У середньопродуктивній зоні продуктивності показники займали проміжне положення та змінювалися в межах 8,3–8,5 %.

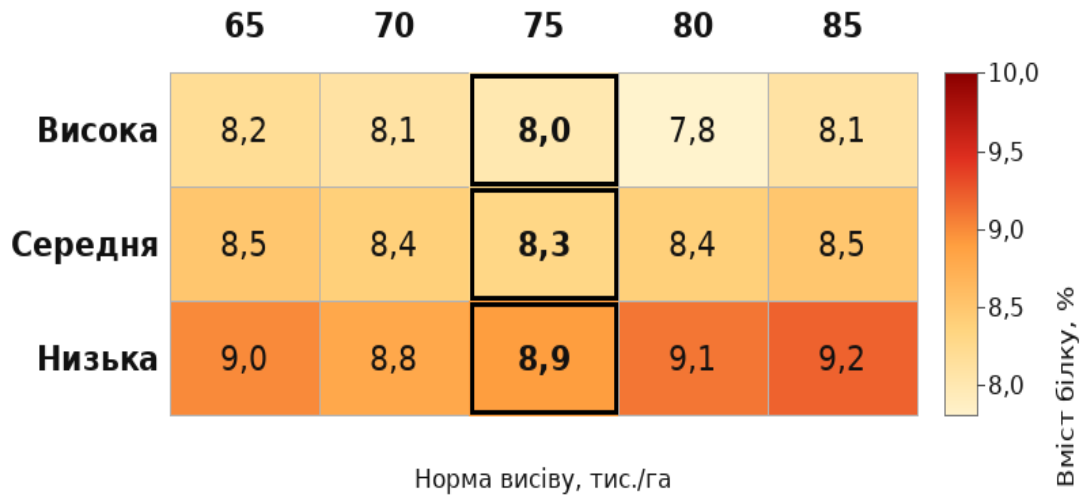


Рис. 4.15. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2025 р.

На рисунку 4.16 подано усереднену за 2023–2025 рр. теплову карту вмісту білка у зерні кукурудзи залежно від зони продуктивності та норми висіву. Отримані результати підтверджують, що саме зона продуктивності поля була основним фактором впливу на вміст білка у зерні. У високій зоні продуктивності вміст білка змінювався в межах 8,1–8,4 %, у середньопродуктивній зоні становив 8,6–8,8 %, а у низькопродуктивній зоні досягав 9,2–9,6 %. Вплив норми висіву був менш помітним і проявлявся лише у незначних коливаннях показника між варіантами дослідів.

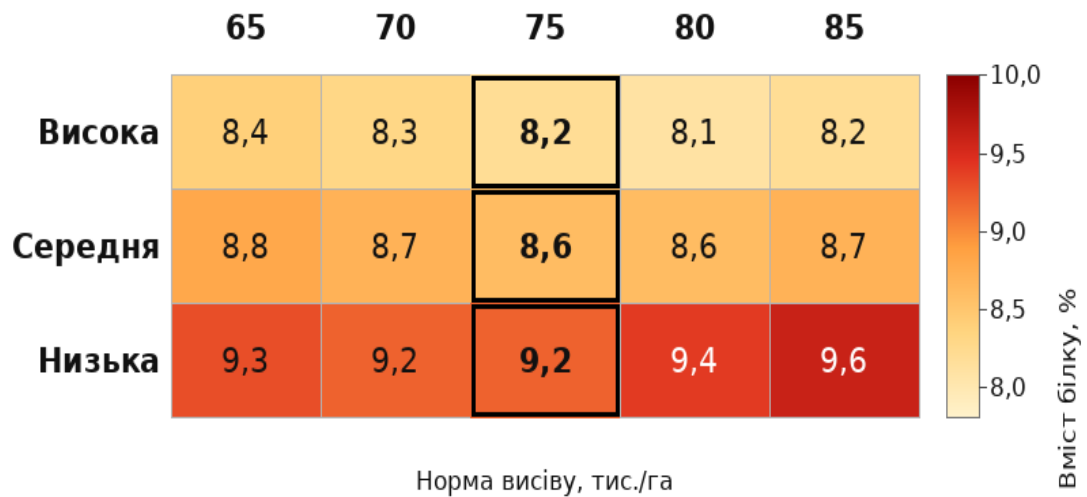


Рис. 4.16. Теплова карта вмісту білку у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, середнє за 2023–2025 рр.

Yin et al. (2025) підтверджують, що стресові умови вегетаційного сезону, зокрема дефіцит вологи у період наливу зерна, суттєво підвищують вміст білку. Цей механізм працює через скорочення накопичення крохмалю, причому ефект є найбільш вираженим у верхівковій частині початку. Тобто, у зонах із найнижчим пріоритетом для відтоку асимілятів.

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи є важливим показником якості врожаю, оскільки він формується під час наливу зерна і залежить від здатності рослини накопичувати та перерозподіляти продукти фотосинтезу.

Yue et al. (2022) зазначають, що забезпечення рослин азотом впливає на налив зерна та накопичення крохмалю через зміну активності ферментів, які беруть участь у його синтезі. Це підтверджує, що вміст крохмалю є чутливим показником до умов живлення та загального ресурсного забезпечення рослин.

Результати досліджень (табл. 4.7) показують, що найбільший вміст крохмалю формувався у зоні високої продуктивності. У середньому за 2023–2025 роки він становив 72,1 %. У зоні середньої продуктивності середній показник був нижчим і становив 70,8 %, а у низькопродуктивній зоні продуктивності – лише 68,9 %. Це свідчить про те, що кращі умови забезпечення рослин у високопродуктивній зоні сприяли активнішому накопиченню крохмалю в зерні. Вплив норми висіву був менш помітним, ніж

вплив самої зони продуктивності. У зоні високої продуктивності найвищий середній показник крохмалю був зафіксований за норми 80 тис./га і становив 72,5 %. У середньопродуктивній зоні найкращий результат показала норма 75 тис./га, де вміст крохмалю становив 71,0 %. У низькопродуктивній зоні різниця між нормами висіву була незначною, проте найнижчий показник спостерігався за норми 85 тис./га і становив 68,5 %. Загалом отримані результати показують, що зона продуктивності мала значно більший вплив на накопичення крохмалю в зерні, ніж зміна норми висіву.

Таблиця 4.7

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025
Високопродуктивна	65	71,8	71,0	72,4	71,7
	70	72,0	71,2	72,7	72,0
	75	72,3	71,4	72,9	72,2
	80	72,6	71,6	73,4	72,5
	85	72,2	71,3	72,6	72,0
Середньопродуктивна	65	70,5	69,8	71,2	70,5
	70	70,8	70,0	71,5	70,8
	75	71,1	70,2	71,8	71,0
	80	70,9	70,1	71,6	70,9
	85	70,7	69,9	71,3	70,6
Низькокопродуктивна	65	69,2	67,8	69,8	68,9
	70	69,5	68,0	70,2	69,2
	75	69,4	67,9	70,0	69,1
	80	69,1	67,7	69,7	68,8
	85	68,7	67,3	69,4	68,5
Середнє – Високопродуктивна зона		72,2	71,3	72,8	72,1
Середнє – Середньопродуктивна зона		70,8	70,0	71,5	70,8
Середнє – Низькокопродуктивна зона		69,2	67,7	69,8	68,9

Отримані нами результати, можна пояснити тим, що різні зони продуктивності мають неоднакове ресурсне забезпечення, зокрема за вологою та елементами живлення.

Feng et al. (2024) також показали, що рівень азотного живлення змінює обмін азоту і вуглеводів у зерні кукурудзи, що безпосередньо впливає на накопичення крохмалю. Тому різниця між зонами продуктивності може бути пов'язана не лише з урожайністю, а й з різною інтенсивністю формування запасних речовин у зерні.

У таблиці 4.8 наведено вміст крохмалю у зерні кукурудзи залежно від зони продуктивності поля. Отримані результати показують, що найбільший вміст крохмалю формувався у зоні високої продуктивності. У середньому за 2023–2025 роки цей показник становив 72,1 %.

Таблиця 4.8

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від зони продуктивності,% (середнє за нормами висіву)

Зона продуктивності	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025 рр.
Високопродуктивна	72,2	71,3	72,8	72,1
Середньопродуктивна	70,8	70,0	71,5	70,8
Низькопродуктивна	69,2	67,7	69,8	68,9
Різниця Високопродуктивна–Низькопродуктивна	3,0	3,6	3,0	3,2

У середньопродуктивній зоні продуктивності вміст крохмалю становив 70,8 %, а у низькопродуктивній зоні – 68,9 %. Різниця між високо- та низькопродуктивними зонами в середньому становила 3,2 %, що свідчить про значний вплив умов вирощування на накопичення крохмалю в зерні. Також варто зазначити, що у 2024 році різниця між зонами була найбільшою і

становила 3,6 %, що, ймовірно, пов'язано з більш посушливими умовами року. У таблиці 4.9 наведено вміст крохмалю залежно від норми висіву. Отримані результати показують, що вплив норми висіву був меншим, ніж вплив зони продуктивності. У зоні високої продуктивності найвищий показник крохмалю був отриманий за норми 80 тис./га і становив 72,5 %. У середньопродуктивній зоні найкращий результат показала норма 75 тис./га, де вміст крохмалю становив 71,0 %.

Таблиця 4.9

Вміст крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву, % (середнє за роками досліджень 2023–2025 рр.)

Зона продуктивності	65	70	75	80	85	Середнє по зоні
Високопродуктивна	71,7	72,0	72,2	72,5	72,0	72,1
Середньопродуктивна	70,5	70,8	71,0	70,9	70,6	70,8
Низькопродуктивна	68,9	69,2	69,1	68,8	68,5	68,9
Середнє по нормах	70,4	70,7	70,8	70,7	70,4	70,6

У низькопродуктивній зоні продуктивності різниця між нормами висіву була незначною, проте, найнижчий показник спостерігався за норми 85 тис./га і становив 68,5 %. Загалом можна зробити висновок, що зона продуктивності більше впливала на накопичення крохмалю в зерні, ніж зміна норми висіву. Вплив норми висіву на вміст крохмалю можна розглядати через зміну конкуренції між рослинами. За загущення посівів кожна рослина отримує менше світла, вологи та поживних речовин, що може впливати на процес наливу зерна.

Zhang et al. (2022) підкреслюють, що поєднання азотного і калійного живлення суттєво впливає на врожайність і якість зерна кукурудзи, у тому числі на показники, пов'язані з крохмалем. Тому реакція крохмалю на густоту

посіву може бути пов'язана з тим, наскільки рослина забезпечена основними елементами живлення.

У 2023 році (рис. 4.20) найбільший вміст крохмалю формувався у зоні високої продуктивності. Показники перевищували 72 %, тоді як у низькопродуктивній зоні вони переважно були нижчими за 69,5 %. Середньопродуктивна зона продуктивності займала проміжне положення. Вплив норми висіву був менш помітним, хоча у зоні продуктивності високої дещо кращі результати спостерігалися за норм 75–80 тис./га.

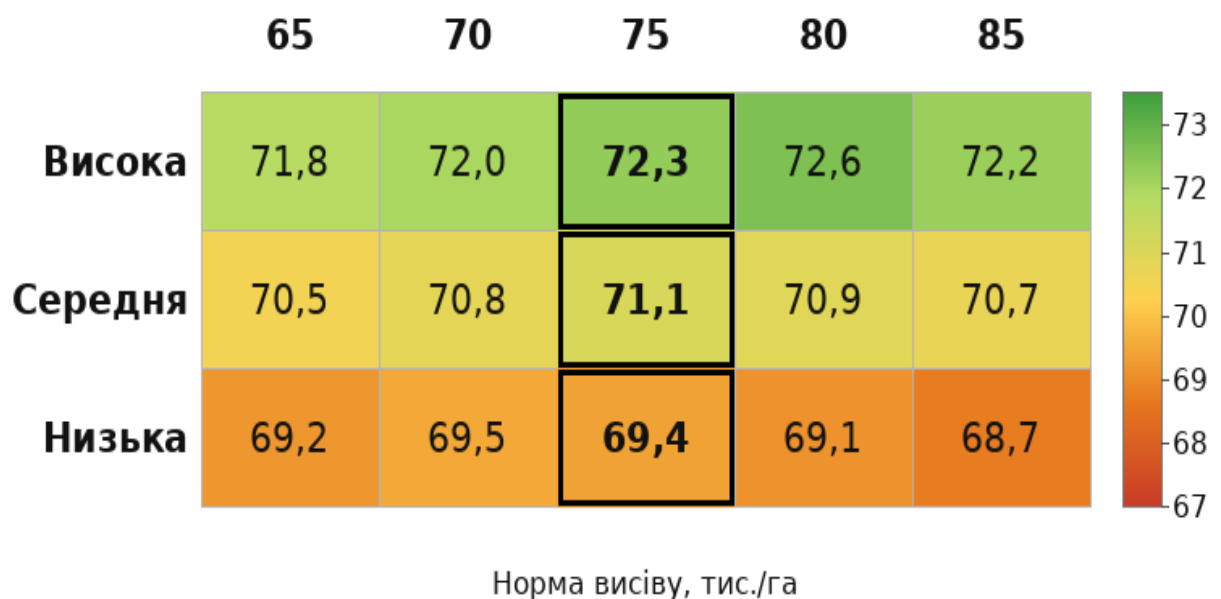


Рис. 4.20. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2023 р.

Відповідно до отриманих результатів (рис. 4.21) у 2024 році загальний вміст крохмалю був нижчим порівняно з іншими роками дослідження. Особливо це помітно у низькопродуктивній зоні продуктивності, де показники місцями знижувалися до 67,3 %. При цьому, навіть у менш сприятливих умовах високопродуктивна зона зберігала стабільно вищий вміст крохмалю. Це свідчить про кращі умови формування зерна у даній частині поля.

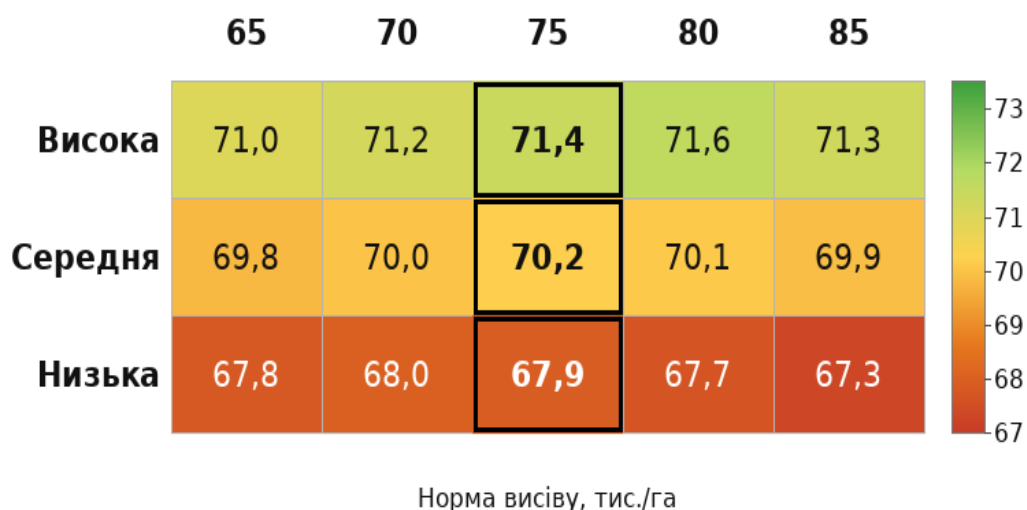


Рис. 4.21. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2024 р.

2025 рік був більш сприятливим для накопичення крохмалю (рис. 4.22). У зоні високої продуктивності показники досягали 73,4 %, що було найвищим результатом серед усіх років досліджень. У середньопродуктивній та низькопродуктивній зонах також спостерігалось певне покращення показників порівняно з 2024 роком.

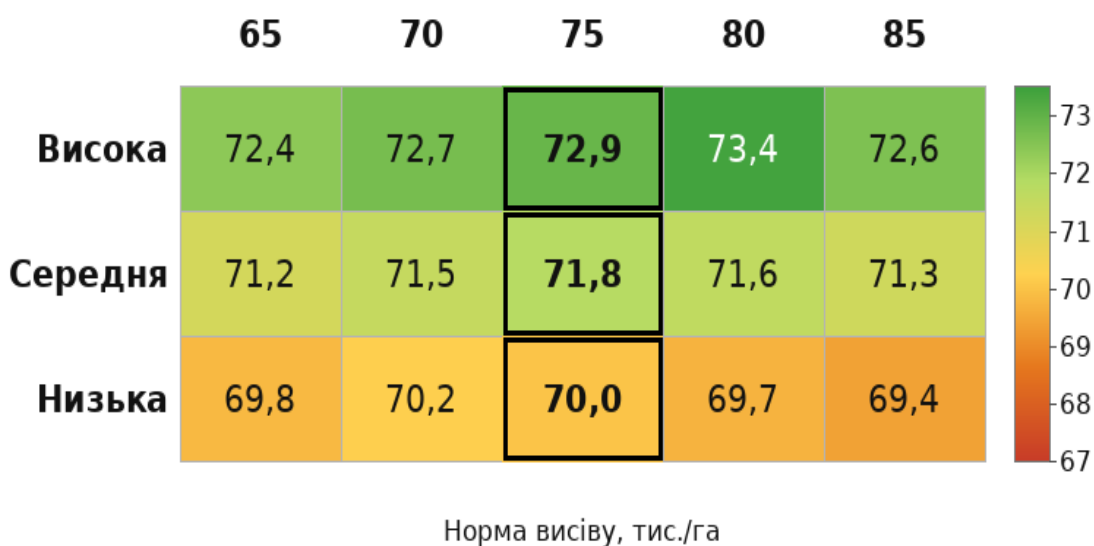


Рис. 4.22. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, 2025 р.

Усереднені результати за 2023–2025 роки (рис. 4.23), підтверджують загальну тенденцію. Найбільше крохмалю накопичувалося у зерні, сформованому у зоні високої продуктивності, а найменше у низькопродуктивній зоні. Різниця між нормами висіву була відносно невеликою, тому можна зробити висновок, що саме зона продуктивності мала основний вплив на вміст крохмалю в зерні кукурудзи.

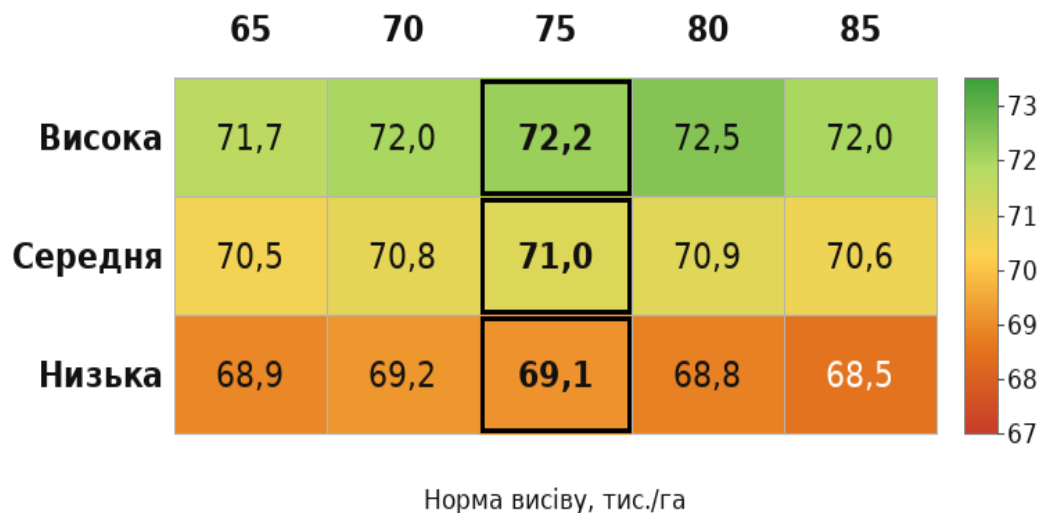


Рис. 4.23. Теплова карта вмісту крохмалю у зерні кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності та норми висіву, середнє за 2023–2025 рр.

Таким чином, вміст крохмалю у зерні кукурудзи формується під впливом комплексу факторів. Wang and Lu (2022) показали, що різні режими удобрення можуть змінювати не лише кількість крохмалю, а й його властивості. Lou et al. (2025) також зазначають, що поєднання органічного та мінерального живлення впливає на структуру крохмалю. Це підтверджує, що якість зерна кукурудзи потрібно розглядати не окремо від умов вирощування, а як результат дії всієї системи агротехнологічних факторів. Вміст жиру у зерні кукурудзи є важливим показником якості врожаю, оскільки олія має харчове та технологічне значення. На формування цього показника впливають як умови вирощування, так і генетичні особливості гібриду. Luo et al. (2023) зазначають, що накопичення жиру в зерні кукурудзи значною мірою контролюється генетично та пов'язане з роботою генів, які відповідають за синтез жирних кислот і олії в зерні. Тому зміна умов вирощування може впливати на вміст

жиру, проте базовий рівень цього показника визначається особливостями конкретного гібриду. Результати дослідження вмісту жирів в зерні кукурудзи залежно від норм висіву та зон продуктивності подано в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10

Вміст жиру у зерні кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє за 2023–2025
Високопродуктивна	65	4,2	4,3	4,0	4,2
	70	4,1	4,2	3,9	4,1
	75	4,1	4,2	3,9	4,1
	80	4,0	4,1	3,8	4,0
	85	4,1	4,2	3,9	4,1
Середньопродуктивна	65	4,4	4,5	4,2	4,4
	70	4,3	4,4	4,1	4,3
	75	4,3	4,4	4,1	4,3
	80	4,3	4,4	4,1	4,3
	85	4,4	4,5	4,2	4,4
Низькопродуктивна	65	4,7	4,9	4,5	4,7
	70	4,6	4,8	4,4	4,6
	75	4,6	4,8	4,4	4,6
	80	4,7	4,9	4,6	4,7
	85	4,8	5,0	4,7	4,8
<i>Середнє – Високопродуктивна зона</i>		<i>4,1</i>	<i>4,2</i>	<i>3,9</i>	<i>4,1</i>
<i>Середнє – Середньопродуктивна зона</i>		<i>4,3</i>	<i>4,4</i>	<i>4,1</i>	<i>4,3</i>
<i>Середнє – Низькопродуктивна зона</i>		<i>4,7</i>	<i>4,9</i>	<i>4,5</i>	<i>4,7</i>

Отримані результати показують, що найбільший вміст жиру у зерні формувався у низькопродуктивній зоні. У середньому за роки досліджень цей показник становив 4,7 %. У середньопродуктивній зоні продуктивності вміст жиру був нижчим і становив 4,3 %, а у зоні високої продуктивності

найнижчим, лише 4,1 %. Таким чином, простежується чітка тенденція: зі зниженням продуктивності зони вміст жиру у зерні зростає. Вміст жиру у зерні кукурудзи, як і інші якісні показники, залежить не лише від генетичних особливостей гібриду, а й від умов вирощування.

Nieweglowski et al. (2024) встановили, що рівень азотного живлення та застосування біостимуляторів можуть змінювати хімічний склад зерна кукурудзи. Зокрема, автори відмічають, що азотне удобрення сприяло зменшенню вмісту крохмалю та підвищенню вмісту жиру в зерні.

Якщо аналізувати вплив норми висіву, то зміни були нетакими помітними. У високо- та середньопродуктивній зонах продуктивності показники між варіантами майже не відрізнялися. Найбільші зміни спостерігалися у низькопродуктивній зоні продуктивності, де за збільшення норми висіву до 85 тис./га вміст жиру зростає до 4,8 % (табл. 4.10). Загалом, можна сказати, що норма висіву мала слабший вплив на вміст жиру порівняно із самою зоною продуктивності поля. Незначні коливання вмісту жиру між нормами висіву можуть пояснюватися тим, що ця ознака значною мірою контролюється генетично.

Zhang et al. (2023) встановили, що більша частина мінливості вмісту олії у зерні кукурудзи пов'язана з генетичними факторами. Подібні висновки роблять і Fang et al. (2021) які показали, що показники, пов'язані з олійністю зерна, мають складну генетичну основу. Fang et al. (2021) встановили, що показники, пов'язані з олійністю зерна, контролюються великою кількістю генетичних факторів. Саме тому, вплив агротехнічних прийомів на вміст жиру часто є менш помітним порівняно з впливом генотипу рослин.

Результати досліджень свідчать, що між роками досліджень спостерігалася певна різниця у показниках. Найвищі показники вмісту жиру були отримані у 2024 році. У низькопродуктивній зоні продуктивності середньопродуктивній показник досягав 4,9 %. У 2025 році, навпаки, вміст жиру був найнижчим у всіх зонах продуктивності. 2023 рік займав проміжне

положення між ними. Це свідчить про те, що погодні умови року також впливали на формування вмісту жиру у зерні кукурудзи.

Побічна продукція кукурудзи є важливою складовою загальної біологічної продуктивності посівів. Окрім формування зерна, рослини кукурудзи накопичують значну кількість органічної маси у вигляді стебел, листків та стрижнів початків. Саме тому, оцінка якісних показників побічної продукції має важливе значення для розуміння ефективності використання рослинами елементів живлення та формування загальної біомаси. Одними з основних показників якості побічної продукції є вміст азоту та сухої речовини. Вміст азоту характеризує рівень накопичення поживних речовин у вегетативній масі рослин, а показник сухої речовини дозволяє оцінити інтенсивність формування органічної маси та ступінь досягання рослин. На ці показники можуть впливати як умови року, так і зона продуктивності поля та норма висіву рослин. Отримані результати (табл. 4.11) показують, що найбільший вміст сухої речовини у побічній продукції формувався у зоні високої продуктивності. У середньому показники тут становили близько 30–31 %, тоді як у низькопродуктивній зоні продуктивності вони переважно були на рівні 22–24 %. Це свідчить про те, що рослини у високопродуктивній зоні швидше накопичували вегетативну масу та формували більш розвинений листостебловий апарат. Вплив норми висіву був менш стабільним. У високій зоні найкращий результат спостерігався за норми 70 тис./га, де середній вміст сухої речовини становив 31,3 %. У середньопроодуктивній та низькопродуктивній зонах чіткої закономірності між нормами висіву практично не спостерігалось. Це може свідчити про те, що на ранніх етапах розвитку кукурудзи зона продуктивності поля сильніше впливала на формування сухої речовини, ніж сама густота стояння рослин. Подібні результати отримали Cai et al. (2023), які зазначають, що накопичення сухої речовини у кукурудзи значною мірою залежить від умов вологозабезпечення та загального рівня розвитку рослин. Автори підкреслюють, що стресові умови можуть змінювати розподіл сухої речовини між органами рослини.

Дані таблиці 4.12 показують, що найбільший вміст азоту у побічній продукції спостерігався у зоні високої продуктивності. У середньому показник тут становив близько 4,5–4,6 %, тоді як у зоні низької продуктивності він був нижчим і переважно знаходився на рівні 3,94,0 %.

Таблиця 4.11

Вміст сухої речовини у рослинах кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу V2–V4 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Суха речовина, %				
Високопродуктивна	65	32,3	27,6	29,9	29,93	–0,43
	70	33,5	29,4	31,0	31,30	+0,93
	75	32,6	28,3	30,2	30,37	–
	80	30,5	29,7	30,0	30,07	–0,30
	85	31,4	28,6	29,5	29,83	–0,53
Середньопродуктивна	65	29,8	26,2	28,0	28,00	+1,83
	70	28,8	26,6	27,7	27,70	+1,53
	75	27,2	25,1	26,2	26,17	–
	80	29,4	25,1	27,3	27,27	+1,10
	85	27,5	26,3	26,9	26,90	+0,73
Низькопродуктивна	65	25,7	20,9	23,3	23,30	+0,53
	70	25,5	22,0	24,0	23,83	+1,07
	75	24,6	20,7	23,0	22,77	–
	80	24,6	20,6	23,2	22,80	+0,03
	85	25,6	21,8	23,7	23,70	+0,93
Примітка. Курсивом виділено контрольний варіант (75 тис./га) у кожній зоні. Δ – відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

Це свідчить про кращу забезпеченість рослин азотом у високопродуктивній зоні поля. На відміну від сухої речовини, показники азоту між нормами висіву змінювалися не дуже сильно. У більшості випадків різниця між варіантами була мінімальною. Це говорить про те, що у фазу V2–

V4 рослини ще не створювали настільки сильну конкуренцію між собою, щоб суттєво вплинути на накопичення азоту у вегетативній масі.

Galindo et al. (2021) також відзначають, що накопичення азоту у вегетативній масі кукурудзи тісно пов'язане із загальною продуктивністю рослин та доступністю елементів живлення у ґрунті.

Таблиця 4.12

Вміст азоту у рослинах кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу V2–V4
залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Азот, %				
Високопродуктивна	65	4,59	4,60	4,62	4,60	+0,09
	70	4,71	4,22	4,48	4,47	−0,03
	75	4,62	4,40	4,50	4,50	—
	80	4,68	4,47	4,56	4,57	+0,06
	85	4,82	4,26	4,53	4,53	+0,03
Середньопродуктивна	65	4,70	4,26	4,48	4,48	+0,25
	70	4,31	3,98	4,12	4,13	−0,09
	75	4,45	4,01	4,23	4,23	—
	80	4,40	4,12	4,26	4,26	+0,03
	85	4,31	4,30	4,29	4,30	+0,07
Низькопродуктивна	65	3,99	3,82	3,97	3,92	−0,09
	70	4,31	3,54	3,88	3,91	−0,10
	75	4,35	3,75	3,95	4,01	—
	80	4,12	3,64	3,92	3,89	−0,12
	85	4,36	3,69	3,98	4,01	−0,00
Δ – відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

У фазу R1 різниця між зонами продуктивності по вмісту сухої речовини у листках стала ще більш помітною (табл. 4.13). У високій зоні продуктивності середні показники перевищували 40 %, тоді як у низькопродуктивній зоні вони

переважно знаходилися на рівні 34–36 %. Це свідчить про те, що рослини у високопродуктивній зоні формували більш потужний асиміляційний апарат та активніше накопичували органічну масу. Зі збільшенням норми висіву вміст сухої речовини у листках поступово знижувався майже у всіх зонах продуктивності. Найкращі результати переважно спостерігалися за норм 65–70 тис./га, а за загушення до 85 тис./га показники були найнижчими. Це може пояснюватися посиленням конкуренції між рослинами за світло та вологу.

Yan et al. (2023) зазначають, що при дефіциті води та підвищеній конкуренції між рослинами змінюється розподіл біомаси, а накопичення сухої речовини у листках знижується.

У фазу R1 вміст азоту у листках був найбільшим у зоні високої продуктивності, дані подано у таблиці 4.14. У середньому показники становили близько 2,8–3,1 %, тоді як у низькопродуктивній зоні вони знижувалися до 2,4–2,6 %. Це свідчить про те, що рослини у високопродуктивній зоні довше зберігали активний фізіологічний стан листового апарату. Зі збільшенням норми висіву вміст азоту у листках поступово знижувався. Найвищі показники переважно спостерігалися за норми 65 тис./га, а найнижчі за 85 тис./га. Це може бути пов'язано із посиленням конкуренції за елементи живлення за загушення посівів.

Таблиця 4.13

Вміст сухої речовини у рослинах кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу R1
залежно від норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Суша речовина, %				
Високопродуктивна	65	42,2	40,6	41,2	41,33	+1,03
	70	41,7	40,1	40,8	40,87	+0,57
	75	41,2	39,5	40,2	40,30	—
	80	40,7	39,1	39,8	39,87	−0,43
	85	40,1	38,5	39,3	39,30	−1,00
Середньопродуктивна	65	40,1	38,4	38,9	39,13	+1,00
	70	39,6	37,9	38,5	38,67	+0,53
	75	39,1	37,3	38,0	38,13	—
	80	38,6	36,8	37,6	37,67	−0,47
	85	38,1	36,2	37,1	37,13	−1,00
Низькопродуктивна	65	37,2	35,6	36,4	36,40	+0,93
	70	36,8	35,1	36,0	35,97	+0,50
	75	36,3	34,5	35,6	35,47	—
	80	35,8	34,0	35,1	34,97	−0,50
	85	35,3	33,4	34,6	34,43	−1,03
Δ – відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

Liu et al. (2023) також показали, що рівень накопичення азоту у рослинах кукурудзи значною мірою залежить від умов живлення та конкуренції між рослинами у посівах.

Таблиця 4.14

Вміст азоту у листі кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) у фазу R1 залежно від
норми висіву та зони продуктивності поля, %

Зона	Норма висіву, тис./га	2023	2024	2025	Середнє	Δ від контр.
		Азот, %				
Високопродуктивна	65	3,15	3,03	3,08	3,08	+0,16
	70	3,07	2,95	3,00	3,00	+0,08
	75	2,98	2,86	2,92	2,92	—
	80	2,92	2,78	2,86	2,85	−0,06
	85	2,85	2,71	2,79	2,78	−0,13
Середньопродуктивна	65	2,93	2,80	2,86	2,86	+0,12
	70	2,86	2,73	2,79	2,79	+0,05
	75	2,80	2,67	2,74	2,737	—
	80	2,74	2,61	2,68	2,67	−0,06
	85	2,67	2,55	2,61	2,61	−0,12
Низькопродуктивна	65	2,74	2,60	2,66	2,66	+0,12
	70	2,67	2,54	2,59	2,60	+0,05
	75	2,61	2,48	2,54	2,54	—
	80	2,55	2,43	2,49	2,49	−0,05
	85	2,49	2,37	2,43	2,43	−0,11
Примітка. Δ –відхилення від контролю своєї зони. Аналіз виконано в лабораторії визначення якості продукції рослинництва УІЕСР.						

На рисунку 4.24 показано зміну вмісту сухої речовини у побічній продукції кукурудзи залежно від норми висіву та зони продуктивності поля. У фазу V2–V4 найвищі показники сухої речовини формувалися у зоні високої продуктивності. Тут середні значення знаходилися на рівні близько 30–31%, тоді як у низькопродуктивній зоні вони не перевищували 24 %. Різниця між нормами висіву була відносно невеликою. У середньопродуктивній та низькопродуктивній зонах спостерігалися лише незначні коливання показників між варіантами дослідів. У фазу R1 різниця між зонами стала ще

помітнішою. У зоні високої продуктивності вміст сухої речовини перевищував 39 %, а у низькопродуктивній зоні поступово знижувався до 34–35 %. Спостерігається загальну тенденцію до зменшення вмісту сухої речовини за збільшення норми висіву. Особливо чітко це проявилось у високо- та середньопродуктивній зонах продуктивності. Це свідчить про те, що за загущення посівів рослини формували менш розвинену вегетативну масу через сильнішу конкуренцію між собою.

На рисунку 4.25 наведено динаміку вмісту азоту у побічній продукції кукурудзи. У фазу R1 найвищі показники вмісту азоту спостерігалися у зоні високої продуктивності, де вони знаходилися в межах 2,8–3,1 %. У середньопродуктивній зоні значення були дещо нижчими, а у низькопродуктивній зоні – найменшими. Зі збільшенням норми висіву вміст азоту поступово знижувався в усіх зонах продуктивності. Інша ситуація спостерігалася у фазу V2–V4. Тут зміни між нормами висіву були менш вираженими, а самі показники азоту залишалися відносно стабільними. Найвищий вміст азоту також формувався у зоні високої продуктивності. Це свідчить про те, що на ранніх етапах розвитку рослин основний вплив на накопичення азоту мала саме зона продуктивності поля, а не густота стояння рослин.

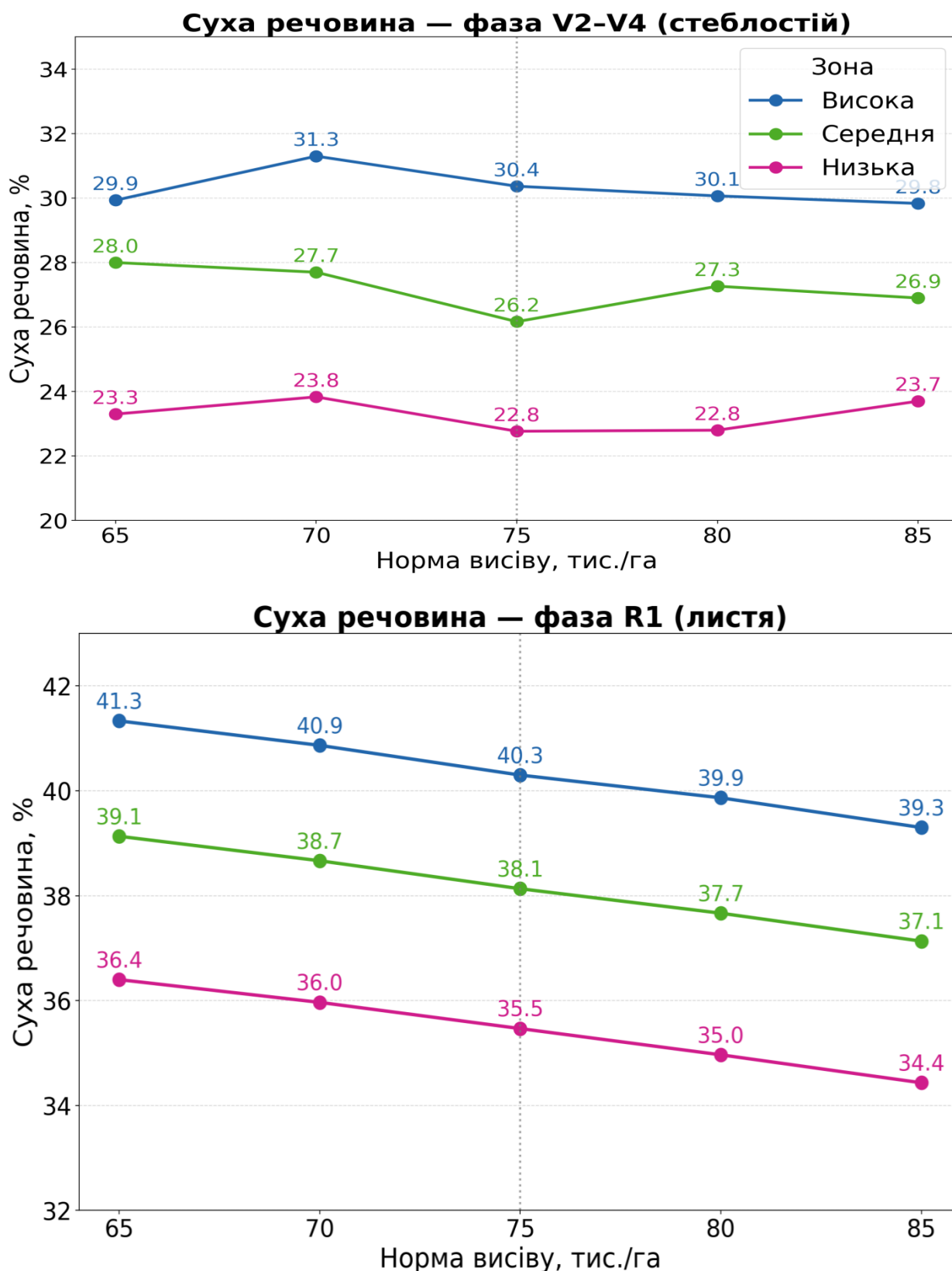


Рис. 4.24. Вміст сухої речовини в побічній продукції кукурудзи ДКС 3939 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля у фазах V2–V4 і R1 (середнє за 2023–2025 рр.)

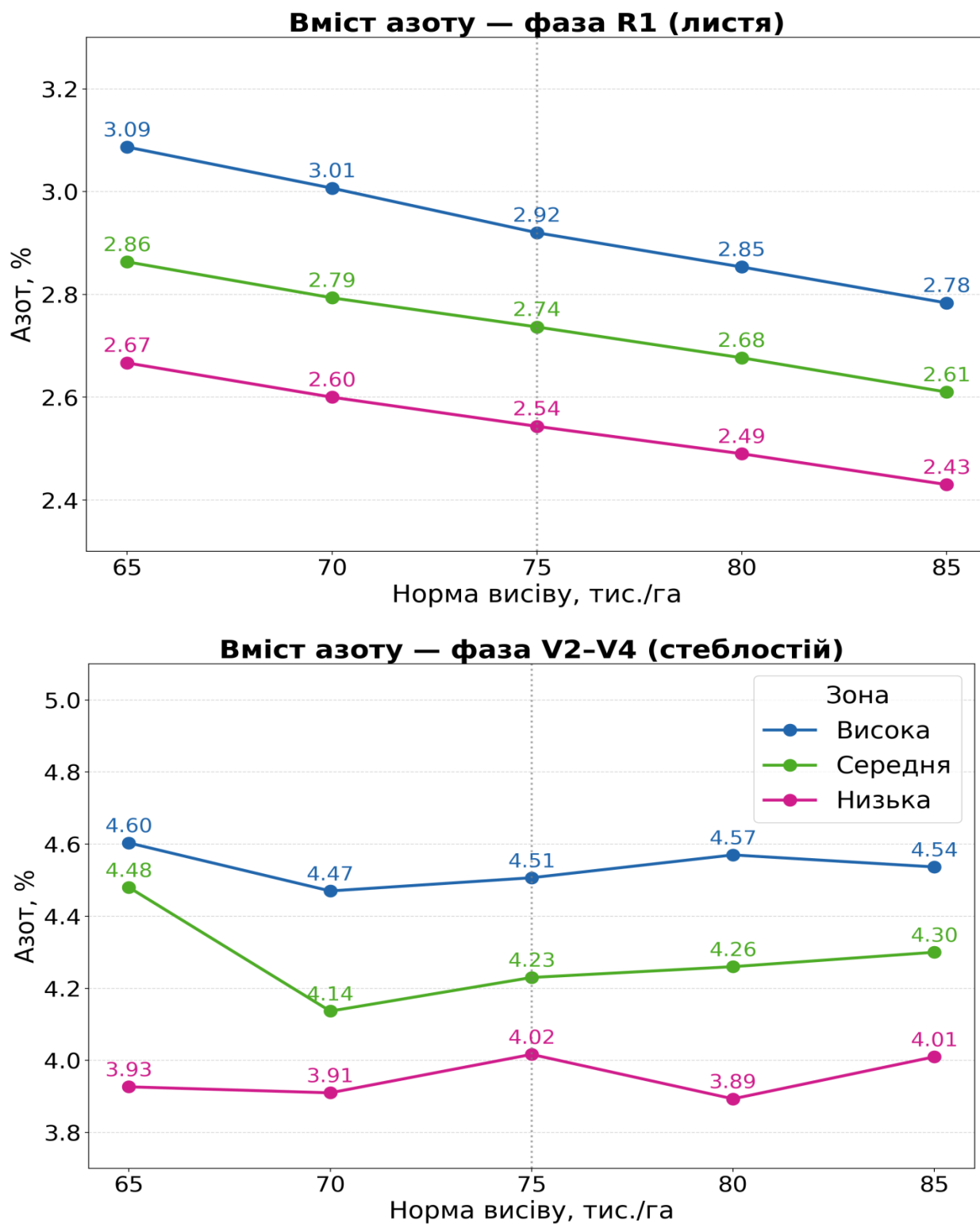


Рис. 4.25. Вміст азоту в побічній продукції кукурудзи ДКС 3939 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля у фазах V2–V4 і R1, % (середнє за 2023–2025 рр.)

4.3. Математичне моделювання впливу елементів технології на формування урожайності

Сучасні технології вирощування кукурудзи передбачають не лише оцінку окремих агрономічних показників, а і встановлення кількісних закономірностей між елементами технології та кінцевою урожайністю культури. Саме тому математичне моделювання є одним із важливих інструментів аналізу польових досліджень, оскільки воно дозволяє не тільки описати отримані результати а й визначити оптимальні параметри технології вирощування для конкретних умов поля. У попередніх підрозділах було встановлено, що норма висіву та зона продуктивності суттєво впливають на ріст і розвиток рослин кукурудзи, формування структурних елементів урожаю, а також на якісні показники зерна та побічної продукції. Проте дія цих факторів не завжди є лінійною. У багатьох випадках реакція рослин може мати параболічний або навіть хвилеподібний характер де існують мінімальні, оптимальні та критичні значення густоти стояння рослин. Саме тому, для більш глибокого аналізу отриманих результатів доцільним є використання математичних моделей. Особливо важливим є моделювання взаємодії між густотою стояння рослин та рівнем ресурсного забезпечення. Високопродуктивні зони поля здатні ефективніше реалізовувати потенціал загущених посівів, тоді як у низькопродуктивних зонах надмірне загущення часто призводить до посилення конкуренції між рослинами та зниження урожайності. Таким чином одна й та сама норма висіву може мати різний ефект залежно від умов вирощування.

Tian et al. (2022) встановили що взаємодія між густотою стояння рослин та азотним живленням безпосередньо впливає на засвоєння фотосинтетично активної радіації, ефективність використання азоту та кінцеву урожайність кукурудзи. Автори показали, що збільшення густоти змінює структуру посіву, розподіл світла в ярусі та інтенсивність формування листової поверхні. При

цьому оптимальне поєднання густоти та азотного живлення дозволяє підвищувати ефективність використання ресурсів без втрати урожайності. Подібні результати отримали Zhang et al. (2022), які у своїй роботі використовували оптимізаційне моделювання для підбору найкращого поєднання густоти стояння рослин та норм азотного живлення. Дослідження показало, що помірне підвищення густоти разом із раціональним використанням азотних добрив забезпечує не лише підвищення урожайності, але і покращення економічної ефективності технології вирощування кукурудзи.

Важливе значення має також визначення математичних закономірностей реакції урожайності на зміну окремих елементів технології. Medina-Cuéllar et al. (2021) показали, що для опису формування урожайності кукурудзи ефективно використовуються лінійні, квадратичні та кубічні трендові моделі. Автори встановили, що надмірне підвищення норм азотного живлення не завжди забезпечує подальше зростання урожайності, а в окремих випадках навіть погіршує показники продуктивності. Це підтверджує необхідність пошуку оптимуму між рівнем ресурсного забезпечення та реакцією рослин. У даному підрозділі проведено математичний аналіз отриманих експериментальних даних з метою встановлення характеру взаємозв'язків між нормою висіву, зоною продуктивності поля та урожайністю кукурудзи. Особливу увагу приділено визначенню оптимальних параметрів технології які забезпечують найвищу ефективність використання ресурсного потенціалу поля.

Дані таблиці 4.15 показують, що між урожайністю зерна кукурудзи та показниками якості існують досить тісні зв'язки. Найсильніша позитивна кореляція спостерігалася між урожайністю та вмістом крохмалю, а також масою 1000 зерен. В обох випадках коефіцієнт кореляції становив +0,91. Це свідчить про те, що зі збільшенням урожайності одночасно покращувалося виповнення зерна та накопичення крохмалю. Подібна ситуація спостерігалася і для натури зерна, де коефіцієнт кореляції становив +0,90.

Таблиця 4.15

Коефіцієнти кореляції Пірсона між урожайністю зерна та показниками якості зерна кукурудзи ДКС 3939 (n=15, середнє за 2023–2025 рр., відсортовано за спаданням |r|)

Показник	r (Пірсон)	p-значення	Значу- щість	Напрямок зв'язку
Крохмаль, %	+0,91	<0,001	***	Прямий
M1000, г	+0,91	<0,001	***	Прямий
Натура, г/л	+0,90	<0,001	***	Прямий
Жир, %	−0,82	<0,001	***	Обернений
Вологість зерна, %	+0,82	<0,001	***	Прямий
Білок, %	−0,81	<0,001	***	Обернений

Вміст білка та жиру мав обернений зв'язок із урожайністю. Для жиру коефіцієнт кореляції становив −0,82, а для білка −0,81. Можливо, це пов'язано з тим, що за формування більш високої урожайності рослини спрямовували більшу частину асимілянтів на накопичення крохмалю, а не білкових чи жирових сполук. Також помітний прямий зв'язок урожайності з вологістю зерна (+0,82). Ймовірно, більш продуктивні посіви довше зберігали активний фізіологічний стан і повільніше втрачали вологу перед збиранням. Як видно з таблиці 4.16, урожайність зерна кукурудзи мала тісний зв'язок не лише з показниками якості зерна, а й з морфологічними та агрофізичними характеристиками рослин. Найвищий коефіцієнт кореляції був отриманий для зони продуктивності поля (+0,91). Це ще раз підтверджує, що саме просторові особливості поля та рівень ресурсного забезпечення були одним із головних факторів формування урожайності у досліді.

Таблиця 4.16.

Коефіцієнти кореляції Пірсона між урожайністю зерна та морфологічними і агрофізичними показниками кукурудзи ДКС 3939 (n=15, середнє за 2023–2025 рр., відсортовано за спаданням |r|)

Показник	r (Пірсон)	p-значення	Значу- щість	Напря- м зв'язку
Зона продуктивності	+0,91	<0,001	***	Прямий
N V2–V4, %	+0,86	<0,001	***	Прямий
Висота R1, см	+0,85	<0,001	***	Прямий
CP R1, %	+0,84	<0,001	***	Прямий
CP V2–V4, %	+0,82	<0,001	***	Прямий
Висота V2–V4, см	+0,74	<0,001	***	Прямий
N R1, %	+0,70	<0,001	***	Прямий

Досить сильний прямий зв'язок спостерігався між урожайністю та вмістом азоту у рослинах у фазу V2–V4 (+0,86), а також висотою рослин у фазу R1 (+0,85). Ймовірно, рослини, які на ранніх етапах розвитку краще забезпечувалися азотом і формували більш інтенсивний ріст, у подальшому мали вищий потенціал продуктивності. Подібна закономірність простежувалася і для вмісту сухої речовини. Для сухої речовини у фазу R1 коефіцієнт кореляції становив +0,84, а у фазу V2–V4 +0,82. Результати показали, що навіть показники раннього розвитку рослин, зокрема висота у фазу V2–V4, також мали зв'язок з кінцевою урожайністю (+0,74). Це може свідчити про те, що стартовий розвиток рослин у значній мірі визначав подальше формування продуктивності посіву. Уміст азоту у рослинах у фазу R1 мав дещо слабший, але все одно високий прямий зв'язок із урожайністю (+0,70). Загалом отримані результати показують, що більш продуктивні посіви

характеризувалися активнішим ростом рослин, вищим накопиченням сухої речовини та кращим забезпеченням азотом протягом вегетації.

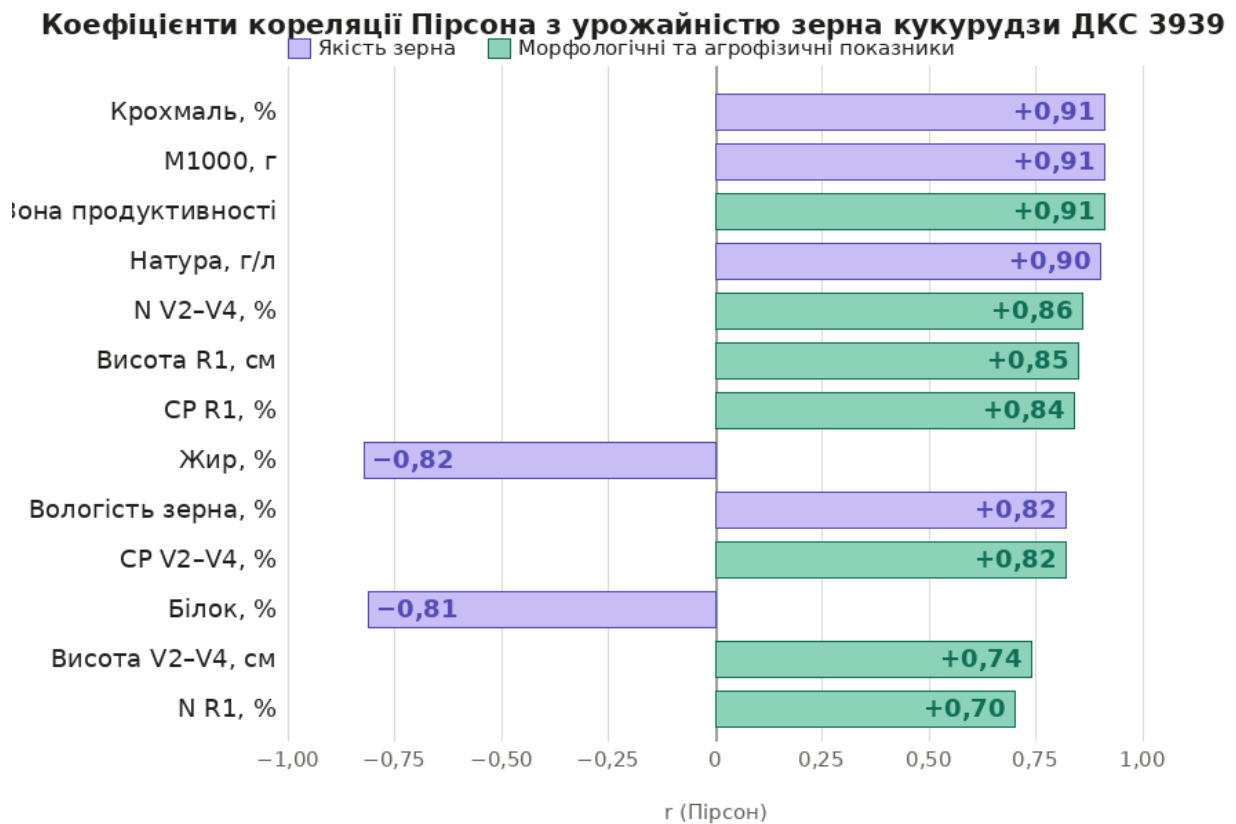


Рис. 4.26. Коефіцієнти кореляції Пірсона між урожайністю зерна та показниками якості зерна і морфологічними показниками кукурудзи ДКС 3939 (n=15, середнє за 2023–2025 рр.)

На рисунку 4.26 графічно зображено силу та напрям кореляційних зв'язків між урожайністю зерна кукурудзи і досліджуваними показниками якості зерна та розвитку рослин. Добре видно, що більшість показників мали сильний прямий зв'язок із урожайністю. Найвищі коефіцієнти кореляції спостерігалися для вмісту крохмалю, маси 1000 зерен та зони продуктивності поля, де значення r досягало +0,91. Це свідчить про те, що більш продуктивні посіви одночасно формували краще виповнене зерно та накопичували більшу кількість крохмалю. Серед морфологічних показників сильний зв'язок із урожайністю мали вміст азоту у фазу V2–V4 (+0,86), висота рослин у фазу R1 (+0,85) та вміст сухої речовини у фазу R1 (+0,84). Ймовірно, активніший ріст

рослин та краще накопичення біомаси протягом вегетації створювали передумови для формування вищої урожайності. Окремі показники мали обернений зв'язок із урожайністю. Найбільш помітно це проявлялося для вмісту жиру ($-0,82$) та білка ($-0,81$). Можливо, за формування високої урожайності рослини більш активно накопичували крохмаль. Тоді, як частка білкових і жирових компонентів у зерні відносно зменшувалася. Загалом урожайність кукурудзи формувалася під впливом комплексу взаємопов'язаних факторів, серед яких важливу роль відігравали як умови зони продуктивності, так і особливості росту та розвитку рослин.

Дані таблиці 4.17 показують, що залежність урожайності кукурудзи від норми висіву в усіх випадках мала виражений нелінійний характер. Для кожної зони продуктивності формувався власний оптимум густоти стояння рослин, після якого подальше загушення вже не забезпечувало приросту урожайності. Саме тому для опису отриманих закономірностей були використані поліноміальні рівняння другого порядку. У зоні високої продуктивності оптимальна норма висіву в середньому за роки досліджень становила 81,8 тис./га, а прогнозована урожайність у точці оптимуму досягала 11,21 т/га. Навіть у різні за погодними умовами роки оптимум у цій зоні залишався відносно стабільним і знаходився в межах 79,7–83,6 тис./га. Ймовірно, високопродуктивна зона продуктивності мала достатній ресурсний потенціал для підтримання підвищеної густоти рослин без різкого посилення конкуренції між ними. У середньопродуктивній зоні продуктивності ситуація виглядала дещо інакше. Тут оптимальна норма висіву в середньому становила 75,9 тис./га за прогнозованої урожайності 9,56 т/га. Тобто оптимум практично співпадав із контрольним варіантом досліду. Можна припустити, що для середньопродуктивної зони подальше загушення вже не компенсувалося наявними ресурсами поля, через що ефективність підвищення густоти рослин поступово знижувалася.

Таблиця 4.17

Рівняння поліноміальної регресії залежності урожайності зерна кукурудзи ДКС 3939 від норми висіву за зонами продуктивності та роками досліджень

Зона	Рік	Рівняння регресії	R ²	х _{opt} , тис./га	Y _{opt} , т/га
Високопродуктивна	2023	$Y = -0,0057x^2 + 0,911x - 25,00$	0,9466	79,7	11,32
	2024	$Y = -0,0040x^2 + 0,656x - 17,02$	0,8339	82,0	9,88
	2025	$Y = -0,0063x^2 + 1,051x - 31,44$	0,9266	83,6	12,48
	Середнє	$Y = -0,0053x^2 + 0,873x - 24,49$	0,9127	81,8	11,21
Середньопродуктивна	2023	$Y = -0,0059x^2 + 0,901x - 24,37$	0,9393	75,8	9,81
	2024	$Y = -0,0064x^2 + 0,979x - 29,59$	0,9903	76,5	7,84
	2025	$Y = -0,0087x^2 + 1,316x - 38,65$	0,9354	75,5	11,05
	Середнє	$Y = -0,0070x^2 + 1,065x - 30,87$	0,9757	75,9	9,56
Низькопродуктивна	2023	$Y = -0,0032x^2 + 0,449x - 7,53$	0,9656	69,6	8,10
	2024	$Y = -0,0020x^2 + 0,267x - 2,88$	0,9989	65,9	5,93
	2025	$Y = -0,0035x^2 + 0,478x - 7,16$	0,8347	68,0	9,11
	Середнє	$Y = -0,0029x^2 + 0,398x - 5,86$	0,9567	68,1	7,70

Примітка. x – норма висіву, тис./га; Y – урожайність, т/га; R^2 – коефіцієнт детермінації; x_{opt} – оптимальна норма висіву; Y_{opt} – урожайність на оптимумі.

Найменший оптимум спостерігався у низькопродуктивній зоні продуктивності. У середньому він становив лише 68,1 тис./га, а прогнозована урожайність у точці максимуму дорівнювала 7,70 т/га. Це ще раз підтверджує, що у менш продуктивних умовах надмірне загущення швидше переходило у фазу конкуренції між рослинами. Особливо помітно це проявилось у 2024 році, де оптимальна норма висіву знизилася до 65,9 тис./га. Можливо, у посушливих умовах дефіцит ресурсів у низькопродуктивній зоні ставав ще більш

відчутним. Також варто звернути увагу на високі значення коефіцієнтів детермінації R^2 . У більшості варіантів вони перевищували 0,90, що свідчить про добру відповідність моделей фактичним даним. Це дозволяє припустити, що отримані рівняння досить точно описують реакцію урожайності кукурудзи на зміну норми висіву в межах досліджуваних зон продуктивності.

На рисунку 4.27 зображено поліноміальні моделі залежності урожайності зерна кукурудзи від норми висіву у високій зоні продуктивності. При збільшенні норми висіву урожайність зростала до певного оптимуму, після чого подальше загушення вже не забезпечувало приросту продуктивності. Усереднена модель показала оптимальну норму висіву на рівні 81,8 тис./га за прогнозованої урожайності близько 11,2 т/га. У різні за погодними умовами роки положення оптимуму залишалося досить близьким.

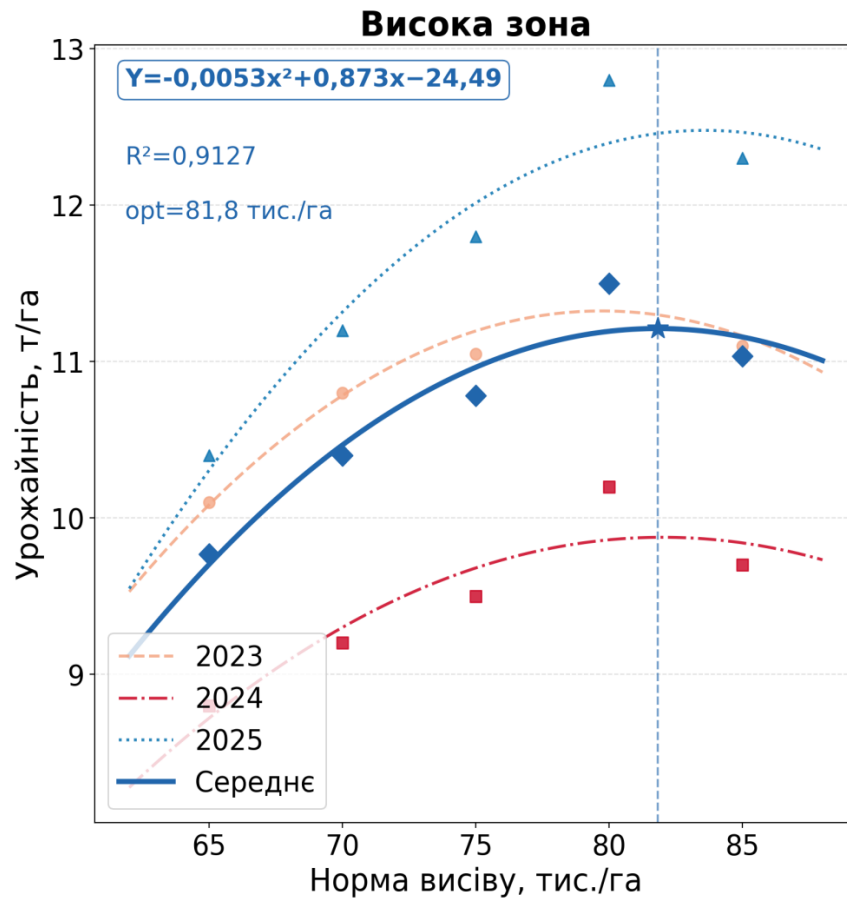


Рис. 4.27. Поліноміальні моделі залежності урожайності зерна кукурудзи ДКС 3939 у зоні високої продуктивності та року досліджень (★ – оптимум середньої кривої)

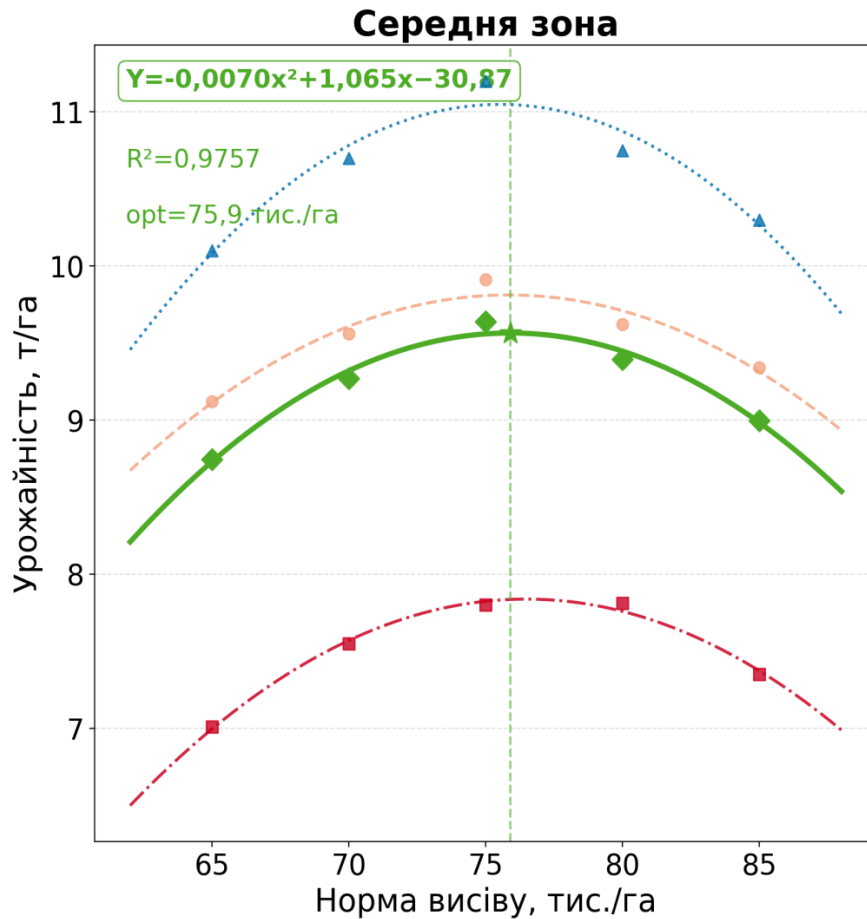


Рис. 4.28. Поліноміальні моделі залежності урожайності зерна кукурудзи ДКС 3939 у середньопродуктивній зоні продуктивності та року досліджень (★ – оптимум середньої кривої)

На рисунку 4.28 наведено поліноміальні моделі залежності урожайності зерна кукурудзи від норми висіву у середньопродуктивній зоні. На відміну від високої зони, тут оптимум практично співпадав із контрольним варіантом дослідів і становив 75,9 тис./га. Подальше загущення або зрідження посівів супроводжувалося поступовим зниженням урожайності. Можливо, у середньопродуктивній зоні ресурсне забезпечення вже не дозволяло рослинам ефективно використовувати підвищену густоту стояння, через що максимум продуктивності формувався поблизу середніх норм висіву. Також варто відзначити високий коефіцієнт детермінації моделі ($R^2=0,9757$), що свідчить про добру відповідність кривої фактичним даним. На рисунку 4.29 зображено аналогічні моделі для низької зони продуктивності. Тут оптимальна норма

висіву була найнижчою серед усіх зон і становила 68,1 тис./га. Після досягнення цього рівня урожайність починала поступово знижуватися. Особливо помітно це проявлялося при загущенні до 80–85 тис./га. У низькопродуктивній зоні навіть незначне підвищення густоти рослин швидко посилювало конкуренцію за доступні ресурси. Саме тому крива урожайності тут мала більш виражене зниження після проходження оптимуму.

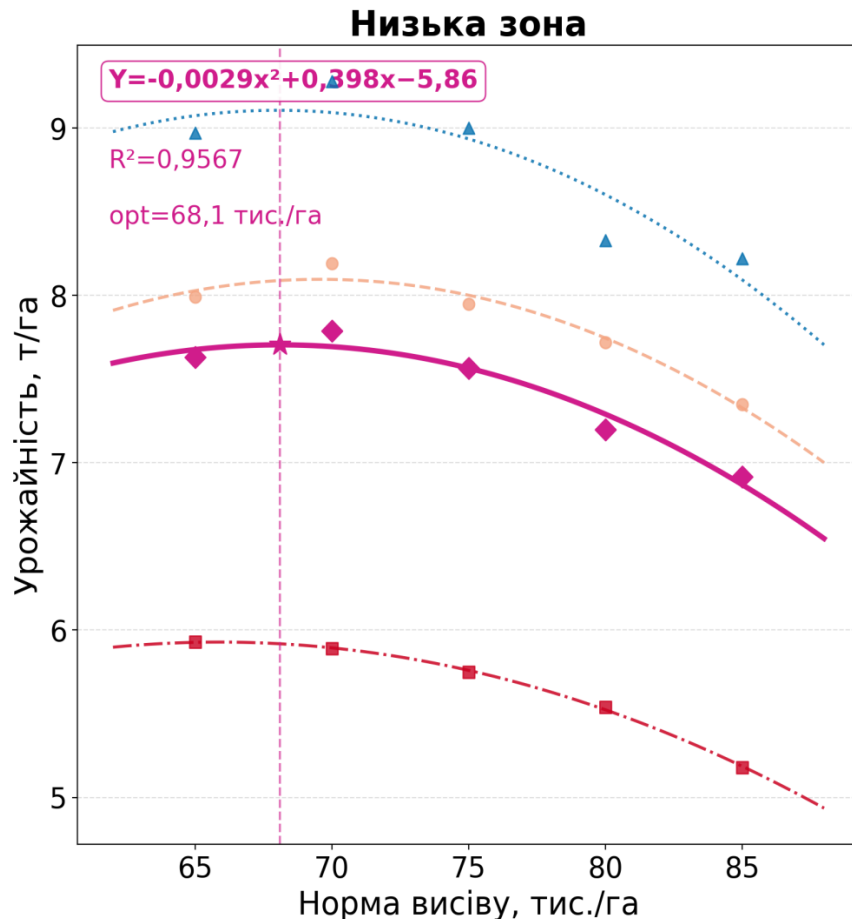


Рис. 4.29. Поліноміальні моделі залежності урожайності зерна кукурудзи ДКС 3939 у низькопродуктивній зоні та року досліджень (★ – оптимум середньої кривої)

Дані таблиці 4.18 показують, що оптимальна норма висіву для кукурудзи суттєво змінювалася залежно від зони продуктивності поля. У високій зоні продуктивності максимальна ефективність досягалася за норм висіву близько 80–84 тис./га. Саме тут були отримані і найвищі розрахункові показники урожайності, які в окремі роки перевищували 12,0 т/га. Це може свідчити про

те, що високопродуктивні ділянки поля здатні забезпечувати рослини достатньою кількістю ресурсів навіть за підвищеної густоти стояння.

Таблиця 4.18

Оптимальні норми висіву та урожайність на оптимумі для кукурудзи ДКС 3939 залежно від зони продуктивності поля

Зона продуктивності	2023 хopt / Yopt	2024 хopt / Yopt	2025 хopt / Yopt	Середнє хopt / Yopt	Рекомендована норма
Високопродуктивна	79,7 / 11,32	82,0 / 9,88	83,6 / 12,48	81,8 / 11,21	80 тис./га
Середньопродуктивна	75,8 / 9,81	76,5 / 7,84	75,5 / 11,05	75,9 / 9,56	76 тис./га
Низькокопродуктивна	69,6 / 8,10	65,9 / 5,93	68,0 / 9,11	68,1 / 7,70	68–70 тис./га

Примітка. хopt – оптимальна норма висіву (тис./га); Yopt – розрахункова урожайність на оптимумі (т/га). Для зони низької продуктивності рекомендовано діапазон 68–70 тис./га з вибором конкретного значення за економічним критерієм (вартість насіння).

У середньопродуктивній зоні продуктивності ситуація виглядала більш стабільною. Практично в усі роки оптимум знаходився поблизу 76 тис./га. При цьому відхилення в той чи інший бік супроводжувалося поступовим зниженням урожайності. Складається враження, що саме середньопродуктивна зона найкраще відображає класичний підхід до вибору стандартної норми висіву для кукурудзи. Низькокопродуктивна зона продуктивності показала зовсім іншу реакцію. Тут найкращі результати формувалися вже при значно нижчих густотах, у межах 68–70 тис./га. Подальше загушення не лише не покращувало урожайність, а в окремих випадках помітно її знижувало. Ймовірно, у таких умовах рослини швидше переходили у фазу дефіциту ресурсів. Саме тому для низькопродуктивної зони

доцільніше виглядає використання низьких норм висіву з урахуванням економічної ефективності та вартості насіння.

Висновки до четвертого розділу

1. Урожайність зерна кукурудзи ДКС 3939 суттєво диференціювалася як між зонами продуктивності, так і між роками досліджень. Середня врожайність за три роки становила: у високопродуктивній зоні – 10,70 т/га, у середньопродуктивній – 9,21 т/га, у низькопродуктивній – 7,42 т/га. Коефіцієнт варіації між роками зростав зі зниженням продуктивності зони – від 10,5% у високопродуктивній до 21,5% у низькопродуктивній, що підтверджує підвищену чутливість низькопродуктивних зон до погодних умов року і обґрунтовує потребу в диференційованому підході до норм висіву саме в таких умовах.

2. Реакція врожайності на норму висіву мала нелінійний параболічний характер у всіх зонах, але оптимум густоти суттєво відрізнявся між зонами. За результатами поліноміальної регресії оптимальна норма висіву становила: для високопродуктивної зони – 81,8 тис./га (прогнозована врожайність 11,21 т/га) для середньопродуктивної – 75,9 тис./га (9,56 т/га), для низькопродуктивної – 68,1 тис./га (7,70 т/га). Коефіцієнти детермінації моделей перевищували 0,90 у більшості варіантів, що свідчить про їхню добру відповідність фактичним даним.

3. Вологість зерна при збиранні визначалася насамперед зоною продуктивності – через різну тривалість природної дегідратації, зумовлену різними строками проходження фази воскової стиглості. Різниця між зонами за однакової норми висіву становила 4,1 відсоткового пункту і була статистично достовірною в усі роки. Норма висіву чинила менш виражений, але достовірний вплив: підвищення норми від 65 до 85 тис./га знижувало вологість зерна в середньому на 0,9–1,1 відсоткового пункту. Оскільки вологість при збиранні безпосередньо визначає витрати на сушіння, ці відмінності є вагомими складовими E_0 і впливають на підсумковий K_{ee} .

4. Якісні показники зерна демонстрували стійку диференціацію між зонами. Вміст крохмалю зростав від низько- до високопродуктивної зони (68,9 – 70,8 – 72,1%), тоді як вміст білка і жиру змінювалися у зворотному напрямку (білок 9,3 – 8,7 – 8,2%; жир 4,7 – 4,3 – 4,1% відповідно). Ці закономірності відображають ефект розбавлення білкових і жирових фракцій за вищого накопичення крохмалю у продуктивніших зонах. Вплив норми висіву на якісні показники був значно меншим і статистично менш значимим.

5. Показники якості побічної продукції також диференціювалися між зонами: у фазу V2–V4 вміст сухої речовини у вегетативній масі становив у середньому 30–31% у високопродуктивній зоні проти 22–24% у низькопродуктивній, вміст азоту – 4,5–4,6% проти 3,9–4,0%. У фазу R1 різниця між зонами ставала ще більш вираженою, а зі збільшенням норми висіву вміст сухої речовини і азоту у листках знижувався в усіх зонах, що відображало посилення конкурентного стресу за загущення.

6. Кореляційний аналіз підтвердив що найтісніший зв'язок з урожайністю мали: зона продуктивності ($r = +0,91$), вміст крохмалю ($r = +0,91$), маса 1000 зерен ($r = +0,91$), натура зерна ($r = +0,90$), вміст азоту у рослинах у фазу V2–V4 ($r = +0,86$) і висота рослин у фазу R1 ($r = +0,85$). Зворотні зв'язки зафіксовані для вмісту жиру ($r = -0,82$) і білка ($r = -0,81$). Це підтверджує, що рання оцінка стану рослин і агрохімічних умов зони дозволяє прогнозувати кінцеву продуктивність і є основою для обґрунтування диференційованих агрономічних рішень.

7. Математичне моделювання дозволило встановити зонально-специфічні оптимуми норм висіву і рекомендувати: для високопродуктивної зони – 80 тис./га, для середньопродуктивної – 76 тис./га, для низькопродуктивної – 68–70 тис./га. Застосування єдиної рівномірної норми по всьому полю призводить до систематичного відхилення від оптимуму в кожній зоні, що знижує як урожайність, так і K_{ee} – і підтверджує агрономічну та енергетичну доцільність диференційованого висіву.

Список літератури до четвертого розділу

1. Bűdi K., Bűdi A., Tarcsi Á., Milics G. Variable Rate Seeding and Accuracy of Within-Field Hybrid Switching in Maize (*Zea mays* L.). *AgroNomy*. 2025. Vol. 15, No. 3. Article 718. DOI: 10.3390/agroNomy15030718.
2. Cai F., Mi N., Ming H., Zhang Y., Zhang H., Zhang S., Zhao X., Zhang B. Responses of dry matter accumulation and partitioning to drought and subsequent rewatering at different growth stages of maize in Northeast China. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1110727. DOI: 10.3389/fpls.2023.1110727.
3. Correndo A.A., Fernandez J.A., Vara Prasad P.V., Ciampitti I.A. Do Water and Nitrogen Management Practices Impact Grain Quality in Maize? *AgroNomy*. 2021. Vol. 11, No. 9. Article 1851. DOI: 10.3390/agroNomy11091851.
4. Du X., Wang Z., Lei W., Kong L. Increased planting density combined with reduced nitrogen rate to achieve high yield in maize. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 358. DOI: 10.1038/s41598-020-79633-z.
5. Du Z., Li F., Wang D., Jin X., Diao M. Corn variable-rate seeding decision based on gradient boosting decision tree model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 200. Article 107025. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107025.
6. Fang H., Fu X., Ge H., Zhang A., Shan T., Wang Y., Li P., Wang B. Genetic basis of maize kernel oil-related traits revealed by high-density SNP markers in a recombinant inbred line population. *BMC Plant Biology*. 2021. Vol. 21, No. 1. Article 344. DOI: 10.1186/s12870-021-03089-0.
7. Galindo F.S., Strock J.S., Pagliari P.H. Nutrient Accumulation Affected by Corn Stover Management Associated with Nitrogen and Phosphorus Fertilization. *Agriculture*. 2021. Vol. 11, No. 11. Article 1118. DOI: 10.3390/agriculture11111118.
8. Guo H., Yu X., Gao J., Ma D., Hu S., Wang X. Grain Dehydration Characteristics of Old and Modern Maize Hybrids and Their Response to Different

Planting Densities. *AgroNomy*. 2022. Vol. 12, No. 7. Article 1640. DOI: 10.3390/agroNomy12071640.

9. Hamoda A., Dabbour M.I. Optimizing corn productivity: Hybrid and intra-row spacing effects on growth, yield, and nutritional quality. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 32601. DOI: 10.1038/s41598-025-19439-z.

10. Konuskan O., Bozdogan Konuskan D., Barutçular C., Turan N., Elsabagh A. Planting densities impart variance impact on kernel properties and some quality parameters for some maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Pakistan Journal of Botany*. 2022. Vol. 54, No. 2. DOI: 10.30848/PJB2022-2(18).

11. Lacasa J., Gaspar A., Hinds M., Don S.J., Berning D., Ciampitti I.A. Bayesian approach for maize yield response to plant density from both agroNomic and ecoNomic viewpoints in North America. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article 15948. DOI: 10.1038/s41598-020-72693-1.

12. Li L., Ming B., Gao S., Wang K., Hou P. et al. A regional analysis model of maize kernel moisture. *AgroNomy Journal*. 2021. Vol. 113, No. 2. P. 1467–1479. DOI: 10.1002/agj2.20532.

13. Li L., Ming B., Xie J., Gao S., Wang K. et al. Difference in corn kernel moisture content between pre- and post-harvest. *Journal of Integrative Agriculture*. 2021. Vol. 20, No. 7. P. 1775–1782. DOI: 10.1016/S2095-3119(20)63245-2.

14. Li L., Ming B., Xie R., Wang K., Hou P. et al. The stability and variability of maize kernel moisture content at physiological maturity. *Crop Science*. 2021. Vol. 61, No. 1. P. 704–714. DOI: 10.1002/csc2.20289.

15. Liu S., Wang L., Chang L., Khan I., Nadeem F., Rehman A., Suo R. Evaluating the influence of straw mulching and intercropping on nitrogen uptake, crop growth, and yield performance in maize and soybean. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1280382. DOI: 10.3389/fpls.2023.1280382.

16. Luo M., Lu B., Shi Y., Zhao Y., Liu J., Zhang C., Wang Y., Liu H., Shi Y., Fan Y., Xu L., Wang R., Zhao J. Genetic basis of the oil biosynthesis in ultra-high-oil maize grains with an oil content exceeding 20%. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1168216. DOI: 10.3389/fpls.2023.1168216.

17. Medina-Cuéllar S.E., Tirado-González D.N., Portillo-Vázquez M., Orozco-Cirilo S., López-Santiago M.A., Vargas-Canales J.M., Medina-Flores C.A., Salem A.Z.M. Optimal Nitrogen Fertilization to Reach the Maximum Grain and Stover Yields of Maize (*Zea mays* L.): Tendency Modeling. *AgroNomy*. 2021. Vol. 11, No. 7. Article 1354. DOI: 10.3390/agroNomy11071354.
18. Munnaf M.A., Haesaert G., Mouazen A.M. Site-specific seeding for maize production using management zone maps delineated with multi-sensors data fusion scheme. *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 220. Article 105377. DOI: 10.1016/j.still.2022.105377.
19. Nieweglowski M., Sikorska A., Gugala M., KrasNodebska E., Zarzecka K. The effect of nitrogen fertilization and the use of biostimulators on the chemical composition of grains of two varieties of corn (*Zea mays* L.). *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, No. 12. Article e0311560. DOI: 10.1371/journal.pone.0311560.
20. Ochieng' J.A., Ndiso J.B., Wakoli C.N., Nyalala S.P.O., Wamari J.O., Kisinyo P., Opala P.A., Muthomi J.W., Kimani J.M. Optimizing Maize Yield, Nitrogen Efficacy and Grain Protein Content under Different N Forms and Rates. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2021. Vol. 21. P. 1867–1881. DOI: 10.1007/s42729-021-00486-0.
21. Sun S., Huang Z., Liu H., Xu J., Zheng X., Xue J., Li S. Response of Grain Yield to Planting Density and Maize Hybrid Selection in High Latitude China – A Multisource Data Analysis. *AgroNomy*. 2023. Vol. 13, No. 5. Article 1333. DOI: 10.3390/agroNomy13051333.
22. Tian P., Liu J., Zhao Y., Huang Y., Lian Y., Wang Y., Ye Y. Nitrogen rates and plant density interactions enhance radiation interception, yield, and nitrogen use efficiencies of maize. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 974714. DOI: 10.3389/fpls.2022.974714.
23. Wang F., Wang L., Yu X., Gao J., Ma D., Guo H., Zhao H. Effect of Planting Density on the Nutritional Quality of Grain in Representative High-Yielding Maize Varieties from Different Eras. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, No. 9. Article 1835. DOI: 10.3390/agriculture13091835.

24. Yan S., Weng B., Jing L., Bi W. Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1118131. DOI: 10.3389/fpls.2023.1118131.
25. Yan S.-L., Wang Q.-M., Chai Q., Yin W., Fan Z.-L., Hu F.-L., Liu Z.-P., Wei J.-G. Grain yield and quality of maize in response to dense density and intercropped peas in oasis irrigated areas. *Acta AgroNomica Sinica*. 2025. Vol. 51, No. 6. P. 1665–1675. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2025.43051.
26. Yang D., Lin Y., Li J., Zheng H., Zhang Y. et al. Grain Dehydration and Grain-Filling Characteristics of Different Maize Varieties in Heilongjiang. *AgroNomy*. 2025. Vol. 15, No. 6. Article 1356. DOI: 10.3390/agroNomy15061356.
27. Yin P.-J., Wang X.-L., Wu Y.-W., Liu F., Tao Y., Liu Q.-L., Lan T.-Q., Feng D.-J., Kong F.-L., Yuan J.-C. Effects of nitrogen fertilizer on protein accumulation in basal-middle and apical kernels of different low nitrogen tolerant maize hybrids. *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Article 1526026. DOI: 10.3389/fpls.2025.1526026.
28. Zhang G., Cui C., Lv Y., Wang X., Wang X., Zhao D., Hu F., Wen X., Han J., Liao Y. Is it necessary to increase the maize planting density in China? *European Journal of AgroNomy*. 2024. Vol. 159. Article 127235. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127235.
29. Zhang H., Zhang C., Sun P., Jiang X., Xu G., Yang J. Optimizing planting density and nitrogen application to enhance profit and nitrogen use of summer maize in Huanghuaihai region of China. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 2704. DOI: 10.1038/s41598-022-06059-0.
30. Zhang J., Wang X., Li Y., Yu Z., Zhang R., Yin B., Wang H. A Meta-Analysis of the Effects of Increased Planting Density on Maize Yield in Northeast China. *Plants*. 2026. Vol. 15, No. 4. Article 544. DOI: 10.3390/plants15040544.
31. Zhang X., Wang M., Guan H., Wen H., Zhang C., Dai C., Wang J., Pan B., Li J., Liao H. Genetic dissection of QTLs for oil content in four maize DH populations. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1174985. DOI: 10.3389/fpls.2023.1174985.

32. Zhang Y., Xu Z., Li J., Wang R. Optimum Planting Density Improves Resource Use Efficiency and Yield Stability of Rainfed Maize in Semiarid Climate. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Article 752606. DOI: 10.3389/fpls.2021.752606.

33. Гангур В.В., Пелих М.А. Вплив строків сівби та густоти рослин на урожайність гібридів кукурудзи в умовах Лівобережного Лісостепу. *Scientific Progress & InNovations*. 2025. Т. 28, № 1. С. 75–80. DOI: 10.31210/spi2025.28.01.13.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ТА БІОЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ ЗА ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИХ НОРМ ВИСІВУ НАСІННЯ

Попередні розділи цієї роботи сформували послідовну ситуацію: зона продуктивності поля є домінуючим фактором, який визначає і морфологічний розвиток рослин, і тривалість фенологічних фаз, і структуру врожаю, і його якість. Норма висіву – другий за силою впливу фактор – дає змогу частково скоригувати реакцію посіву на ресурсний потенціал зони, але лише в межах того, що ця зона здатна реалізувати. Тепер постає логічне підсумкове питання: як ці агрономічні закономірності відображаються в економічних і енергетичних показниках технології? Урожайність, навіть найвища сама по собі ще не є достатнім критерієм оцінки технології. Важливо, якою ціною вона досягається. У реальному господарстві кожне підвищення норми висіву – це додаткові витрати на насіння. Кожна тонна вологого зерна – це витрати на сушіння, які прямо залежать від того, в якій зоні і за якої густоти сформувався врожай. Кожна зона продуктивності має власне співвідношення між вкладеними ресурсами і отриманим результатом. Тому оцінка диференційованого висіву лише через урожайність є неповною – вона не показує, чи є підвищена норма виправданою з точки зору витрат і чи дає вона реальний приріст прибутку або енергетичної ефективності. Саме тому в цьому розділі результати трирічного польового дослідження оцінюються через два взаємодоповнюючих виміри. Перший – економічний: виробничі витрати, витрати на сушіння, валовий дохід, прибуток і рентабельність залежно від норми висіву і зони продуктивності. Другий – біоенергетичний: антропогенні енерговитрати (E_o), енергія врожаю (E_v), енергетичний прибуток ($E_{прб}$), коефіцієнт енергетичної ефективності (K_{ee}) і коефіцієнт використання фотосинтетично активної радіації (КФАР). Економічний аналіз відповідає на питання, яка норма висіву є найбільш вигідною в поточних ринкових умовах. Біоенергетичний – на питання, яка норма забезпечує найкраще перетворення антропогенної енергії у врожай, незалежно від кон'юнктури цін. Ці два

оптимуми можуть збігатися, а можуть розходитися – і сам факт їхнього порівняння є важливим науковим результатом, оскільки дає змогу оцінити стійкість агрономічного рішення до цінових коливань.

Для кожної зони продуктивності зіставлення економічного і біоенергетичного оптимумів дозволяє сформулювати зонально-специфічні рекомендації щодо норм висіву, які враховують не лише потенціал урожайності, але й ефективність використання ресурсів – фінансових та енергетичних. Це є практичним виходом дослідження і безпосередньою основою для розроблення рекомендацій із застосування диференційованого висіву насіння кукурудзи в умовах Чернігівського регіону.

5.1. Аналіз економічної ефективності технології вирощування кукурудзи за диференційованого висіву насіння

Дані таблиці 5.1 показують, що найбільший економічний ефект був отриманий у зоні високої продуктивності. Саме тут формувалися найвищі показники доходу та прибутку. Найкращий результат забезпечила норма висіву 80 тис./га, де прибуток становив 44 925 грн/га, що на 4108 грн/га більше порівняно з контрольним варіантом. Навіть при дещо більших витратах на насіння та сушіння саме цей варіант виявився найбільш вигідним. Високопродуктивна зона краще компенсувала додаткові витрати за рахунок вищої урожайності.

Таблиця 5.1.

Оцінка економічної ефективності технології вирощування кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля (середнє за 2023–2025 рр.)

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	Витрати виробн., грн/га	Витрати сушки, грн/га	Дохід, грн/га	Прибуток, грн/га	Δ прибутку, грн/га	Δ прибутку, %
Високої	65	18394	8613	62202	35195	-5622	-20,2%
	70	18722	8852	66213	38639	-2178	-7,8%
	75	19049	8766	68633	40817	—	—
	80	19377	8915	73217	44925	+4108	+14,8%
	85	19704	8131	70224	42389	+1572	+5,7%
Середньої	65	18394	7373	55645	29877	-5341	-20,4%
	70	18722	7397	59019	32900	-2319	-8,9%
	75	19049	7107	61375	35219	—	—
	80	19377	6423	59783	33984	-1235	-4,7%
	85	19704	5814	57300	31782	-3437	-13,1%
Низької	65	18394	4175	48578	26008	+659	+2,9%
	70	18722	4026	49596	26849	+1499	+6,6%
	75	19049	3797	48196	25349	—	—
	80	19377	3447	45840	23016	-2333	-10,2%
	85	19704	3156	44057	21198	-4152	-18,2%

Примітка. Δ – відхилення прибутку від контролю своєї зони. Витрати виробництва перераховано по курсу НБУ: 2023р. – 36,6 грн/\$; 2024р. – 40,5 грн/\$; 2025р. – 41,8 грн/\$. Ціна реалізації без ПДВ: 2023р. – 5000 грн/т; 2024р. – 5800 грн/т; 2025р. – 8300 грн/т. Вартість сушки: 2023р. – 70 грн/тонно-%; 2024р. – 78 грн/тонно – %; 2025р. – 80 грн/тонно – %. Базисна вологість – 14%.

У середньопродуктивній зоні продуктивності ситуація виглядала більш стримано. Тут максимальний прибуток був отриманий при контрольній нормі 75 тис./га і становив 35 219 грн/га. Зрідження або загущення посівів переважно

призводило до зниження економічної ефективності. При цьому особливо помітним було зменшення прибутку при нормах 65 та 85 тис./га. Середньопродуктивна зона виявилась найбільш чутливою до відхилення від оптимальної густоти стояння рослин.

У низькопродуктивній зоні продуктивності ситуація була зовсім іншою. Тут економічно доцільнішими виявилися знижені норми висіву. Найвищий прибуток формувався при нормі 70 тис./га і становив 26 849 грн/га, що на 6,6% перевищувало контроль. Подальше загушення посівів помітно погіршувало результат. Наприклад, при нормі 85 тис./га прибуток був найнижчим серед усіх варіантів дослідів. У низькопродуктивній зоні додаткові витрати на насіння вже не компенсувалися приростом урожайності, а дефіцит ресурсів лише посилювався.

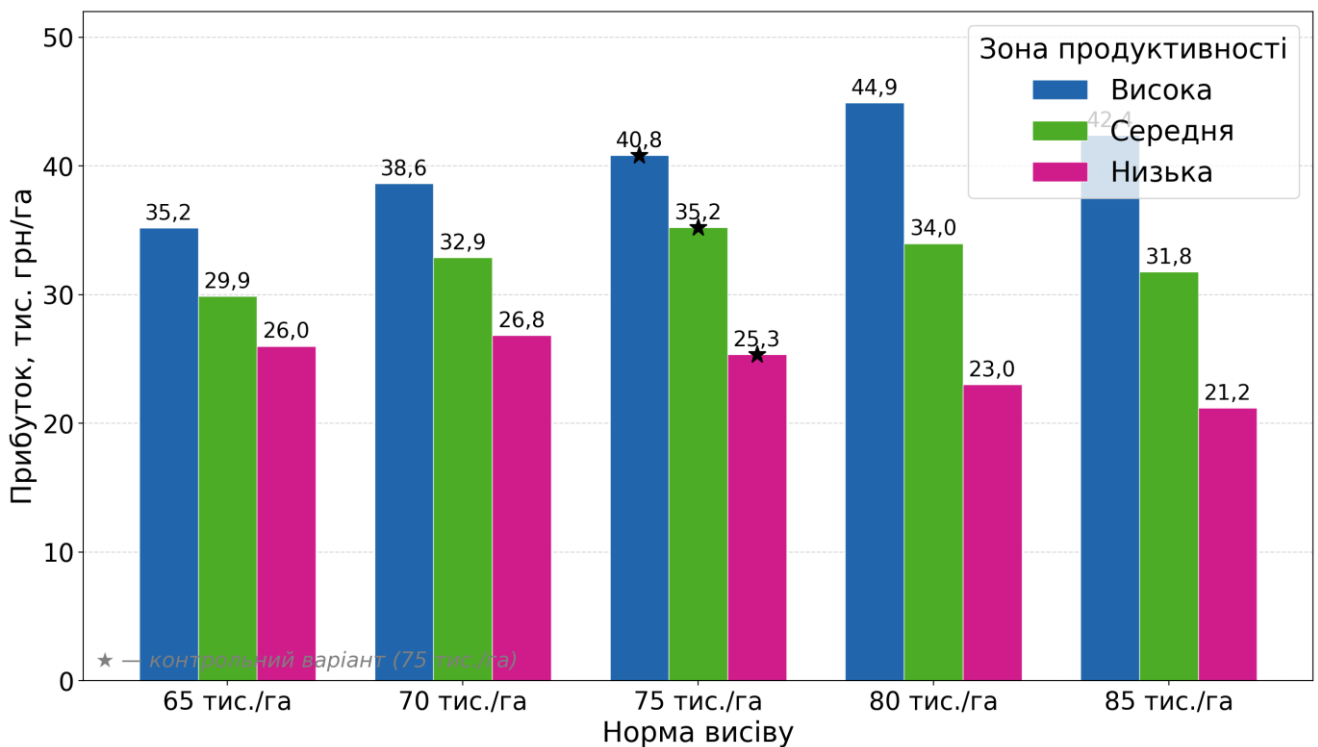


Рисунок 5.1. Прибуток від вирощування кукурудзи ДКС 3939 залежно від норми висіву та зони продуктивності поля (середнє за 2023–2025 рр., тис. грн/га; ★ – контрольний варіант 75 тис./га)

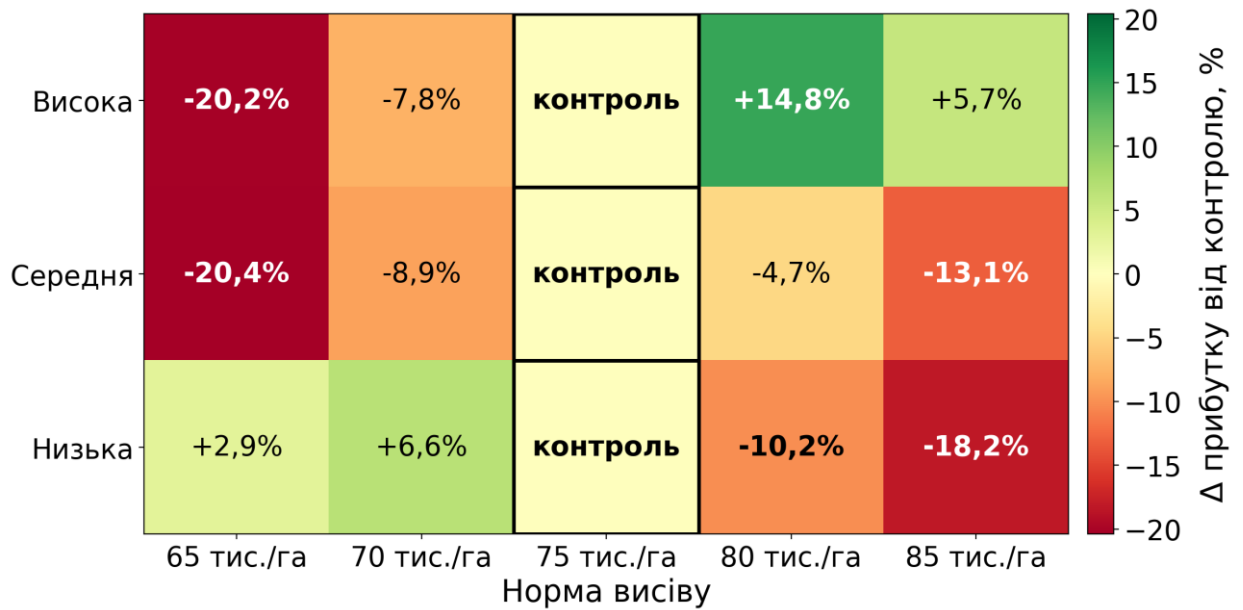


Рисунок 5.2. Відхилення прибутку від контрольного варіанту (75 тис./га) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля (середнє за 2023–2025 рр., %)

На рисунку 5.1 добре помітно, що реакція прибутку на зміну норми висіву суттєво відрізнялася між зонами продуктивності. У високій зоні прибуток зростав разом із підвищенням норми висіву до 80 тис./га, після чого починалося незначне зниження. У середньопродуктивній зоні найкращий результат формувався поблизу контрольного варіанту 75 тис./га. Низькопродуктивна зона, навпаки, краще реагувала на помірно знижені норми висіву, а загушення посівів супроводжувалося помітним падінням прибутковості.

Рисунок 5.2 більш наочно показує відхилення прибутку від контрольного варіанту. Зелені кольори відповідають збільшенню прибутку, а червоні – його зниженню. Добре видно, що для високої зони найбільш вигідним було загушення до 80 тис./га, тоді як для низької зони позитивний ефект забезпечували лише знижені норми висіву 65–70 тис./га. Це ще раз підтверджує, що економічно оптимальна густота рослин на пряму залежить від ресурсного потенціалу конкретної ділянки поля.

5.2. Оцінка біоенергетичної ефективності технології вирощування кукурудзи за диференційованого висіву насіння

Таблиця 5.3.

Біоенергетична оцінка технології вирощування кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля (середнє за 2023–2025 рр.)

Зона продуктивності	Норма висіву, тис./га	Урожайність продукції, т/га		Вегетац. період, діб	Енергоємність урожаю, ГДж/га			Антропогенні енерговитрати (Е _о), ГДж/га	Енергетичний прибуток, ГДж/га	КФАР, %	К _{еє}	К _{еє} (+сушіння зерна)
		Основна	Побічна		Зерно	Побічна	Загальна					
Високої	65	9,77	14,65	114	143,6	124,5	268,1	37,5	230,62	1,91	7,14	6,04
	70	10,40	15,60	112	152,8	132,6	285,4	37,5	247,99	2,07	7,60	6,41
	75	10,78	16,17	110	158,4	137,4	295,9	37,6	258,46	2,18	7,87	6,64
	80	11,50	17,25	108	169,0	146,6	315,6	37,6	278,10	2,37	8,39	7,06
	85	11,03	16,54	107	162,1	140,5	302,7	37,6	265,31	2,30	8,04	6,87
Середньої	65	8,74	13,11	113	128,4	111,4	239,9	37,5	202,48	1,72	6,39	5,53
	70	9,27	13,90	111	136,2	118,1	254,4	37,5	216,99	1,86	6,77	5,86
	75	9,64	14,46	108	141,7	122,9	264,6	37,6	227,00	1,99	7,04	6,12
	80	9,39	14,09	105	138,0	119,7	257,7	37,6	220,30	1,99	6,85	6,03
	85	9,00	13,50	103	132,30	114,7	247,0	37,6	209,38	1,95	6,56	5,85
Низької	65	7,63	11,45	95	112,16	97,3	209,4	37,5	171,92	1,79	5,58	5,13
	70	7,79	11,69	94	114,51	99,3	213,8	37,5	176,19	1,84	5,69	5,25
	75	7,57	11,36	94	111,28	96,5	207,8	37,6	170,10	1,79	5,53	5,12
	80	7,20	10,80	93	105,84	91,8	197,4	37,6	159,90	1,72	5,25	4,89
	85	6,92	10,38	93	101,72	88,2	189,9	37,6	152,24	1,66	5,04	4,73

Примітка. Ев – енергія урожаю (ГДж/га); Е_о – антропогенні енерговитрати (ГДж/га); Е_{приб} – енергетичний прибуток (Ев–Е_о), Енергетичні еквіваленти: зерно кукурудзи – 14,7 МДж/кг; побічна продукція – 8,5 МДж/кг; коефіцієнт виходу побічної – 1,5, Антропогенні витрати: насіння – 17,5 МДж/кг; дизпаливо – 42,7 МДж/кг (~95 кг/га); карбамід – 57,8 МДж/кг (200 кг/га); діаміфоска – 13,8 МДж/кг (150 кг/га); 33Р – 150,0 МДж/кг (~6,5 кг/га); праця – 0,21 МДж/люд-год (~35 люд-год/га); техніка – 1,2 ГДж/га, Витрати на сушіння зерна розраховані за питомим енергоспоживанням 5,2 МДж/кг випареної вологи (Jokiniemi et al., 2011); кількість знятої вологи визначена з урахуванням вологого базису: $m = (W - 14) / (100 - 14) \times 1000$ кг/т, де W – фактична вологість зерна при збиранні, %; базисна вологість – 14%. Середньодобовий ФАР – 12,33 МДж/м²/добу (317,0 W/m²). Тривалість вегетаційного періоду – від сходів до воскової стиглості (R5). КФАР: <1,0% – низькопродуктивна; 1,0–1,5% – середньопроодуктивна; >1,5% – високопродуктивна. К_{еє}: <4 – неефективна; 4–6 – середньопроодуктивна; 6–8 – високопродуктивна; >8 – дуже високопродуктивна

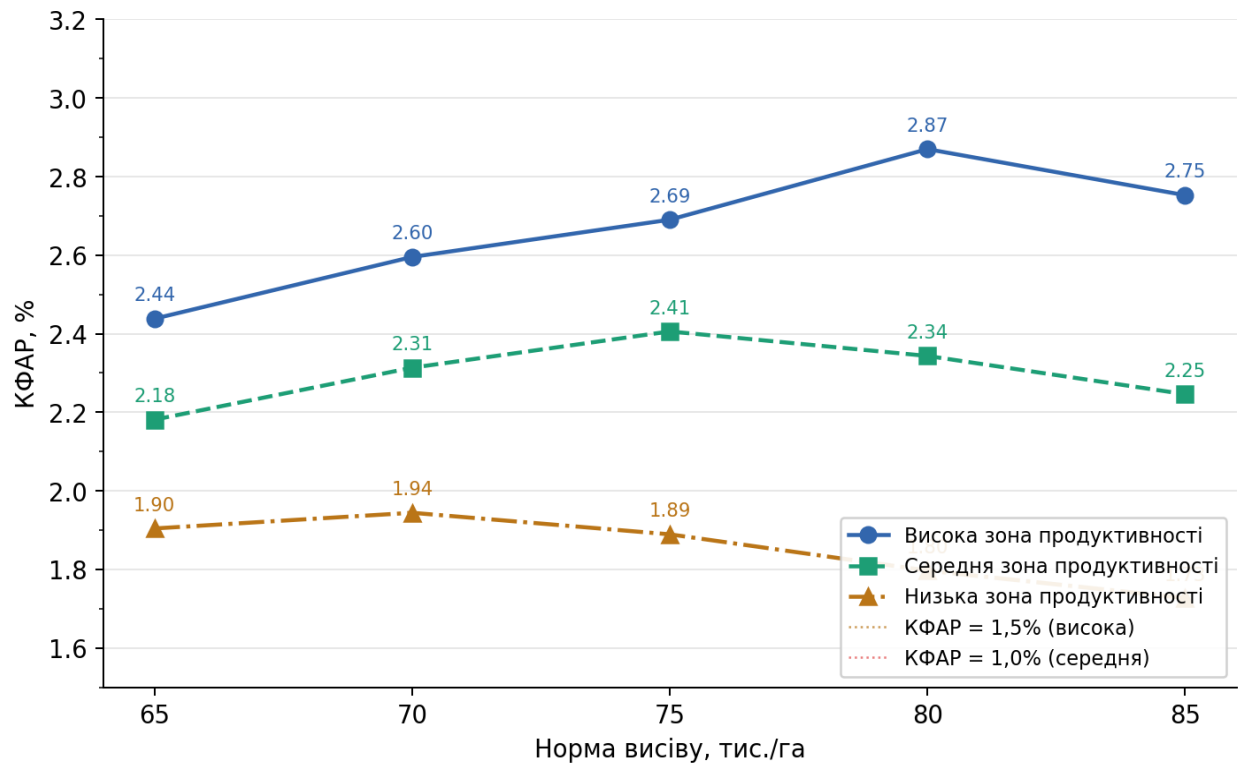


Рис. 5.3. Коефіцієнт використання фотосинтетично активної радіації (КФАР, %) посівами кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля (середнє за 2023–2025 рр.)

Дані таблиці 5.3 показують, що найбільша енергоємність урожаю формувалася у високій зоні продуктивності. Тут зі збільшенням норми висіву до 80 тис./га відбувалося поступове зростання енергії, накопиченої урожаєм, а також енергетичного прибутку. Максимальний показник енергетичного прибутку становив 278,1 ГДж/га. При подальшому загущенні до 85 тис./га спостерігалось незначне зниження ефективності. Складається враження, що саме зона продуктивності визначала здатність посіву ефективно перетворювати сонячну енергію в біомасу.

У середньопродуктивній зоні продуктивності найкращі результати були отримані при нормі 75 тис./га. Тут коефіцієнт енергетичної ефективності досягав 7,04, що відповідає високому рівню ефективності використання антропогенної енергії. При цьому як зрідження, так і загущення посівів супроводжувалося певним погіршенням показників. У низькопродуктивній зоні продуктивності ситуація була більш обмеженою. Навіть при найкращих варіантах коефіцієнт енергетичної ефективності не перевищував 5,69.

Ймовірно, дефіцит ресурсного забезпечення не дозволяв рослинам повністю реалізувати потенціал підвищених норм висіву.

На рисунку 5.3 добре помітно, що коефіцієнт використання фотосинтетично активної радіації зростає разом із покращенням умов зони продуктивності. У високій зоні КФАР поступово збільшувався від 1,91 до 2,37%, досягаючи максимуму при нормі 80 тис./га. У середньопродуктивній зоні значення були нижчими, але також залишалися на високому рівні. Низькопродуктивна зона продуктивності демонструвала найменшу ефективність використання ФАР. Це може свідчити про те, що частина сонячної енергії в менш продуктивних умовах не перетворювалася у врожай через нестачу вологи та елементів живлення.

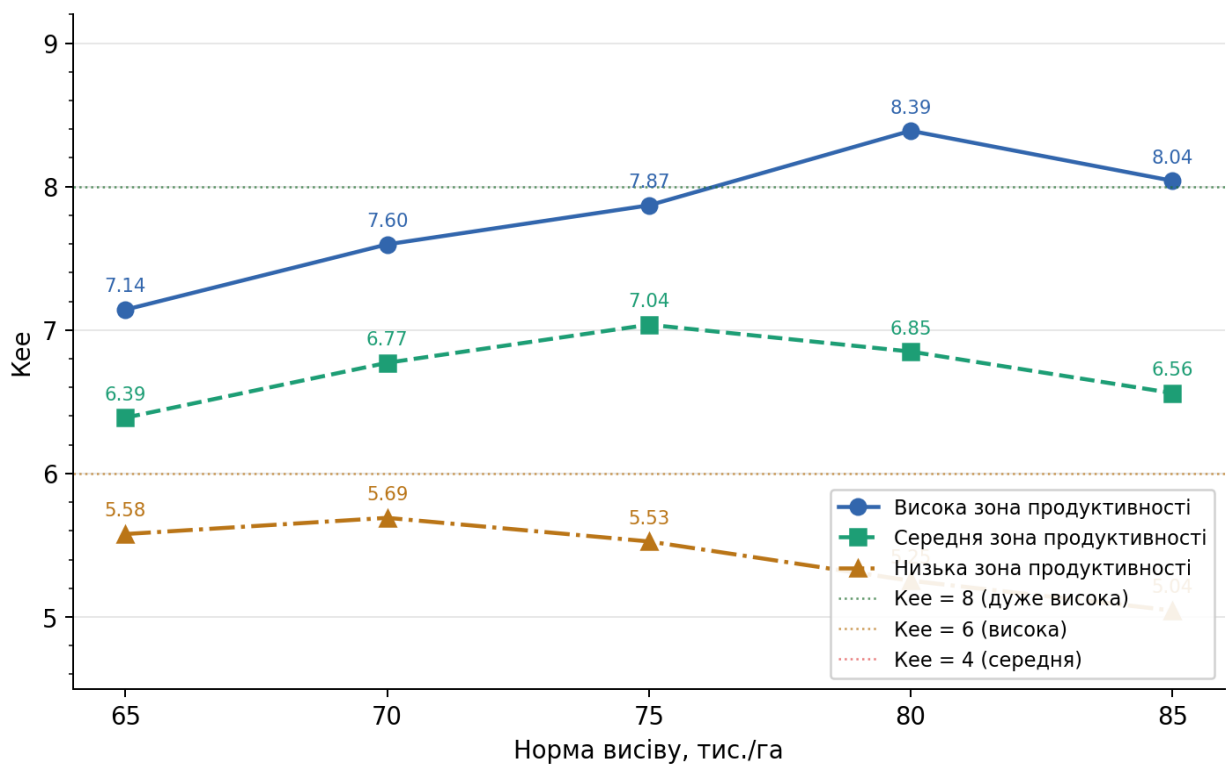


Рис. 5.4. Коефіцієнт енергетичної ефективності (Кее) технології вирощування кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) залежно від норми висіву та зони продуктивності поля (середнє за 2023–2025 рр.)

Рисунок 5.4 відображає зміну коефіцієнта енергетичної ефективності залежно від норми висіву та зони продуктивності поля. Найвищий показник Кее був отриманий у високопродуктивній зоні при нормі 80 тис./га, де він

перевищив значення 8 і відповідав дуже високому рівню енергетичної ефективності. У середньопродуктивній зоні всі варіанти залишалися в межах високої ефективності, хоча максимум також формувався поблизу контрольної норми висіву. У низькопродуктивній зоні продуктивності значення K_{ee} були найнижчими, а при загущенні до 80–85 тис./га спостерігалось поступове зниження ефективності використання енергії.

Висновки до п'ятого розділу

1. Економічна ефективність технології вирощування кукурудзи суттєво диференціювалася між зонами продуктивності і залежала від норми висіву. Найвищий прибуток у середньому за три роки досліджень сформувався у високопродуктивній зоні за норми 80 тис./га – 44 925 грн/га, що на 4108 грн/га, або 14,8%, перевищило контрольний варіант. У середньопродуктивній зоні максимальний прибуток забезпечила контрольна норма 75 тис./га – 35 219 грн/га, а відхилення як у бік зрідження, так і загущення призводило до його зниження. У низькопродуктивній зоні найкращим виявився варіант із нормою 70 тис./га – 26 849 грн/га, що на 6,6% перевищило контроль, тоді як загущення до 85 тис./га давало найгірший економічний результат у всьому досліді.

2. Витрати на сушіння зерна виявилися важливою змінною статтею економічного балансу, яка суттєво залежала від зони продуктивності і меншою мірою від норми висіву. У високопродуктивній зоні витрати на сушіння були найбільшими через вищу вологість зерна при збиранні, тоді як у низькопродуктивній зоні – мінімальними внаслідок раннього завершення вегетації. Це підтверджує, що оптимальна норма висіву з економічної точки зору визначається не лише урожайністю, а й сукупністю витрат, включно зі сушінням.

3. Біоенергетична оцінка підтвердила зонально-специфічний характер оптимуму норми висіву. Найвищий K_{ee} зафіксовано у високопродуктивній зоні за норми 80 тис./га – 8,39, що відповідає дуже

високому рівню ефективності використання антропогенної енергії. У середньопродуктивній зоні максимальний K_{ee} становив 7,04 за контрольної норми 75 тис./га – рівень високої ефективності. У низькопродуктивній зоні навіть за найкращого варіанту (70 тис./га, $K_{ee} = 5,69$) значення залишалося в межах середньої ефективності, а загущення до 85 тис./га знижувало K_{ee} до 5,04.

4. КФАР зростав зі збільшенням продуктивності зони і досягав максимуму у високопродуктивній зоні за норми 80 тис./га – 2,37%, що відповідає високому рівню використання сонячної радіації. У середньопродуктивній зоні значення КФАР були нижчими, але також залишалися на рівні, що характеризує ефективне використання ФАР. У низькопродуктивній зоні КФАР не перевищував 1,84%, що відображає системне обмеження фотосинтетичної продуктивності через дефіцит ресурсів, незалежно від норми висіву.

5. Зіставлення економічного і біоенергетичного оптимумів норм висіву показало їхній збіг для всіх трьох зон: висока зона – 80 тис./га, середньопродуктивна – 75–76 тис./га, низькопродуктивна – 68–70 тис./га. Це свідчить про структурну узгодженість обох критеріїв оцінки і підтверджує, що зонально диференційований висів є оптимальним одночасно за економічними та енергетичними показниками, а не лише за урожайністю.

6. Застосування єдиної рівномірної норми висіву 75 тис./га по всьому полю є субоптимальним рішенням для двох із трьох зон: у високопродуктивній зоні воно недовикористовує ресурсний потенціал і недодає 4108 грн/га прибутку та 0,52 одиниці K_{ee} , тоді як у низькопродуктивній – перевищує оптимум, знижуючи прибуток на 1499 грн/га і K_{ee} на 0,16 одиниці порівняно з нормою 70 тис./га. Таким чином диференційований висів із нормами 80 / 75 / 70 тис./га для високо-, середньо- і низькопродуктивної зон забезпечує одночасне підвищення як економічної віддачі, так і ефективності використання антропогенної енергії на рівні поля в цілому.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що зона проведення досліджень характеризується вираженою агроландшафтною мозаїчністю, зумовленою просторовим чергуванням дерново-підзолистих ґрунтів, сірих лісових ґрунтів і опідзолених чорноземів. Між зонами продуктивності зафіксовано достовірну диференціацію агрохімічних і фізичних властивостей ґрунту: рН змінювався від 4,93 у низькопродуктивній зоні до 6,30 у високопродуктивній, вміст гумусу – від 1,0 до 2,3%, ємність катіонного обміну – від 5,03 до 11,07 смоль/кг. Твердість ґрунту у шарі 30–35 см у низькопродуктивній зоні перевищувала аналогічний показник високопродуктивної зони майже у 1,7 разу. Ці відмінності є структурною основою для диференційованого управління нормою висіву.

2. Гідротермічні умови вегетаційних періодів 2023–2025 років суттєво відрізнялися між собою, що забезпечило широкий діапазон агрокліматичних сценаріїв для оцінки технології. Найбільш посушливим виявився 2024 рік (ГТК = 0,55), найбільш сприятливим за формуванням урожаю – 2025 рік (ГТК = 0,96), тоді як 2023 рік посідав проміжне положення (ГТК = 1,05). Спільною закономірністю для всіх сезонів був дефіцит вологи у серпні-вересні, який обмежував налив зерна незалежно від норми висіву.

3. Фактична густота стояння рослин на момент збирання систематично відрізнялася між зонами продуктивності. Середнє відносне відхилення від планової норми висіву становило 2,8% у високопродуктивній зоні, 3,6% – у середньопродуктивній і 5,8% – у низькопродуктивній. Втрати рослин у низькопродуктивній зоні майже вдвічі перевищували аналогічний показник для високопродуктивної і були зумовлені не технікою сівби, а системним стресовим впливом умов зони – ущільненням ґрунту і дефіцитом поживних речовин. Це обґрунтовує доцільність коригування планової норми висіву в низькопродуктивних зонах з урахуванням прогнозованих втрат.

4. Зона продуктивності виявилась домінуючим фактором формування тривалості вегетаційного циклу кукурудзи. Різниця у загальній

тривалості вегетації від сходів до воскової стиглості між високо- і низькопродуктивними зонами становила 18,5 доби, тоді як між крайніми нормами висіву – лише 6,5 доби. У низькопродуктивній зоні спостерігалось прискорення вегетативних фаз і суттєве скорочення підперіоду наливу зерна (R1–R3 – в середньому на 9,2 доби порівняно з високопродуктивною зоною). Збільшення норми висіву подовжувало інтервал між викиданням волоті і цвітінням від 9,2 до 13,4 доби, підвищуючи ризик неповного запліднення при загущенні понад оптимум.

5. Висота рослин у фазу цвітіння мала параболічну залежність від норми висіву з максимумом при 80 тис./га, однак вплив зони продуктивності виявився значно сильнішим: різниця між середніми значеннями висоти у високо- та низькопродуктивних зонах становила 59,1 см, тоді як між крайніми нормами висіву – не більше 12,9 см. Розрив між зонами зростав зі збільшенням норми висіву, досягаючи 72,0 см при 85 тис./га, що підтверджує агрономічну недоцільність загущення в ресурсно обмежених умовах.

6. Структурні показники врожаю – кількість рядів зерен, кількість зерен у рядку, маса 1000 зерен і натура – демонстрували виражену диференціацію між зонами, причому зональний фактор переважав над нормою висіву. Різниця між зонами за масою 1000 зерен становила в середньому 45,8 г (15,7%), за натурою – 38,6 г/л. Максимальна кількість зерен у початку зафіксована у комбінації «високопродуктивна зона × 65 тис./га» – 685 шт., мінімальна – «низькопродуктивна зона × 85 тис./га» (448 шт.), різниця між крайніми комбінаціями становила 237 зерен, або 52,9%.

7. Урожайність зерна визначалася насамперед зоною продуктивності: середні значення становили 10,70 т/га у високопродуктивній зоні, 9,21 т/га – у середньопродуктивній і 7,42 т/га – у низькопродуктивній. Коефіцієнт варіації між роками зростав від 10,5% у високопродуктивній до 21,5% у низькопродуктивній зоні, підтверджуючи вищу нестабільність низькопродуктивних ділянок. За результатами поліноміальної регресії встановлено зонально-специфічні оптимуми норм висіву: для

високопродуктивної зони – 81,8 тис./га (прогнозована урожайність 11,21 т/га), для середньопродуктивної – 75,9 тис./га (9,56 т/га), для низькопродуктивної – 68,1 тис./га (7,70 т/га). Коефіцієнти детермінації моделей перевищували 0,90 у більшості варіантів.

8. Якісні показники зерна закономірно диференціювалися між зонами: вміст крохмалю зростав від низько- до високопродуктивної зони (68,9 – 70,8 – 72,1%), тоді як вміст білка і жиру змінювалися у зворотному напрямку (білок 9,3 – 8,7 – 8,2%; жир 4,7 – 4,3 – 4,1%), що відображає ефект розбавлення концентрованих фракцій за вищого накопичення крохмалю у продуктивніших зонах. Вологість зерна при збиранні достовірно відрізнялася між зонами на 4,1 відсоткового пункту за однакової норми висіву і мала пряму причинно-наслідкову пов'язаність із тривалістю природної дегідратації після воскової стиглості.

9. Економічний аналіз підтвердив зонально-специфічний характер оптимуму норми висіву. Найвищий прибуток у високопродуктивній зоні забезпечила норма 80 тис./га – 44 925 грн/га (+14,8% до контролю), у середньопродуктивній зоні – контрольна норма 75 тис./га (35 219 грн/га), у низькопродуктивній – норма 70 тис./га (26 849 грн/га, +6,6% до контролю). Застосування єдиної норми 75 тис./га по всьому полю є субоптимальним рішенням: у високопродуктивній зоні воно недовикористовує ресурсний потенціал і недодає 4108 грн/га прибутку, тоді як у низькопродуктивній зоні перевищує оптимум і знижує прибуток на 1499 грн/га порівняно з нормою 70 тис./га.

10. Біоенергетична оцінка підтвердила узгодженість економічного і енергетичного оптимумів норм висіву в усіх зонах. Найвищий К_ее зафіксовано у високопродуктивній зоні за норми 80 тис./га – 8,39 (дуже висока ефективність). У середньопродуктивній зоні максимальний К_ее становив 7,04 за норми 75 тис./га (висока ефективність), у низькопродуктивній зоні – 5,69 за норми 70 тис./га (середня ефективність). КФАР досягав максимуму у високопродуктивній зоні за норми 80 тис./га – 2,37%, що свідчить про

найефективніше перетворення сонячної енергії в біомасу саме за цієї комбінації.

11. Збіг економічного і біоенергетичного оптимумів норм висіву для всіх зон продуктивності є принципово важливим результатом, оскільки підтверджує структурну стійкість рекомендованих рішень: диференційований висів із нормами 80 / 75 / 70 тис./га для високо-, середньо- і низькопродуктивних зон є оптимальним одночасно за прибутком і за К_е, незалежно від поточної кон'юнктури ринку зерна.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

За результатами трирічних польових досліджень (2023–2025 рр.) з гібридом кукурудзи ДКС 3939 (ФАО 320) в умовах перехідної зони між Поліссям і Лісостепом Чернігівського регіону розроблено такі рекомендації для господарств із просторово неоднорідними полями:

1. У господарствах із вираженою внутрішньо польовою варіабельністю ґрунтових умов проводити виділення зон продуктивності поля на основі комплексного аналізу багаторічних карт урожайності, агрохімічних карт, даних картування ґрунту та супутникових індексів вегетації. Мінімальна кількість зон – три (високопродуктивна, середньопродуктивна, низькопродуктивна зони). Стабільність виділених зон рекомендується підтверджувати даними не менш ніж трьох попередніх сезонів.

2. Застосовувати диференційовані норми висіву насіння кукурудзи залежно від зони продуктивності поля:

- у зоні високої продуктивності – 80 тис. насінин/га, що забезпечує максимальний прибуток (44 925 грн/га) і найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності ($K_{ee} = 8,39$);
- у зоні середньої продуктивності – 75–76 тис. насінин/га, що відповідає одночасно економічному і біоенергетичному оптимуму ($K_{ee} = 7,04$);
- у зоні низької продуктивності – 68–70 тис. насінин/га, що забезпечує вищий прибуток порівняно з рівномірною нормою і мінімізує перевитрати насіння в умовах ресурсного дефіциту ($K_{ee} = 5,69$).

ДОДАТКИ

Додаток А. Акт впровадження наукової розробки у виробничих умовах

АКТ

впровадження наукової розробки у виробничих умовах

1. Назва розробки, що впроваджується: технологія диференційованого висіву насіння кукурудзи залежно від зон продуктивності поля.

2. Назва господарства і його адреса: ТОВ «ЧІМК», Чернігівський район, Чернігівська область, Україна.

3. Роки і обсяг впровадження: у 2025 році на площі 1642,1 га

4. Рекомендована технологія включала в себе такі елементи: на основі виділення зон продуктивності поля за даними багаторічних карт урожайності, агрохімічних карт та кластерного аналізу в середовищі QGIS, сформовано диференційовані карти-завдання із такими нормами висіву:

- зона високої продуктивності - 80 тис. насінин/га;
- зона середньої продуктивності - 75 тис. насінин/га;
- зона низької продуктивності - 70 тис. насінин/га.

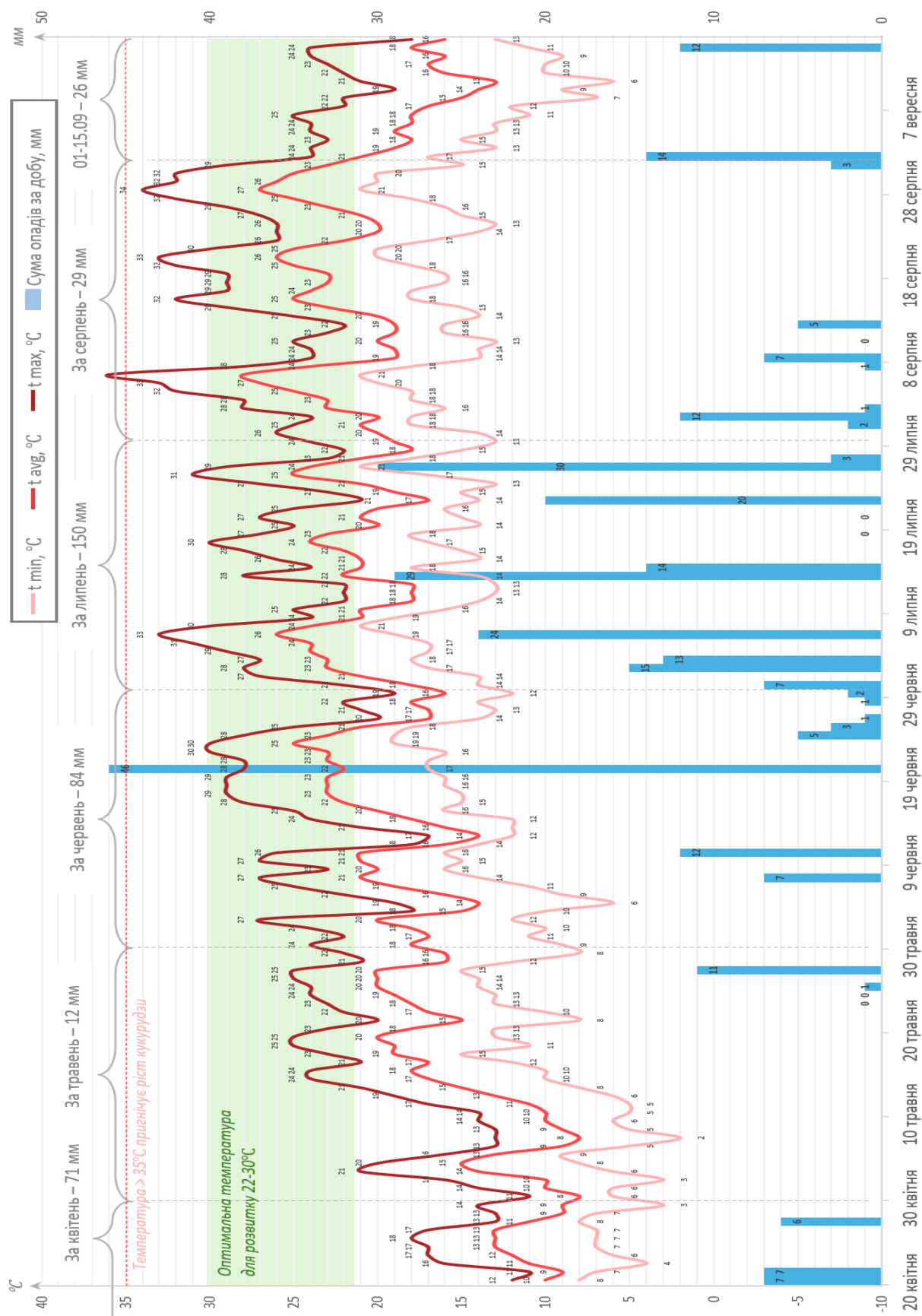
5. Результати виробничого впровадження. Застосування диференційованих норм висіву порівняно з рівномірною нормою 75 тис. насінин/га забезпечило: приріст урожайності у зоні високої продуктивності +0,72 т/га і підвищення Кее з 7,87 до 8,39; приріст урожайності у зоні низької продуктивності +0,22 т/га і підвищення Кее з 5,53 до 5,69 при одночасному скороченні витрат на насіння; КФАР у зоні високої продуктивності досяг 2,37%.

6. Висновок. Результати виробничої перевірки підтвердили агрономічну доцільність і практичну реалізованість диференційованого висіву насіння кукурудзи залежно від зон продуктивності поля в умовах Чернігівського регіону.

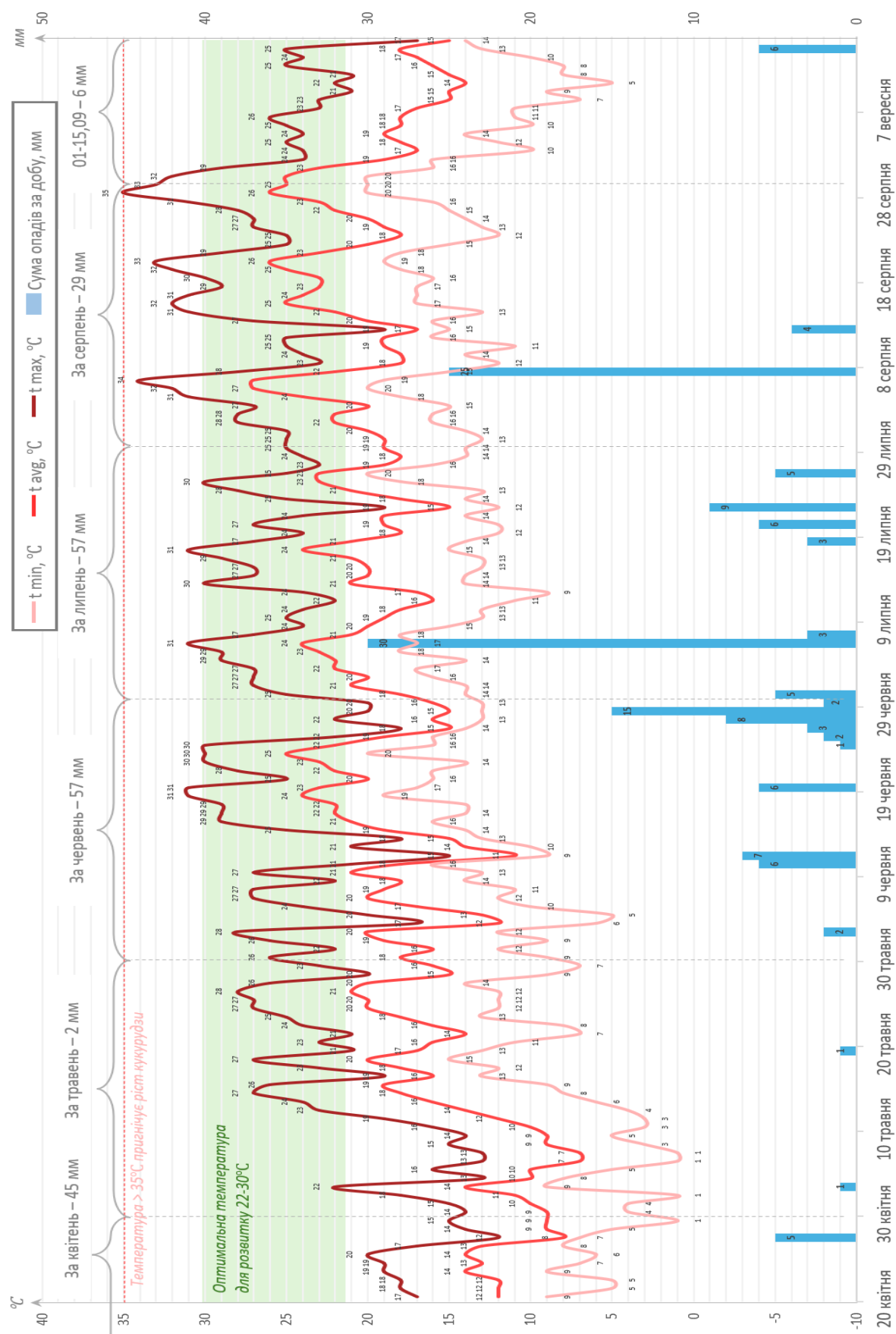
Акт складено 14.05.2026 року. Керівник



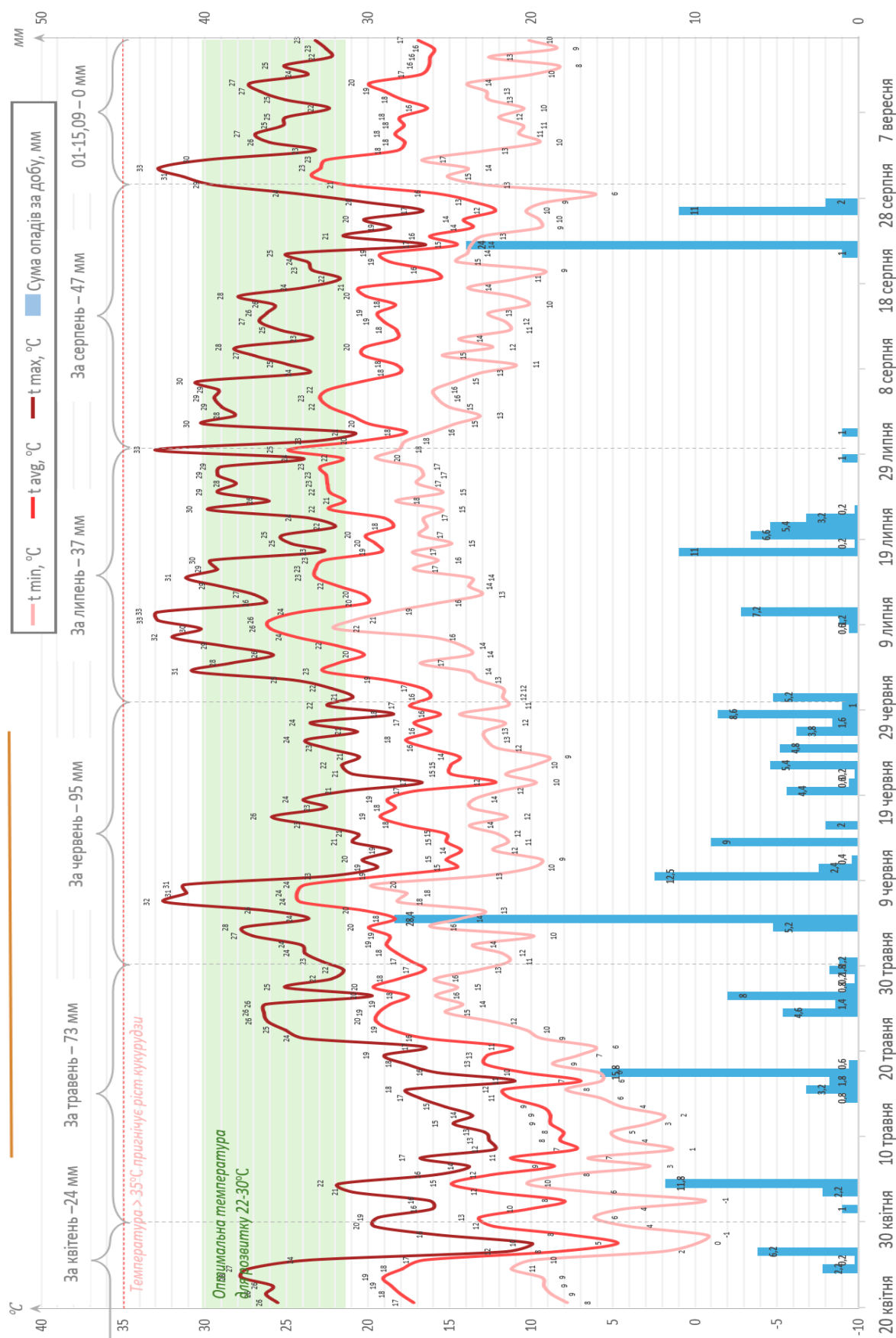
ДОДАТОК В. Подобовий розподіл опадів та температури повітря за вегетаційний період 2023 року



ДОДАТОК С. Подобовий розподіл опадів та температури повітря за вегетаційний період 2024 року



ДОДАТОК D. Подобовий розподіл опадів та температури повітря за вегетаційний період 2025 року



ДОДАТОК Е. Фази розвитку кукурудзи за американською шкалою (ISU,
V–R)

Американська шкала	Назва фази	Опис розвитку
VE	Emergence	Поява проростка (сходи)
V1	First leaf	1 справжній листок
V2	Second leaf	2 справжні листки
V3	Third leaf	3 листки
V4	Fourth leaf	4 листки
V5	Fifth leaf	5 листків
V6	Sixth leaf	6 листків
V7	Seventh leaf	7 листків
V8	Eighth leaf	8 листків
V9–V19	Vegetative stages	Подальший вегетативний розвиток (9–19 листків)
VT	Tasseling	Повна поява волоті
R1	Silking	Початок цвітіння (поява шовку)
R2	Blister	Початок наливу зерна
R3	Milk stage	Молочна стиглість
R4	Dough stage	Тістоподібна стиглість
R5	Dent stage	Вм'ятина зерна (dent stage)
R6	Black layer	Повна фізіологічна стиглість

**ДОДАТОК F. Подобовий розподіл опадів та температури повітря за
вегетаційний період 2023 року**

Дата	Опади, мм	t min, °C	t avg, °C	t max, °C	Амплі- туда, °C	Накопич. сума ефект. т-р (>5°C)	Відхил. від серед. за місяць, °C
20 квітня	7,0	7,9	9,6	12,0	4,1	4,6	-1,0
21 квітня	7,0	7,1	8,6	10,9	3,8	8,2	-2,0
22 квітня		4,1	10,6	16,0	11,9	13,8	0,0
23 квітня		6,1	11,6	16,8	10,7	20,4	1,0
24 квітня		7,0	12,7	16,8	9,8	28,1	2,1
25 квітня		7,1	12,9	17,8	10,7	36,0	2,3
26 квітня		7,0	13,3	16,8	9,8	44,3	2,7
27 квітня	6,0	8,0	11,4	12,9	4,9	50,7	0,8
28 квітня		7,0	9,4	13,0	6,0	55,1	-1,2
29 квітня		3,0	9,1	14,0	11,0	59,2	-1,5
30 квітня		5,9	7,9	11,1	5,2	62,1	-2,7
1 травня		5,8	9,7	14,1	8,3	66,8	-5,4
2 травня		2,7	9,8	16,2	13,5	71,6	-5,3
3 травня		5,7	13,9	21,1	15,4	80,5	-1,2
4 травня		7,7	15,0	20,0	12,3	90,5	-0,1
5 травня		8,8	13,0	15,9	7,1	98,5	-2,1
6 травня		4,8	9,2	12,8	8,0	102,7	-5,9
7 травня		1,8	8,2	12,8	11,0	105,9	-6,9
8 травня		4,8	9,2	12,9	8,1	110,1	-5,9
9 травня		5,7	10,0	14,0	8,3	115,1	-5,1
10 травня		4,6	9,9	13,9	9,3	120,0	-5,2
11 травня		4,6	10,9	16,9	12,3	125,9	-4,2
12 травня		5,7	12,9	18,9	13,2	133,8	-2,2
13 травня		7,7	15,1	20,8	13,1	143,9	0,0
14 травня		9,8	17,2	23,8	14,0	156,1	2,1
15 травня		9,8	18,3	23,8	14,0	169,4	3,2
16 травня		11,8	17,2	20,9	9,1	181,6	2,1
17 травня		14,8	19,1	22,9	8,1	195,7	4,0
18 травня		10,9	18,9	24,8	13,9	209,6	3,8
19 травня		13,1	19,8	24,6	11,5	224,4	4,7
20 травня		13,1	17,8	22,6	9,5	237,2	2,7
21 травня		8,0	14,8	19,7	11,7	247,0	-0,3
22 травня		9,8	16,7	21,9	12,1	258,7	1,6
23 травня	0,0	12,8	17,6	23,0	10,2	271,3	2,5
24 травня	0,0	12,8	18,7	24,0	11,2	285,0	3,6
25 травня	1,0	13,9	19,8	23,9	10,0	299,8	4,7

26 травня		14,0	19,9	24,9	10,9	314,7	4,8
27 травня	11,0	15,0	19,8	24,8	9,8	329,5	4,7
28 травня		11,9	15,7	20,9	9,0	340,2	0,6
29 травня		7,9	15,6	22,0	14,1	350,8	0,5
30 травня		8,9	17,7	24,1	15,2	363,5	2,6
31 травня		11,0	16,8	22,1	11,1	375,3	1,7
1 червня		9,9	18,1	24,0	14,1	388,4	-1,4
2 червня		12,0	20,3	27,0	15,0	403,7	0,8
3 червня		9,9	15,4	17,9	8,0	414,1	-4,1
4 червня		5,9	14,3	19,0	13,1	423,4	-5,2
5 червня		8,9	16,4	22,0	13,1	434,8	-3,1
6 червня		11,0	19,4	25,0	14,0	449,2	-0,1
7 червня	7,0	14,0	21,1	27,1	13,1	465,3	1,6
8 червня		16,1	19,8	23,2	7,1	480,1	0,3
9 червня		15,1	20,6	27,2	12,1	495,7	1,1
10 червня	12,0	16,2	20,7	26,1	9,9	511,4	1,2
11 червня		14,2	15,8	18,1	3,9	522,2	-3,7
12 червня		12,2	13,9	17,1	4,9	531,1	-5,6
13 червня		12,2	16,0	21,1	8,9	542,1	-3,5
14 червня		12,1	18,0	24,1	12,0	555,1	-1,5
15 червня		16,0	20,1	24,9	8,9	570,2	0,6
16 червня		14,9	22,1	27,9	13,0	587,3	2,6
17 червня		14,9	23,1	28,8	13,9	605,4	3,6
18 червня		16,0	23,0	28,9	12,9	623,4	3,5
19 червня		16,0	22,9	28,9	12,9	641,3	3,4
20 червня	46,0	17,0	22,0	27,9	10,9	658,3	2,5
21 червня		16,8	23,1	27,9	11,1	676,4	3,6
22 червня		15,7	23,2	29,7	14,0	694,6	3,7
23 червня		18,7	25,3	29,6	10,9	714,9	5,8
24 червня	5,0	18,8	23,2	27,7	8,9	733,1	3,7
25 червня	3,0	18,0	21,2	24,7	6,7	749,3	1,7
26 червня	1,0	14,1	17,2	19,9	5,8	761,5	-2,3
27 червня		13,2	17,3	21,0	7,8	773,8	-2,2
28 червня	1,0	14,2	18,3	22,0	7,8	787,1	-1,2
29 червня	2,0	12,1	16,2	18,9	6,8	798,3	-3,3
30 червня	7,0	14,0	18,1	22,0	8,0	811,4	-1,4
1 липня		14,0	21,1	27,1	13,1	827,5	-0,2
2 липня	15,0	17,1	23,1	28,2	11,1	845,6	1,8
3 липня	13,0	18,1	23,0	27,0	8,9	863,6	1,7
4 липня		17,1	24,1	28,9	11,8	882,7	2,8
5 липня		17,1	24,2	30,8	13,7	901,9	2,9

6 липня	24,0	19,1	26,4	33,0	13,9	923,3	5,1
7 липня		21,0	24,3	30,2	9,2	942,6	3,0
8 липня		19,0	21,0	24,2	5,2	958,6	-0,3
9 липня		16,0	20,8	25,1	9,1	974,4	-0,5
10 липня		14,0	17,8	22,0	8,0	987,2	-3,5
11 липня		13,0	17,9	22,0	9,0	1000,1	-3,4
12 липня		13,0	18,0	22,0	9,0	1013,1	-3,3
13 липня	29,0	14,0	22,1	28,1	14,1	1030,2	0,8
14 липня	14,0	18,1	21,1	24,1	6,0	1046,3	-0,2
15 липня		14,0	21,1	26,2	12,2	1062,4	-0,2
16 липня		14,9	22,1	28,2	13,3	1079,5	0,8
17 липня		16,9	24,0	30,1	13,2	1098,5	2,7
18 липня	0,0	18,0	22,9	26,9	8,9	1116,4	1,6
19 липня		14,0	19,8	24,8	10,8	1131,2	-1,5
20 липня	0,0	15,0	20,7	26,8	11,8	1146,9	-0,6
21 липня		16,1	19,8	24,9	8,8	1161,7	-1,5
22 липня	20,0	14,1	16,7	20,9	6,8	1173,4	-4,6
23 липня		15,1	18,7	22,8	7,7	1187,1	-2,6
24 липня		13,1	20,8	26,7	13,6	1202,9	-0,5
25 липня		17,0	25,1	30,8	13,8	1223,0	3,8
26 липня	30,0	21,0	24,3	28,8	7,8	1242,3	3,0
27 липня	3,0	17,9	21,3	22,8	4,9	1258,6	0,0
28 липня		14,9	18,1	21,7	6,8	1271,7	-3,2
29 липня		13,0	18,9	23,9	10,9	1285,6	-2,4
30 липня		14,2	19,7	26,1	11,9	1300,3	-1,6
31 липня	2,0	18,2	20,8	25,3	7,1	1316,1	-0,5
1 серпня	12,0	18,1	19,9	24,3	6,2	1331,0	-3,0
2 серпня	1,0	16,1	23,0	28,2	12,1	1349,0	0,1
3 серпня		18,1	22,9	28,1	10,0	1366,9	0,0
4 серпня		18,1	25,0	31,9	13,8	1386,9	2,1
5 серпня		20,1	27,3	32,9	12,8	1409,2	4,4
6 серпня		21,1	28,4	35,9	14,8	1432,6	5,5
7 серпня	1,0	18,0	24,2	27,9	9,9	1451,8	1,3
8 серпня	7,0	14,1	18,8	23,9	9,8	1465,6	-4,1
9 серпня		14,1	18,7	23,9	9,8	1479,3	-4,2
10 серпня	0,0	13,1	19,9	25,0	11,9	1494,2	-3,0
11 серпня		16,0	19,2	23,1	7,1	1508,4	-3,7
12 серпня	5,0	15,9	19,2	22,1	6,2	1522,6	-3,7
13 серпня		13,8	20,0	25,1	11,3	1537,6	-2,9
14 серпня		14,9	22,9	28,9	14,0	1555,5	0,0
15 серпня		18,0	25,0	31,9	13,9	1575,5	2,1

16 серпня		18,1	24,0	28,9	10,8	1594,5	1,1
17 серпня		16,3	22,9	28,9	12,6	1612,4	0,0
18 серпня		16,3	22,8	28,8	12,5	1630,2	-0,1
19 серпня		18,2	24,8	31,9	13,7	1650,0	1,9
20 серпня		20,0	25,8	33,0	13,0	1670,8	2,9
21 серпня		20,0	24,8	30,3	10,3	1690,6	1,9
22 серпня		17,0	21,6	26,4	9,4	1707,2	-1,3
23 серпня		14,0	19,6	26,4	12,4	1721,8	-3,3
24 серпня		12,9	19,7	26,2	13,3	1736,5	-3,2
25 серпня		14,9	21,0	26,9	12,0	1752,5	-1,9
26 серпня		15,9	23,0	28,8	12,9	1770,5	0,1
27 серпня		18,0	25,0	31,6	13,6	1790,5	2,1
28 серпня		21,1	26,9	33,7	12,6	1812,4	4,0
29 серпня		20,1	25,8	31,8	11,7	1833,2	2,9
30 серпня		20,0	24,9	31,9	11,9	1853,1	2,0
31 серпня	3,0	14,9	23,0	29,0	14,1	1871,1	0,1
1 вересня	14,0	16,9	21,1	24,0	7,1	1887,2	3,7
2 вересня		13,0	19,1	24,1	11,1	1901,3	1,7
3 вересня		15,0	18,1	23,1	8,1	1914,4	0,7
4 вересня		12,9	19,0	24,0	11,1	1928,4	1,6
5 вересня		12,8	18,1	23,8	11,0	1941,5	0,7
6 вересня		10,8	18,2	24,7	13,9	1954,7	0,8
7 вересня		11,9	17,3	21,8	9,9	1967,0	-0,1
8 вересня		6,9	15,3	21,9	15,0	1977,3	-2,1
9 вересня		9,0	14,2	19,0	10,0	1986,5	-3,2
10 вересня		6,0	13,1	21,1	15,1	1994,6	-4,3
11 вересня		9,9	16,0	22,0	12,1	2005,6	-1,4
12 вересня		9,9	17,0	23,0	13,1	2017,6	-0,4
13 вересня		9,0	15,9	23,8	14,8	2028,5	-1,5
14 вересня	12,0	10,9	17,9	23,7	12,8	2041,4	0,5
15 вересня		12,9	15,8	17,7	4,8	2052,2	-1,6
16 вересня		11,9	15,9	22,8	10,9	2063,1	-1,5
17 вересня	0,2	9,9	16,0	23,9	14,0	2074,1	-1,4
18 вересня		9,9	16,9	25,9	16,0	2086,0	-0,5
19 вересня		9,8	17,9	25,9	16,1	2098,9	0,5
20 вересня		11,8	18,0	24,9	13,1	2111,9	0,6
21 вересня		13,8	20,1	26,8	13,0	2127,0	2,7
22 вересня		10,9	19,2	26,7	15,8	2141,2	1,8
23 вересня		14,0	20,2	26,7	12,7	2156,4	2,8
24 вересня		13,1	20,1	27,8	14,7	2171,5	2,7
25 вересня		11,0	19,0	27,8	16,8	2185,5	1,6

26 вересня		13,0	17,1	23,7	10,7	2197,6	-0,3
27 вересня	0,2	8,9	16,2	24,8	15,9	2208,8	-1,2
28 вересня		7,9	17,3	26,8	18,9	2221,1	-0,1
29 вересня		7,9	16,2	25,9	18,0	2232,3	-1,2
30 вересня		6,9	16,1	26,8	19,9	2243,4	-1,3
1 жовтня		10,0	15,0	20,0	10,0	2253,4	5,0
2 жовтня		8,1	13,1	19,2	11,1	2261,5	3,1
3 жовтня		3,0	11,0	20,4	17,4	2267,5	1,0
4 жовтня		7,0	13,0	21,2	14,2	2275,5	3,0
5 жовтня		7,0	11,9	18,9	11,9	2282,4	1,9
6 жовтня		6,0	11,9	15,8	9,8	2289,3	1,9
7 жовтня	5,6	2,9	9,8	15,9	13,0	2294,1	-0,2
8 жовтня		3,8	9,7	15,0	11,2	2298,8	-0,3
9 жовтня		1,8	5,8	10,0	8,2	2299,6	-4,2
10 жовтня		-0,2	4,0	11,1	11,3	2299,6	-6,0
11 жовтня		-6,0	4,1	13,1	19,1	2299,6	-5,9
12 жовтня		8,1	14,1	21,2	13,1	2308,7	4,1
13 жовтня	1,6	3,3	13,0	17,1	13,8	2316,7	3,0
14 жовтня	0,2	2,4	11,9	20,9	18,5	2323,6	1,9
15 жовтня	1,8	10,4	12,9	16,8	6,4	2331,5	2,9
16 жовтня	11,2	4,2	6,9	9,8	5,6	2333,4	-3,1
17 жовтня	0,2	2,0	4,9	11,0	9,0	2333,4	-5,1
18 жовтня		0,0	4,9	11,1	11,1	2333,4	-5,1
19 жовтня		2,1	5,9	12,0	9,9	2334,3	-4,1
20 жовтня	12,8	6,1	9,8	13,0	6,9	2339,1	-0,2
21 жовтня	1,0	7,1	8,7	13,0	5,9	2342,8	-1,3
22 жовтня		7,1	10,7	16,1	9,0	2348,5	0,7
23 жовтня		10,1	12,7	17,1	7,0	2356,2	2,7
24 жовтня		3,1	9,8	14,9	11,8	2361,0	-0,2
25 жовтня	33,0	1,1	6,0	7,9	6,8	2362,0	-4,0
26 жовтня	3,8	8,1	11,1	13,9	5,8	2368,1	1,1
27 жовтня	1,6	11,1	13,1	18,9	7,8	2376,2	3,1
28 жовтня	8,4	7,0	11,1	14,9	7,9	2382,3	1,1
29 жовтня		4,9	8,1	12,0	7,1	2385,4	-1,9
30 жовтня		6,9	12,0	19,2	12,3	2392,4	2,0
31 жовтня		7,0	12,7	20,3	13,3	2400,1	2,7

**ДОДАТОК Г. Подобовий розподіл опадів та температури повітря за
вегетаційний період 2024 року**

Дата	Опади, мм	t min, °C	t avg, °C	t max, °C	Амплі- туда, °C	Накопич. сума ефект. т-р (>5°C)	Відхил. від серед. за місяць, °C
20 квітня		9,0	12,0	17,1	8,1	7,0	0,6
21 квітня		4,9	12,0	18,0	13,1	14,0	0,6
22 квітня		4,8	11,9	18,0	13,2	20,9	0,5
23 квітня		8,8	14,0	19,1	10,3	29,9	2,6
24 квітня		6,9	13,2	19,1	12,2	38,1	1,8
25 квітня		5,9	14,3	20,0	14,1	47,4	2,9
26 квітня		7,9	13,2	16,8	8,9	55,6	1,8
27 квітня	5,0	6,8	8,0	11,8	5,0	58,6	-3,4
28 квітня		4,9	8,9	13,9	9,0	62,5	-2,5
29 квітня		1,0	8,9	15,0	14,0	66,4	-2,5
30 квітня		4,0	8,9	14,1	10,1	70,3	-2,5
1 травня		4,0	9,8	15,0	11,0	75,1	-4,9
2 травня		0,9	10,7	17,9	17,0	80,8	-4,0
3 травня	1,0	8,9	13,9	21,9	13,0	89,7	-0,8
4 травня		7,9	10,0	12,9	5,0	94,7	-4,7
5 травня		5,0	10,1	15,9	10,9	99,8	-4,6
6 травня		1,1	6,9	13,0	11,9	101,7	-7,8
7 травня		1,0	6,8	13,0	12,0	103,5	-7,9
8 травня		3,0	8,8	15,0	12,0	107,3	-5,9
9 травня		4,9	9,0	14,0	9,1	111,3	-5,7
10 травня		2,9	10,1	16,0	13,1	116,4	-4,6
11 травня		3,0	12,2	19,1	16,1	123,6	-2,5
12 травня		4,0	14,2	23,1	19,1	132,8	-0,5
13 травня		5,9	16,1	24,2	18,3	143,9	1,4
14 травня		7,9	18,0	27,2	19,3	156,9	3,3
15 травня		9,0	19,0	26,1	17,1	170,9	4,3
16 травня		13,0	16,0	19,1	6,1	181,9	1,3
17 травня		12,1	18,1	23,1	11,0	195,0	3,4
18 травня		15,2	20,1	27,1	11,9	210,1	5,4
19 травня	1,0	13,2	17,2	21,1	7,9	222,3	2,5
20 травня		11,3	16,2	22,9	11,6	233,5	1,5
21 травня		7,3	14,1	20,8	13,5	242,6	-0,6
22 травня		8,3	15,9	23,7	15,4	253,5	1,2
23 травня		13,2	17,8	24,8	11,6	266,3	3,1
24 травня		12,2	19,7	26,9	14,7	281,0	5,0
25 травня		12,2	19,9	27,0	14,8	295,9	5,2

26 травня		12,2	21,0	28,0	15,8	311,9	6,3
27 травня		14,2	20,0	25,9	11,7	326,9	5,3
28 травня		9,1	14,9	19,9	10,8	336,8	0,2
29 травня		7,0	15,7	23,0	16,0	347,5	1,0
30 травня		9,0	17,7	26,0	17,0	360,2	3,0
31 травня		12,0	15,9	21,9	9,9	371,1	1,2
1 червня		9,0	19,0	25,8	16,8	385,1	0,3
2 червня	2,0	11,9	20,0	27,7	15,8	400,1	1,3
3 червня		5,9	11,9	16,8	10,9	407,0	-6,8
4 червня		4,8	13,0	20,0	15,2	415,0	-5,7
5 червня		9,8	17,0	24,1	14,3	427,0	-1,7
6 червня		11,9	20,1	27,1	15,2	442,1	1,4
7 червня		11,1	19,0	27,0	15,9	456,1	0,3
8 червня		14,3	18,0	21,8	7,5	469,1	-0,7
9 червня		13,4	21,0	26,7	13,3	485,1	2,3
10 червня	6,0	16,3	18,0	20,7	4,4	498,1	-0,7
11 червня	7,0	9,1	11,0	14,8	5,7	504,1	-7,7
12 червня		10,0	14,0	20,9	10,9	513,1	-4,7
13 червня		13,0	15,0	18,1	5,1	523,1	-3,7
14 червня		14,0	19,0	25,2	11,2	537,1	0,3
15 червня		16,0	21,0	29,2	13,2	553,1	2,3
16 червня		14,0	22,2	29,1	15,1	570,3	3,5
17 червня		14,0	22,3	29,1	15,1	587,6	3,6
18 червня		19,0	24,4	31,1	12,1	607,0	5,7
19 червня	6,0	16,8	23,3	31,2	14,4	625,3	4,6
20 червня		15,8	20,2	25,2	9,4	640,5	1,5
21 червня		15,7	22,1	28,3	12,6	657,6	3,4
22 червня		13,8	23,1	30,1	16,3	675,7	4,4
23 червня		19,9	25,2	30,0	10,1	695,9	6,5
24 червня	1,0	15,9	22,1	29,8	13,9	713,0	3,4
25 червня	2,0	15,9	19,1	21,7	5,8	727,1	0,4
26 червня	3,0	14,0	15,1	17,8	3,8	737,2	-3,6
27 червня	8,0	13,1	16,2	22,0	8,9	748,4	-2,5
28 червня	15,0	13,1	15,0	20,1	7,0	758,4	-3,7
29 червня	2,0	13,2	15,9	20,1	6,9	769,3	-2,8
30 червня	5,0	14,2	17,9	25,0	10,8	782,2	-0,8
1 липня		14,2	21,1	26,9	12,7	798,3	1,0
2 липня		16,2	20,3	26,9	10,7	813,6	0,2
3 липня		17,2	22,3	27,0	9,8	830,9	2,2
4 липня		14,2	22,2	29,0	14,8	848,1	2,1
5 липня		18,0	23,1	29,0	11,0	866,2	3,0

6 липня	30,0	16,8	24,1	31,0	14,2	885,3	4,0
7 липня	3,0	17,7	21,1	27,1	9,4	901,4	1,0
8 липня		14,7	19,9	24,1	9,4	916,3	-0,2
9 липня		12,9	18,7	25,1	12,2	930,0	-1,4
10 липня		13,0	17,6	24,1	11,1	942,6	-2,5
11 липня		11,1	15,8	22,1	11,0	953,4	-4,3
12 липня		9,1	17,1	24,1	15,0	965,5	-3,0
13 липня		14,2	21,4	30,0	15,8	981,9	1,3
14 липня		14,1	20,3	27,0	12,9	997,2	0,2
15 липня		13,1	20,2	27,0	13,9	1012,4	0,1
16 липня		13,0	21,0	29,1	16,1	1028,4	0,9
17 липня		15,0	24,1	31,0	16,0	1047,5	4,0
18 липня	3,0	14,0	21,2	26,9	12,9	1063,7	1,1
19 липня		12,0	18,3	23,8	11,8	1077,0	-1,8
20 липня	6,0	12,1	19,2	26,8	14,7	1091,2	-0,9
21 липня		14,1	19,1	23,9	9,8	1105,3	-1,0
22 липня	9,0	12,1	15,0	18,9	6,8	1115,3	-5,1
23 липня		14,1	18,1	24,9	10,8	1128,4	-2,0
24 липня		13,1	21,1	27,9	14,8	1144,5	1,0
25 липня		18,0	23,2	30,0	12,0	1162,7	3,1
26 липня	5,0	20,0	23,2	25,1	5,1	1180,9	3,1
27 липня		16,0	19,1	23,0	7,0	1195,0	-1,0
28 липня		14,1	18,1	23,9	9,8	1208,1	-2,0
29 липня		14,1	19,2	24,9	10,8	1222,3	-0,9
30 липня		13,0	19,2	24,9	11,9	1236,5	-0,9
31 липня		13,9	20,2	24,9	11,0	1251,7	0,1
1 серпня		15,7	22,2	27,9	12,2	1268,9	0,0
2 серпня		15,8	22,2	28,0	12,2	1286,1	0,0
3 серпня		14,9	20,2	27,0	12,1	1301,3	-2,0
4 серпня		18,1	24,1	31,1	13,0	1320,4	1,9
5 серпня		20,1	27,0	32,0	11,9	1342,4	4,8
6 серпня		19,1	27,0	34,0	14,9	1364,4	4,8
7 серпня	25,0	15,1	22,1	28,1	13,0	1381,5	-0,1
8 серпня		12,2	18,1	23,2	11,0	1394,6	-4,1
9 серпня		14,3	18,1	24,1	9,8	1407,7	-4,1
10 серпня		11,3	19,1	25,0	13,7	1421,8	-3,1
11 серпня		16,2	19,0	24,9	8,7	1435,8	-3,2
12 серпня	4,0	15,1	17,0	18,8	3,7	1447,8	-5,2
13 серпня		16,1	19,9	26,9	10,8	1462,7	-2,3
14 серпня		13,2	22,0	31,0	17,8	1479,7	-0,2
15 серпня		17,3	24,9	32,2	14,9	1499,6	2,7

16 серпня		17,3	23,9	31,2	13,9	1518,5	1,7
17 серпня		17,2	22,9	29,0	11,8	1536,4	0,7
18 серпня		16,1	23,0	29,6	13,5	1554,4	0,8
19 серпня		18,1	25,1	31,6	13,5	1574,5	2,9
20 серпня		19,1	26,1	32,6	13,5	1595,6	3,9
21 серпня		18,1	23,2	28,7	10,6	1613,8	1,0
22 серпня		15,0	20,2	24,8	9,8	1629,0	-2,0
23 серпня		12,1	18,1	24,9	12,8	1642,1	-4,1
24 серпня		13,0	18,9	26,9	13,9	1656,0	-3,3
25 серпня		14,1	19,9	27,0	12,9	1670,9	-2,3
26 серпня		15,0	22,0	28,0	13,0	1687,9	-0,2
27 серпня		16,1	23,1	31,0	14,9	1706,0	0,9
28 серпня		20,1	26,2	35,0	14,9	1727,2	4,0
29 серпня		20,1	25,1	32,9	12,8	1747,3	2,9
30 серпня		20,1	25,0	31,8	11,7	1767,3	2,8
31 серпня		16,1	23,0	28,8	12,7	1785,3	0,8
1 вересня		16,1	19,1	23,9	7,8	1799,4	1,9
2 вересня		10,0	17,1	23,9	13,9	1811,5	-0,1
3 вересня		11,9	18,0	24,8	12,9	1824,5	0,8
4 вересня		13,9	18,9	23,9	10,0	1838,4	1,7
5 вересня		9,9	18,0	24,9	15,0	1851,4	0,8
6 вересня		10,8	18,1	26,1	15,3	1864,5	0,9
7 вересня		10,8	17,1	23,0	12,2	1876,6	-0,1
8 вересня		6,8	15,1	23,0	16,2	1886,7	-2,1
9 вересня		8,9	14,9	20,9	12,0	1896,6	-2,3
10 вересня		4,9	13,9	21,9	17,0	1905,5	-3,3
11 вересня		7,9	14,9	20,9	13,0	1915,4	-2,3
12 вересня		7,9	16,0	24,9	17,0	1926,4	-1,2
13 вересня		9,9	17,0	23,9	14,0	1938,4	-0,2
14 вересня	6,0	12,9	18,1	24,8	11,9	1951,5	0,9
15 вересня		13,8	15,3	16,9	3,1	1961,8	-1,9
16 вересня		14,1	21,3	27,4	13,3	1978,1	4,1
17 вересня		13,6	19,1	26,7	13,1	1992,2	1,9
18 вересня	0,0	10,3	16,1	21,3	11,0	2003,3	-1,1
19 вересня	0,0	6,0	15,2	23,9	17,9	2013,5	-2,0
20 вересня	0,8	7,4	16,1	25,6	18,2	2024,6	-1,1
21 вересня	0,0	6,4	15,6	25,4	19,0	2035,2	-1,6
22 вересня	0,0	7,6	16,3	26,6	19,0	2046,5	-0,9
23 вересня	0,0	7,8	15,9	25,9	18,1	2057,4	-1,3
24 вересня	0,0	9,1	16,9	26,5	17,4	2069,3	-0,3
25 вересня	0,0	10,8	18,1	26,8	16,0	2082,4	0,9

26 вересня	0,0	12,0	17,6	23,9	11,9	2095,0	0,4
27 вересня	0,0	17,5	20,8	25,1	7,6	2110,8	3,6
28 вересня	0,0	16,6	22,1	27,9	11,3	2127,9	4,9
29 вересня	0,0	13,4	18,4	25,7	12,3	2141,3	1,2
30 вересня	0,0	11,4	13,7	17,6	6,2	2150,0	-3,5
1 жовтня	0,0	8,8	14,3	23,2	14,4	2159,3	4,9
2 жовтня	0,0	7,0	14,6	24,0	17,0	2168,9	5,2
3 жовтня	0,0	3,5	13,2	24,0	20,5	2177,1	3,8
4 жовтня	0,0	12,8	16,2	20,7	7,9	2188,3	6,8
5 жовтня	0,0	16,2	17,4	21,0	4,8	2200,7	8,0
6 жовтня	0,0	11,0	11,3	11,7	0,7	2207,0	1,9
7 жовтня	0,0	9,6	10,8	12,3	2,7	2212,8	1,4
8 жовтня	5,0	7,8	9,9	13,6	5,8	2217,7	0,5
9 жовтня	0,2	2,3	10,6	18,8	16,5	2223,3	1,2
10 жовтня	0,2	8,9	13,4	20,4	11,5	2231,7	4,0
11 жовтня	0,0	12,8	15,2	16,3	3,5	2241,9	5,8
12 жовтня	17,0	11,4	11,6	12,5	1,1	2248,5	2,2
13 жовтня	18,8	6,4	8,1	12,3	5,9	2251,6	-1,3
14 жовтня	1,2	8,4	9,5	12,9	4,5	2256,1	0,1
15 жовтня	1,4	6,0	8,9	11,5	5,5	2260,0	-0,5
16 жовтня	0,2	3,7	7,4	12,9	9,2	2262,4	-2,0
17 жовтня	0,0	1,4	5,0	10,0	8,6	2262,4	-4,4
18 жовтня	0,2	1,4	5,1	8,8	7,4	2262,5	-4,3
19 жовтня	0,0	-0,1	4,4	5,8	5,9	2262,5	-5,0
20 жовтня	0,0	-0,5	4,7	12,1	12,6	2262,5	-4,7
21 жовтня	0,2	2,4	7,6	16,5	14,1	2265,1	-1,8
22 жовтня	0,0	-1,5	7,4	17,5	19,0	2267,5	-2,0
23 жовтня	0,0	6,7	10,1	15,9	9,2	2272,6	0,7
24 жовтня	0,2	3,7	6,9	12,8	9,1	2274,5	-2,5
25 жовтня	0,0	8,5	9,5	10,2	1,7	2279,0	0,1
26 жовтня	0,2	3,7	8,6	10,5	6,8	2282,6	-0,8
27 жовтня	0,0	2,5	7,1	13,2	10,7	2284,7	-2,3
28 жовтня	0,2	1,3	7,3	13,9	12,6	2287,0	-2,1
29 жовтня	0,0	0,4	7,1	12,9	12,5	2289,1	-2,3
30 жовтня	0,2	-1,7	1,8	9,4	11,1	2289,1	-7,6
31 жовтня	0,0	5,6	6,5	7,6	2,0	2290,6	-2,9

**ДОДАТОК Н. Подобовий розподіл опадів та температури повітря за
вегетаційний період 2025 року**

Дата	Опади, мм	t min, °C	t avg, °C	t max, °C	Амплі- туда, °C	Накопич. сума ефект. т-р (>5°C)	Відхил. від серед. за місяць, °C
20 квітня		8,1	17,3	26,1	18,0	12,3	3,2
21 квітня		8,9	18,3	25,9	17,0	25,6	4,2
22 квітня		8,7	19,2	25,9	17,2	39,8	5,1
23 квітня		8,6	19,1	27,8	19,2	53,9	5,0
24 квітня	2,2	10,6	18,1	26,9	16,3	67,0	4,0
25 квітня	0,2	9,8	17,0	23,9	14,1	79,0	2,9
26 квітня	6,2	2,1	8,1	11,9	9,8	82,1	-6,0
27 квітня		0,2	5,0	9,9	9,7	82,1	-9,1
28 квітня		-0,8	8,0	16,1	16,9	85,1	-6,1
29 квітня		3,9	12,0	20,3	16,4	92,1	-2,1
30 квітня		5,7	13,1	19,3	13,6	100,2	-1,0
1 травня	1,0	3,7	10,1	16,3	12,6	105,3	-3,0
2 травня		-1,1	8,0	16,3	17,4	108,3	-5,1
3 травня	2,2	6,1	12,0	21,3	15,2	115,3	-1,1
4 травня	11,8	10,3	14,9	22,3	12,0	125,2	1,8
5 травня		8,4	11,9	16,3	7,9	132,1	-1,2
6 травня		3,3	8,9	14,1	10,8	136,0	-4,2
7 травня		7,2	11,1	16,9	9,7	142,1	-2,0
8 травня		1,2	7,2	11,9	10,7	144,3	-5,9
9 травня		4,1	8,2	12,9	8,8	147,5	-4,9
10 травня		5,0	8,1	12,9	7,9	150,6	-5,0
11 травня		2,8	9,0	14,9	12,1	154,6	-4,1
12 травня		1,7	8,9	13,7	12,0	158,5	-4,2
13 травня		3,6	9,0	14,6	11,0	162,5	-4,1
14 травня	0,8	5,7	10,9	16,6	10,9	168,4	-2,2
15 травня	3,2	7,7	12,0	17,8	10,1	175,4	-1,1
16 травня	1,8	5,7	7,0	10,9	5,2	177,4	-6,1
17 травня	15,8	5,7	10,0	16,0	10,3	182,4	-3,1
18 травня	0,6	8,9	13,0	18,0	9,1	190,4	-0,1
19 травня		7,1	13,0	19,1	12,0	198,4	-0,1
20 травня		6,2	11,0	17,1	10,9	204,4	-2,1
21 травня		9,1	15,9	24,0	14,9	215,3	2,8
22 травня		9,9	18,9	25,0	15,1	229,2	5,8
23 травня		11,9	19,9	26,1	14,2	244,1	6,8
24 травня	4,6	14,8	19,0	26,1	11,3	258,1	5,9
25 травня	1,4	13,7	19,0	26,1	12,4	272,1	5,9

26 травня	8,0	15,6	18,0	20,0	4,4	285,1	4,9
27 травня	0,8	14,6	19,9	25,0	10,4	300,0	6,8
28 травня	0,2	15,7	17,9	22,0	6,3	312,9	4,8
29 травня	1,8	12,8	17,0	22,0	9,2	324,9	3,9
30 травня	1,2	11,0	17,1	23,0	12,0	337,0	4,0
31 травня		12,1	18,1	24,0	11,9	350,1	5,0
1 червня		14,2	19,1	23,9	9,7	364,2	1,6
2 червня		10,1	19,1	26,9	16,8	378,3	1,6
3 червня	5,2	16,2	20,0	28,0	11,8	393,3	2,5
4 червня	28,4	14,4	18,0	24,1	9,7	406,3	0,5
5 червня		13,4	20,1	26,1	12,7	421,4	2,6
6 червня		18,3	24,1	32,0	13,7	440,5	6,6
7 червня		18,1	24,1	31,0	12,9	459,6	6,6
8 червня		19,9	24,1	31,0	11,1	478,7	6,6
9 червня	12,5	12,9	19,3	23,1	10,2	493,0	1,8
10 червня	2,4	9,9	15,4	19,0	9,1	503,4	-2,1
11 червня	0,4	8,9	15,4	20,0	11,1	513,8	-2,1
12 червня		11,9	14,4	19,1	7,2	523,2	-3,1
13 червня	9,0	11,0	15,3	21,2	10,2	533,5	-2,2
14 червня		12,0	15,1	21,2	9,2	543,6	-2,4
15 червня	2,0	14,1	17,9	23,1	9,0	556,5	0,4
16 червня		12,2	18,9	26,0	13,8	570,4	1,4
17 червня		14,3	17,9	22,9	8,6	583,3	0,4
18 червня		14,2	18,9	24,0	9,8	597,2	1,4
19 червня	4,4	12,2	16,9	21,1	8,9	609,1	-0,6
20 червня	0,6	10,2	11,9	17,2	7,0	616,0	-5,6
21 червня	0,2	12,3	15,0	21,3	9,0	626,0	-2,5
22 червня	5,4	10,2	15,0	22,2	12,0	636,0	-2,5
23 червня		9,0	14,0	21,1	12,1	645,0	-3,5
24 червня	4,8	11,9	15,9	23,0	11,1	655,9	-1,6
25 червня		12,9	17,9	23,9	11,0	668,8	0,4
26 червня	3,8	13,0	15,9	21,0	8,0	679,7	-1,6
27 червня	1,6	12,1	16,9	24,1	12,0	691,6	-0,6
28 червня	8,6	14,3	16,0	18,1	3,8	702,6	-1,5
29 червня	1,0	11,3	17,1	21,9	10,6	714,7	-0,4
30 червня	5,2	12,1	16,2	20,8	8,7	725,9	-1,3
1 липня		11,8	17,2	21,7	9,9	738,1	-4,4
2 липня		12,6	19,1	24,9	12,3	752,2	-2,5
3 липня		13,6	22,9	31,0	17,4	770,1	1,3
4 липня		16,6	21,9	28,2	11,6	787,0	0,3
5 липня		13,7	19,8	26,3	12,6	801,8	-1,8

6 липня		13,7	21,9	29,4	15,7	818,7	0,3
7 липня		15,8	24,0	32,4	16,6	837,7	2,4
8 липня	0,6	21,9	26,1	30,4	8,5	858,8	4,5
9 липня	1,2	21,1	26,1	33,2	12,1	879,9	4,5
10 липня	7,2	19,2	24,2	33,2	14,0	899,1	2,6
11 липня		16,4	20,1	26,2	9,8	914,2	-1,5
12 липня		13,4	20,0	27,2	13,8	929,2	-1,6
13 липня		14,2	22,0	29,2	15,0	946,2	0,4
14 липня		14,1	23,0	31,0	16,9	964,2	1,4
15 липня		17,2	23,0	29,0	11,8	982,2	1,4
16 липня		16,4	23,0	29,8	13,4	1000,2	1,4
17 липня	11,0	17,3	19,0	22,8	5,5	1014,2	-2,6
18 липня	0,2	15,3	20,1	24,7	9,4	1029,3	-1,5
19 липня	6,6	17,2	20,1	24,7	7,5	1044,4	-1,5
20 липня	5,4	16,3	18,1	21,7	5,4	1057,5	-3,5
21 липня	3,2	17,3	19,1	23,8	6,5	1071,6	-2,5
22 липня	0,2	15,4	22,1	29,8	14,4	1088,7	0,5
23 липня		18,3	21,1	25,8	7,5	1104,8	-0,5
24 липня		15,0	22,1	28,9	13,9	1121,9	0,5
25 липня		16,8	23,1	28,0	11,2	1140,0	1,5
26 липня		16,7	23,1	29,0	12,3	1158,1	1,5
27 липня		16,9	23,1	29,0	12,1	1176,2	1,5
28 липня	1,0	20,1	22,1	24,0	3,9	1193,3	0,5
29 липня		18,2	25,0	33,0	14,8	1213,3	3,4
30 липня		18,1	19,9	23,1	5,0	1228,2	-1,7
31 липня	1,0	16,1	18,0	21,0	4,9	1241,2	-3,6
1 серпня		15,0	19,9	30,0	15,0	1256,1	1,4
2 серпня		13,0	21,0	27,8	14,8	1272,1	2,5
3 серпня		15,0	22,0	28,9	13,9	1289,1	3,5
4 серпня		16,1	23,1	29,0	12,9	1307,2	4,6
5 серпня		16,2	22,0	29,1	12,9	1324,2	3,5
6 серпня		15,2	19,9	30,2	15,0	1339,1	1,4
7 серпня		12,9	17,9	24,2	11,3	1352,0	-0,6
8 серпня		10,7	18,0	25,1	14,4	1365,0	-0,5
9 серпня		14,7	20,1	27,1	12,4	1380,1	1,6
10 серпня		11,8	20,2	28,0	16,2	1395,3	1,7
11 серпня		13,9	18,1	23,0	9,1	1408,4	-0,4
12 серпня		11,1	18,0	24,9	13,8	1421,4	-0,5
13 серпня		12,1	18,9	27,0	14,9	1435,3	0,4
14 серпня		13,1	18,8	25,9	12,8	1449,1	0,3
15 серпня		9,9	17,9	26,0	16,1	1462,0	-0,6

16 серпня		10,6	19,9	28,0	17,4	1476,9	1,4
17 серпня		13,7	20,9	24,1	10,4	1492,8	2,4
18 серпня		10,9	15,8	22,0	11,1	1503,6	-2,7
19 серпня		9,3	15,9	22,9	13,6	1514,5	-2,6
20 серпня		15,3	18,9	23,8	8,5	1528,4	0,4
21 серпня	1,0	14,3	19,0	24,8	10,5	1542,4	0,5
22 серпня	24,0	14,1	15,1	16,8	2,7	1552,5	-3,4
23 серпня		13,1	16,1	20,8	7,7	1563,6	-2,4
24 серпня		8,9	14,1	18,8	9,9	1572,7	-4,4
25 серпня		9,9	14,0	19,9	10,0	1581,7	-4,5
26 серпня	11,0	10,0	12,1	16,9	6,9	1588,8	-6,4
27 серпня	2,0	9,1	13,1	19,9	10,8	1596,9	-5,4
28 серпня		6,2	16,2	23,8	17,6	1608,1	-2,3
29 серпня		13,1	21,3	28,7	15,6	1624,4	2,8
30 серпня		15,0	23,2	30,7	15,7	1642,6	4,7
31 серпня		13,8	23,2	32,8	19,0	1660,8	4,7
1 вересня		16,7	23,1	29,8	13,1	1678,9	7,6
2 вересня		12,7	18,0	22,8	10,1	1691,9	2,4
3 вересня		9,9	18,0	25,7	15,8	1704,9	2,4
4 вересня		11,1	17,9	26,7	15,6	1717,8	2,3
5 вересня		11,1	17,9	24,8	13,7	1730,7	2,3
6 вересня		12,2	17,8	24,9	12,7	1743,5	2,2
7 вересня		10,1	15,9	21,9	11,8	1754,4	0,3
8 вересня		13,2	17,9	24,9	11,7	1767,3	2,3
9 вересня		13,1	19,0	26,9	13,8	1781,3	3,4
10 вересня		14,2	20,2	26,8	12,6	1796,5	4,6
11 вересня		10,1	17,2	23,7	13,6	1808,7	1,6
12 вересня		8,1	16,2	24,8	16,7	1819,9	0,6
13 вересня		13,0	16,2	22,0	9,0	1831,1	0,6
14 вересня		9,0	16,2	23,0	14,0	1842,3	0,6
15 вересня		10,0	17,2	23,1	13,1	1854,5	1,6
16 вересня	0,0	8,1	17,7	26,9	18,8	1867,2	2,1
17 вересня	1,0	9,9	15,1	24,0	14,1	1877,3	-0,5
18 вересня	10,2	11,4	14,1	19,3	7,9	1886,4	-1,5
19 вересня	0,0	6,3	14,4	20,6	14,3	1895,8	-1,2
20 вересня	0,0	10,5	16,1	22,5	12,0	1906,9	0,6
21 вересня	0,0	7,2	17,2	27,8	20,6	1919,1	1,6
22 вересня	0,0	10,9	19,4	29,9	19,0	1933,5	3,8
23 вересня	0,0	9,1	17,8	27,4	18,3	1946,3	2,2
24 вересня	0,0	9,0	12,5	15,6	6,6	1953,8	-3,1
25 вересня	0,0	0,7	8,5	15,9	15,2	1957,3	-7,0

26 вересня	0,0	0,9	7,2	15,3	14,4	1959,5	-8,4
27 вересня	0,0	-1,0	8,0	18,1	19,1	1962,5	-7,6
28 вересня	1,6	5,8	9,1	12,9	7,1	1966,6	-6,5
29 вересня	0,0	7,9	11,0	15,6	7,7	1972,6	-4,6
30 вересня	0,0	6,8	9,7	14,7	7,9	1977,3	-5,9
1 жовтня	0,2	4,3	7,1	11,1	6,8	1979,4	-1,5
2 жовтня	5,2	4,3	6,3	8,2	3,9	1980,7	-2,3
3 жовтня	0,0	4,9	9,7	16,1	11,2	1985,4	1,1
4 жовтня	1,0	3,4	10,4	16,0	12,6	1990,8	1,8
5 жовтня	5,6	9,5	11,9	15,6	6,1	1997,7	3,3
6 жовтня	2,8	7,3	10,0	12,3	5,0	2002,7	1,4
7 жовтня	0,4	8,9	11,4	15,2	6,3	2009,1	2,8
8 жовтня	2,4	10,6	12,2	14,5	3,9	2016,3	3,6
9 жовтня	2,4	10,4	11,3	12,4	2,0	2022,6	2,7
10 жовтня	3,2	9,6	10,7	12,2	2,6	2028,3	2,1
11 жовтня	0,8	7,2	10,1	13,8	6,6	2033,4	1,5
12 жовтня	0,0	7,5	10,2	13,9	6,4	2038,6	1,6
13 жовтня	0,4	3,0	6,0	9,3	6,3	2039,6	-2,6
14 жовтня	0,8	3,7	5,6	9,3	5,6	2040,2	-3,0
15 жовтня	0,0	3,4	5,3	9,1	5,7	2040,5	-3,3
16 жовтня	0,0	2,5	7,0	11,4	8,9	2042,5	-1,6
17 жовтня	0,0	6,0	9,2	12,6	6,6	2046,7	0,6
18 жовтня	1,2	7,5	9,4	13,0	5,5	2051,1	0,8
19 жовтня	5,2	1,7	6,4	8,9	7,2	2052,5	-2,2
20 жовтня	7,6	1,7	4,9	8,1	6,4	2052,5	-3,7
21 жовтня	0,0	3,4	6,4	8,2	4,8	2053,9	-2,2
22 жовтня	0,0	4,8	7,3	10,5	5,7	2056,2	-1,3
23 жовтня	0,0	6,8	9,3	13,3	6,5	2060,5	0,7
24 жовтня	0,0	9,6	11,5	13,7	4,1	2067,0	2,9
25 жовтня	6,2	4,9	10,1	14,2	9,3	2072,1	1,5
26 жовтня	0,2	2,2	6,6	11,2	9,0	2073,7	-2,0
27 жовтня	0,0	4,6	8,1	11,6	7,0	2076,8	-0,5
28 жовтня	0,2	1,2	6,3	12,0	10,8	2078,1	-2,3
29 жовтня	1,2	4,7	7,1	11,3	6,6	2080,2	-1,5
30 жовтня	0,0	1,9	7,8	13,2	11,3	2083,0	-0,8
31 жовтня	1,4	8,2	9,6	11,9	3,7	2087,6	1,0