



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 13
Український журнал природничих наук
№ 13

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 634.11:631.582:631.526
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.25>

ВПЛИВ УМОВ ЗВОЛОЖЕННЯ, БІОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГІБРИДІВ І ГУСТОТИ СТОЯННЯ РОСЛИН НА ВМІСТ СИРОГО ПРОТЕЇНУ В ЗЕРНІ КУКУРУДЗИ

М. О. Іванів¹, О. В. Сидякіна², Є. А. Гамула³

Вплив гібридного складу та густоти стояння рослин на показники якості зерна кукурудзи є актуальним питанням як з огляду на наукове обґрунтування, так і щодо практичного впровадження в сучасне аграрне виробництво. Метою дослідження є оцінювання впливу густоти стояння рослин на вміст сирого протеїну в зерні гібридів кукурудзи різних груп стиглості (ФАО) в умовах Північного Степу України. Польові дослідження проводили протягом 2022–2024 рр. на дослідному полі ТОВ «Агротехнологія-Плюс», що знаходиться в Кропивницькому районі Кіровоградської області. Вивчали сім гібридів марки DEKALB з ФАО від 310 до 420 (ДКС 4098, ДКС 4109, ДКС 4391, ДКС 4598, ДКС 4712, ДКС 5075, ДКС 5206) за восьми рівнів густоти стояння рослин – від 55 до 110 тис./га.

У фазах 3–5 та 7–9 листків проводили позакореневі підживлення мікродобривом Аміно Ультра Кукурудза. У дослідженнях застосовано польовий, лабораторний, математичний і статистичний методи для оцінювання взаємодії між генотипом, густотою стояння рослин і екологічними чинниками.

Встановлено, що вирішальним фактором, який впливає на вміст сирого протеїну в зерні кукурудзи, є погодні умови року вирощування. Найвищу концентрацію сирого протеїну в зерні визначено в помірно посушливому 2023 р. (у середньому 7,75%), а найнижчу – у 2024 р. (7,16%), який характеризувався гострим дефіцитом вологи у критичні фази росту й розвитку. Серед досліджуваних гібридів найвищі й найбільш стабільні показники білковості зерна формував гібрид ДКС 4391 (ФАО 350), з максимумом 8,45% у 2023 р. за густоти стояння рослин 80 тис./га. Загалом, оптимальне накопичення сирого протеїну в зерні спостерігали за щільності посівів 75–80 тис./га. Зниження густоти стояння рослин (≤ 60 тис./га) або надмірне загущення посівів (≥ 90 тис./га) призводило до зниження білковості зерна, що свідчить про обмеження як ресурсного, так і алелопатичного характеру.

¹ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
в.о. завідувача кафедри рослинництва та агроінженерії
(Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький)
e-mail: ivaniv_m@ksaeu.kherson.ua
ORCID: 0000-0002-4793-6194

² кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри рослинництва та агроінженерії
(Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький)
e-mail: sydiakina_o@ksaeu.kherson.ua
ORCID: 0000-0001-8812-6078

³ здобувач наукового ступеня доктора філософії
(Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький)
e-mail: gamula2204@gmail.com
ORCID: 0009-0007-5214-7599

Отримані результати підтверджують суттєвий вплив генотипу та густоти стояння рослин на якість зерна кукурудзи, особливо за контрастних гідротермічних умов. Одержані дані можуть бути використані для оптимізації технологій вирощування кукурудзи з метою стабілізації показників якості зерна в умовах кліматичних змін та економічної нестабільності.

Ключові слова: кукурудза, гібриди, ФАО, сирий протеїн, якість зерна, густина стояння рослин, умови зволоження, посуха.

INFLUENCE OF MOISTURE CONDITIONS, BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HYBRIDS, AND PLANT DENSITY ON CRUDE PROTEIN CONTENT IN MAIZE GRAIN

M. O. Ivaniv, O. V. Sydiakina, Ye. A. Hamula

The influence of hybrid composition and plant density on maize grain quality parameters remains a relevant issue both from the standpoint of scientific justification and for its practical implementation in modern agricultural production. The aim of the study was to evaluate the effect of plant density on the crude protein content in the grain of maize hybrids of different maturity groups (FAO) under the conditions of the Northern Steppe of Ukraine.

Field experiments were conducted during 2022–2024 at the experimental field of Agrotechnology-Plus LLC, located in the Kropyvnytskyi district of Kirovohrad region. Seven DEKALB hybrids with FAO from 310 to 420 (DKC 4098, DKC 4109, DKC 4391, DKC 4598, DKC 4712, DKC 5075, DKC 5206) were studied at eight levels of plant density ranging from 55 to 110 thousand plants/ha. Foliar feeding with the micronutrient fertilizer Amino Ultra Corn was performed at the 3–5 and 7–9 leaf stages. The study applied field, laboratory, mathematical, and statistical methods to assess the interaction between genotype, plant density, and environmental factors.

It was established that the determining factor influencing the crude protein content in maize grain was the weather conditions of the growing year. The highest protein concentration was observed in the moderately dry 2023 season (average 7.75%), while the lowest was recorded in 2024 (7.16%), which was characterized by severe moisture deficiency during critical growth and development phases. Among the studied hybrids, the highest and most stable protein content was formed by hybrid DKC 4391 (FAO 350), with a maximum value of 8.45% in 2023 at a plant density of 80 thousand/ha. Overall, optimal protein accumulation in the grain was observed at a planting density of 75–80 thousand/ha. Reducing plant density to ≤60 thousand/ha or excessive thickening of stands (≥90 thousand/ha) led to decreased grain protein content, indicating both resource-related and allelopathic limitations.

The obtained results confirm the significant influence of genotype and plant density on maize grain quality, particularly under contrasting hydrothermal conditions. These findings can be used to optimize maize cultivation technologies with the aim of stabilizing grain quality indicators under conditions of climate change and economic instability.

Key words: maize, hybrids, FAO, crude protein, grain quality, plant density, moisture conditions, drought.

Вступ

За сучасних умов глобальних кліматичних змін, посилення конкуренції на аграрному ринку та необхідності забезпечення продовольчої та енергетичної безпеки питання якості зерна кукурудзи привертає до себе все більшу увагу. З огляду на трансформацією агровиробництва від екстенсивної до інтенсивної моделі, орієнтованої на стабільні рівні врожайності та високу якість продукції, виникає потреба в удосконаленні агротехнологій вирощування кукурудзи з урахуванням показників якості в загальній оцінці. Особливої актуальності набуває дослідження взаємозв'язку між показниками якості зерна та окремими еле-

ментами технології, зокрема добором гібридів та густотою стояння рослин (Obeng-Bio et al., 2019; Feng, 2024; Popa et al., 2025).

Одним із провідних факторів, який впливає на якість зерна, є генетичний потенціал гібридів кукурудзи. Сучасні гібриди різняться за типом зерна, стійкістю до абіотичних і біотичних стресів, рівнем накопичення білка й крохмалю. Добір гібридів відповідно до ґрунтово-кліматичних умов та цільового призначення врожаю (корм, перероблення, експорт) є важливим чинником не лише для отримання високого рівня врожайності, а й для забезпечення необхідних параметрів якості зерна (Owusu et al., 2022; Djalovic et al., 2024; Meng et al., 2024).

За результатами експериментальних досліджень, проведених представниками компанії «Лімагрейн» у ґрунтово-кліматичних умовах Центрального Лісостепу України, встановлено, що збільшення густоти стояння рослин кукурудзи призводить до підвищеної конкуренції за світло, вологу та елементи живлення, що негативно позначається на формі качанів, кількості в них зерен та їх масі. Так, загущення посівів кукурудзи з 60 до 100 тис./га зменшує індивідуальну продуктивність рослин у 1,5–1,8 раза (Андрієнко і Романенко, 2013). Надмірне загущення посівів призводить до зменшення вмісту в зерні кукурудзи білка та жиру на 4–11%, збільшення вмісту крохмалю на 0,65–2,00% та розчинних цукрів на 39–69% (Wang et al., 2023), а також до підвищення вологості зерна (Шульц, 2022).

Незважаючи на зниження загальної врожайності та ефективності використання площі в розріджених посівах кукурудзи, такий елемент технології вирощування має низку позитивних впливів на показники якості зерна. У розріджених посівах формується більша площа живлення, що зменшує конкуренцію рослин за поживні речовини (Gong et al., 2022); спостерігається краща освітленість листової поверхні, що сприяє більш тривалому функціонуванню нижніх листків і накопиченню асимілятів (Li et al., 2018); посіви краще забезпечуються вологою, що особливо важливо в умовах нестійкого зволоження (Qin et al., 2022); як результат – покращуються показники якості зерна. Наприклад, за результатами досліджень, проведених у ґрунтово-кліматичних умовах північного сходу Китаю, встановлено, що зниження густоти стояння рослин з 80 до 50 тис./га призводило до суттєвого збільшення маси 1000 зерен та зростання вмісту білка в зерні (Zhang et al., 2020). За результатами досліджень Цзян Ю та ін. з вископродуктивним для умов Китаю гібридом кукурудзи Zhengdan 958, встановлено, що зменшення густоти стояння рослин з 90 до 60 тис./га призвело до збільшення вмісту білка в зерні на 0,7%, а вмісту жиру – на 0,3% (Jiang et al., 2023).

У зріджених посівах відбувається кращий повітрообмін, зростає ефективність транспірації і спостерігаються менші ризики самозатіннення рослин, що своєю чергою сприяє зниженню вологості зерна на момент збирання, зменшенню ураження качанів грибними патогенами, кращим умовам дозрівання зерна до стану фізіологічної

стиглості, формуванню зерна з високими показниками якості (Zhang et al., 2021; Djaman et al., 2022).

Таким чином, дослідження впливу гібридного складу та густоти стояння рослин на формування показників якості зерна кукурудзи є актуальним питанням з погляду як наукового обґрунтування, так і практичного впровадження в аграрному виробництві. Отримані результати дозволять удосконалити сучасні технології вирощування, що забезпечить стабільну якість продукції, навіть в умовах змін клімату та економічної нестабільності.

Метою дослідження було дослідити вплив густоти стояння рослин на показники якості зерна гібридів кукурудзи різних груп ФАО в ґрунтово-кліматичних умовах Північного Степу України.

Матеріал і методи

У 2022–2024 рр. на базі ТОВ АФ «Агротехнологія-Плюс» (Кропивницький район Кіровоградської області; географічні координати: 48°24'54" пн. ш., 32°01'02" сх. д.) проводили польові дослідження з гібридами кукурудзи марки DEKALB різних груп стиглості (ФАО). Ґрунтовий покрив дослідної ділянки представлений чорноземом звичайним малогумусним із глибоким гумусовим горизонтом та середнім рівнем забезпеченості рухливими формами основних макроелементів.

Гібриди ДКС 4098 (ФАО 310), ДКС 4109 (ФАО 320), ДКС 4391 (ФАО 350), ДКС 4598 (ФАО 360), ДКС 4712 (ФАО 370), ДКС 5075 (ФАО 410), ДКС 5206 (ФАО 420) вирощували за різної густоти стояння рослин: 55, 60, 65, 70, 75, 80, 90 та 110 тис./га. Загальна площа дослідної ділянки – 100 м², облікова – 60 м².

У ході досліджень використовували польовий, лабораторний, математичний і статистичний методи, а також рекомендовану для даної зони технологію вирощування культури, за винятком факторів, узятих на вивчення. У фазах 3–5 і 7–9 листків проводили позакореневі підживлення посівів мікродобривом Аміно Ультра Кукурудза.

Вміст сирого протеїну в зерні кукурудзи визначали за методом К'ельдаля, який ґрунтується на визначенні загального вмісту азоту з подальшим перерахунком на білок шляхом множення на коефіцієнт 6,25. Методика передбачала мінералізацію зразків концентрованою сірчаною кислотою за присутності каталізаторів, дистиляцію аміаку та титрування. Одержані результати виражали у відсотках сирого протеїну (% від маси абсолютно сухої речовини).

Статистичне оброблення експериментальних даних здійснювали з використанням програмного пакету Microsoft Office Excel та програмно-інформаційного комплексу Agrostat (Ушкаренко та ін., 2008).

Результати

Аналіз динаміки вмісту сирого протеїну в зерні кукурудзи за трирічний період свідчить про суттєвий вплив погодних умов року вирощування, біологічних особливостей гібридів (фактор А) та густоти стояння рослин (фактор В) на формування показників якості врожаю. Встановлено, що найбільша кількість сирого протеїну в зерні накопичувалася у 2023 р., а найнижча – у 2024 р. (табл. 1).

У більш вологому 2022 р. досліджень сирого протеїну в зерні накопичувалося менше, ніж у більш посушливому 2023 р., що узгоджується із загальновідомим положенням про накопичення більшої кількості білка за умов дефіциту води. Найпосушливіший 2024 р. досліджень характеризувався водним стресом у критичні фази росту й розвитку рослин кукурудзи, що призвело до гальмування процесів азотного обміну, особливо у фазі наливу зерна, що зумовило найнижчі за три роки досліджень показники вмісту сирого протеїну. У середньому за досліджуваними факторами у 2022 р. вміст сирого протеїну в зерні кукурудзи становив 7,53%, у 2023 р. – 7,75%, а у 2024 р. – 7,16%.

Серед гібридів найвищий рівень сирого протеїну стабільно формував гібрид ДКС 4391 (FAO 350), з максимальним значенням 8,45% у 2023 р. за густоти стояння рослин 80 тис./га. Загалом, щільність посівів у межах 75–80 тис./га забезпечувала найбільш оптимальні умови для формування білкового потенціалу завдяки ефективному поєднанню площі живлення, фотосинтетичної активності та азотного обміну. Зменшення густоти рослин до 55–60 тис./га, як і надмірне загущення посівів (понад 90 тис./га), призводило до зниження вмісту протеїну в зерні, що свідчить про дію як екологічних, так і аделопатичних обмежень.

У середньому за трирічний період досліджень встановлено суттєву диференціацію гібридів кукурудзи за рівнем накопичення сирого протеїну в зерні. Найвищим цей показник визначено в гібрида ДКС 4391 (FAO 350) – 7,81% (рис. 1), що свідчить про його підвищену потенційну здатність до формування білкового компонента врожаю навіть за мінливих гідротермічних умов. Дещо нижчі, але стабільно високі

показники забезпечили гібриди ДКС 4598 (FAO 360) – 7,52%, ДКС 4712 (FAO 370) – 7,46% та ДКС 4098 (FAO 310) – 7,42%. Близькі значення спостерігали в гібридів ДКС 5075 (FAO 410) і ДКС 5206 (FAO 420) – 7,41 та 7,40% відповідно. Найнижчий вміст сирого протеїну в зерні мав гібрид ДКС 4109 (FAO 320) – 7,34%. Отримані дані підтверджують важливе значення біологічних особливостей гібридів у формуванні показників якості зерна, зокрема вмісту сирого протеїну, та можуть бути використані для оптимізації гібридного складу посівів кукурудзи залежно від цільового напрямку використання продукції.

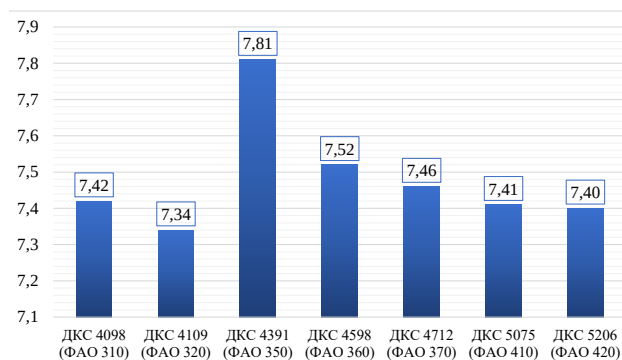


Рис. 1. Вміст сирого протеїну в зерні гібридів кукурудзи різних груп FAO в середньому за фактором В (середнє за 2022–2024 рр.), %

Результати дисперсійного аналізу підтвердили достовірний вплив досліджуваних факторів, а також взаємодії між ними, що свідчить про тісну залежність вмісту сирого протеїну в зерні від поєднання генотипу, густоти стояння рослин і стресового навантаження за водним фактором.

Обговорення

Одержані нами результати досліджень у 2023 р., відповідно до яких вміст сирого протеїну в зерні кукурудзи був вищим на фоні водного дефіциту, на відміну від зведеного 2022 р., узгоджуються з даними літературних джерел, які свідчать про посилений синтез білка в умовах посухи (Safian et al., 2022). За результатами досліджень Ч. Хуан та ін. встановлено, що водний дефіцит у критичних фазах росту й розвитку посилює синтез білкових сполук у зерні кукурудзи через зниження формування крохмалю, що зумовлено концентраційним ефектом (Huang et al., 2023). А.А. Коррендо та ін. зазначають, що посуха після запилення сприяє суттєвому збільшенню білко-

Таблиця 1

**Вміст сирого протеїну в зерні гібридів кукурудзи різних груп ФАО
залежно від густоти стояння рослин**

Гібрид (фактор А)		Густота стояння рослин, тис./га (фактор В)							
		55	60	65	70	75	80	90	110
2022 рік									
ДКС 4098 (ФАО 310)		7,10	7,20	7,40	7,57	7,65	7,80	7,70	7,30
ДКС 4109 (ФАО 320)		6,95	7,15	7,35	7,50	7,62	7,70	7,60	7,25
ДКС 4391 (ФАО 350)		7,20	8,15	7,95	7,81	7,90	8,20	8,05	7,60
ДКС 4598 (ФАО 360)		7,05	7,30	7,60	7,75	7,80	7,88	7,75	7,40
ДКС 4712 (ФАО 370)		6,90	7,10	7,45	7,65	7,78	7,90	7,80	7,50
ДКС 5075 (ФАО 410)		6,75	7,05	7,35	7,60	7,70	7,85	7,80	7,55
ДКС 5206 (ФАО 420)		6,85	7,10	7,30	7,61	7,75	7,80	7,70	7,45
2023 рік									
ДКС 4098 (ФАО 310)		7,31	7,42	7,62	7,83	7,89	8,04	7,94	7,51
ДКС 4109 (ФАО 320)		7,16	7,36	7,57	7,73	7,85	7,92	7,81	7,47
ДКС 4391 (ФАО 350)		7,42	8,39	8,19	8,05	8,14	8,45	8,29	7,83
ДКС 4598 (ФАО 360)		7,26	7,51	7,83	7,98	8,05	8,11	7,98	7,66
ДКС 4712 (ФАО 370)		7,11	7,31	7,67	7,88	7,96	8,13	8,06	7,73
ДКС 5075 (ФАО 410)		6,98	7,27	7,62	7,83	7,92	8,09	8,06	7,71
ДКС 5206 (ФАО 420)		7,05	7,31	7,52	7,84	7,97	8,04	7,94	7,67
2024 рік									
ДКС 4098 (ФАО 310)		6,75	6,91	7,03	7,19	7,27	7,41	7,32	6,94
ДКС 4109 (ФАО 320)		6,60	6,79	6,99	7,13	7,24	7,31	7,20	6,89
ДКС 4391 (ФАО 350)		6,84	7,74	7,55	7,42	7,50	7,80	7,66	7,22
ДКС 4598 (ФАО 360)		6,70	6,94	7,24	7,36	7,42	7,48	7,36	7,04
ДКС 4712 (ФАО 370)		6,55	6,78	7,07	7,27	7,34	7,51	7,46	7,04
ДКС 5075 (ФАО 410)		6,41	6,69	7,03	7,24	7,31	7,47	7,46	7,18
ДКС 5206 (ФАО 420)		6,51	6,78	6,99	7,23	7,37	7,42	7,32	7,18
Середнє за 2022–2024 рр.									
ДКС 4098 (ФАО 310)		7,05	7,18	7,35	7,53	7,60	7,75	7,65	7,25
ДКС 4109 (ФАО 320)		6,90	7,10	7,30	7,45	7,57	7,64	7,54	7,20
ДКС 4391 (ФАО 350)		7,15	8,09	7,90	7,76	7,85	8,15	8,00	7,55
ДКС 4598 (ФАО 360)		7,00	7,25	7,56	7,70	7,76	7,82	7,70	7,37
ДКС 4712 (ФАО 370)		6,85	7,06	7,40	7,60	7,69	7,85	7,77	7,42
ДКС 5075 (ФАО 410)		6,71	7,00	7,33	7,56	7,64	7,80	7,77	7,48
ДКС 5206 (ФАО 420)		6,80	7,06	7,27	7,56	7,70	7,75	7,65	7,43
НІР ₀₅ , %:	2022 р.	А – 0,17; В – 0,14; С – 0,11; АВ – 0,23							
	2023 р.	А – 0,21; В – 0,18; С – 0,14; АВ – 0,29							
	2024 р.	А – 0,14; В – 0,11; С – 0,09; АВ – 0,19							

вості зерна кукурудзи, незважаючи на зниження вмісту крохмалю та рівня загальної врожайності (Correndo et al., 2021). У дослідженнях Ц. Го та ін. описано механізми, за яких посушливі умови активізують процеси синтезу білка в ендоспермі зерна кукурудзи на молекулярному рівні, що підтверджує підвищення співвідношення білок/крохмаль за дефіциту вологи (Guo et al., 2021).

У 2024 р. досліджень, коли вегетація проходила в умовах вираженого гідротермічного стресу, спостерігалася істотне зни-

ження вмісту сирого протеїну в зерні майже всіх гібридів – у середньому на 0,5–0,8% порівняно з попереднім роком, що узгоджується з результатами досліджень Х.С. Сайні та М.Е. Вестгейт, які зазначали, що надмірна посуха у фазі наливу зерна обмежує транспортування асимілятів і порушує азотний метаболізм, внаслідок чого формується більш дрібне та менш білкове зерно (Saini & Westgate, 1999).

Інтенсивна посуха здатна суттєво знизити зернову продуктивність кукурудзи,

негативно впливаючи на ріст і розвиток рослин, фізіологічні процеси, які в них відбуваються, та формування репродуктивних органів (Verbraeken et al., 2021; Yasin et al., 2024). Найбільші втрати врожаю (до 90%) відбуваються в разі дефіциту вологи в критичні фази росту й розвитку, зокрема незадовго до цвітіння та під час наливу зерна (Sheoran et al., 2022; Li et al., 2023).

Щоб розв'язати проблему посухи, яка суттєво позначається на зерновій продуктивності кукурудзи, пріоритетним завданням сучасного аграрного виробництва є впровадження у виробництво гібридів, які мають підвищену стійкість до абіотичних стресів, зокрема водного дефіциту. Саме такі адаптивні гібриди здатні забезпечити стабільне формування врожаю в умовах нестабільних умов вологозабезпечення (Adee et al., 2016; Salika et al., 2021; Yousaf et al., 2022).

Для підвищення стійкості гібридів до посухи аграрна наука активно впроваджує інтегровані стратегії селекції і феномічного аналізу. Зокрема, огляд сучасних підходів у селекції показав, що використання геномних технологій, високопродуктивного фенотипування і транскриптомного аналізу суттєво пришвидшує створення гібридів з підвищеною посухостійкістю (McMillen et al., 2022). Це підтверджується результатами досліджень А. Рашид та ін., якими доведено, що нові гібриди, адаптовані до

нестійких умов зволоження, забезпечують стабільно вищі рівні врожайності та економію води порівняно зі звичайними гібридами (Rasheed et al., 2023). Доцільність такого підходу обґрунтовує і наше дослідження, спрямоване на оцінювання якості зерна гібридів кукурудзи різних груп ФАО за умов різного рівня зволоження, що є актуальним у контексті зміни клімату та необхідності адаптації технологій вирощування до нових агрокліматичних умов.

Висновки

За результатами трирічних досліджень встановлено суттєвий вплив метеорологічних умов вегетаційного періоду, біологічних особливостей гібридів та густоти стояння рослин на вміст сирого протеїну в зерні кукурудзи. Найбільш сприятливі умови для формування білкового потенціалу визначено за густоти стояння рослин 75–80 тис./га. У надмірно загущених або зріджених посівах вміст сирого протеїну в зерні знижувався. Виявлено стійку перевагу гібрида ДКС 4391 (ФАО 350) за рівнем білковості зерна, що засвідчує його високу адаптивну здатність до змін гідротермічного режиму. Результати досліджень можуть бути використані для науково обґрунтованого добору гібридів та густоти стояння рослин з урахуванням рівня зволоження з метою оптимізації показників якості зерна кукурудзи в умовах кліматичних змін.

Список використаної літератури

- Андрієнко А., Романенко М. Густота як фактор продуктивності кукурудзи. *Пропозиція*. 2013 [Електронний ресурс]. URL: <https://surli.cc/rhenua> (дата звернення: 01.07.2025).
- Шульц П. Вплив густоти висіву кукурудзи на урожайність. *Агроном*. 2022 [Електронний ресурс]. URL: <https://surl.li/fxyexz> (дата звернення: 01.07.2025).
- Ушкаренко В.О., Нікішенко В.А., Голобородько С.П., Коковіхін С.В. Дисперсійний і кореляційний аналіз у землеробстві та рослинництві : навчальний посібник. Херсон : Айлант, 2008. 272 с.
- Adee E., Roozeboom K., Balboa G.R., Schlegel A., Ciampitti I.A. Drought-tolerant corn hybrids yield more in drought-stressed environments with no penalty in non-stressed environments. *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. P. 1534. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01534>.
- 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. № 9. P. 1851. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091851>.
- Djalovic I., Prasad P.V.V., Dunderski D., Katanski S., Latković D., Kolarić L. Optimal Plant Density Is Key for Maximizing Maize Yield in Calcareous Soil of the South Pannonian Basin. *Plants*. 2024. Vol. 13. № 13. P. 1799. <https://doi.org/10.3390/plants13010143>.
- 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. P. 100417. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100417>.
- Feng X.Z. Genetic and environmental factors influencing grain quality in maize. *Maize Genomics and Genetics*. 2024. Vol. 15. № 2. P. 93–101. <https://doi.org/10.5376/mgg.2024.15.001>.
- Gong H., Xiang Y., Wako B.K., Jiao X. Complementary effects of phosphorus supply and planting density on maize growth and phosphorus use efficiency. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 26. № 13. P. 983788. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.983788>.

- Guo J., Qu L., Hu Y., Lu W., Lu D. Proteomics reveals the effects of drought stress on the kernel development and starch formation of waxy maize. *BMC Plant Biology*. 2021. Vol. 21. P. 434. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03214-z>.
- Huang C., Qin A., Gao Ya., Ma S., Liu Z., Zhao B., Ning D., Zhang K., Gong W., Sun M., Liu Z. Effects of water deficit at different stages on growth and ear quality of waxy maize. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. P. 1069551. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1069551>.
- Jiang Y., Wei H., Hou S., Yin X., Wei S., Jiang D. Estimation of Maize Yield and Protein Content under Different Density and N Rate Conditions Based on UAV Multi-Spectral Images. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. № 2. P. 421. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020421>.
- Li J., Xie R.Z., Wang K.R., Hou P., Ming B., Zhang G.Q., Liu G.Z., Wu M., Yang Z.S., Li S.K. Response of canopy structure, light interception and grain yield to plant density in maize. *The Journal of Agricultural Science*. 2018. Vol. 156. № 6. P. 785–794. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000692>.
- Li Ya., Zhang P., Sheng W., Zhang Z., Rose R.J., Song Y. Securing maize reproductive success under drought stress by harnessing CO₂ fertilization for greater productivity. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. P. 1221095. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1221095>.
- McMillen M.S., Mahama A.A., Sibiya J., Lübberstedt T., Suza W.P. Improving drought tolerance in maize: Tools and techniques. *Frontiers in Genetics*. 2022. Vol. 13. P. 1001001. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1001001>.
- Meng L., Zhang J., Clarke N. A Critical Review of Recent Advances in Maize Stress Molecular Biology. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25. № 22. P. 12383. <https://doi.org/10.3390/ijms252212383>.
- Obeng-Bio E., Badu-Apraku B., Ifie B.E., Danquah A., Blay E.T., Annor B. Genetic analysis of grain yield and agronomic traits of early provitamin A quality protein maize inbred lines in contrasting environments. *Journal of Agricultural Science*. 2019. Vol. 157. P. 413–433. <https://doi.org/10.1017/S0021859619000753>.
- Owusu G.A., Ribeiro P.F., Abe A. Genetic analysis of grain yield and agronomic traits of quality protein maize inbred lines and their single-cross hybrids under drought stress and well-watered conditions. *Ecological Genetics and Genomics*. 2022. Vol. 22. P. 100105. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2021.100105>.
- Popa C., Călugăr R.E., Varga A., Muntean E., Băcilă I., Vana C.D., Racz I., Tritean N., Berindean I.V., Ona A.D., Muntean L. Evaluating Maize Hybrids for Yield, Stress Tolerance, and Carotenoid Content: Insights into Breeding for Climate Resilience. *Plants*. 2025. Vol. 14. № 1. P. 138–157. <https://doi.org/10.3390/plants14010138>.
- Qin J., Wang X., Fan X., Jiang M., Lv M. Whether Increasing Maize Planting Density Increases the Total Water Use Depends on Soil Water in the 0–60 cm Soil Layer in the North China Plain. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 10. P. 5848. <https://doi.org/10.3390/su14105848>.
- Rasheed A., Jie H., Ali B., He P., Zhao L., Ma Yu., Xing H., Qari S.H., Hassan M.U., Hamid M.R., Jie Yu. Breeding Drought-Tolerant Maize (*Zea mays*) Using Molecular Breeding Tools: Recent Advancements and Future Prospective. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. № 6. P. 1459. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061459>.
- Safian N., Naderi M.R., Torabi M., Soleymani A., Salemi H.R. Corn (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) yield and nutritional quality affected by drought stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2022. Vol. 45. P. 102486. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102486>.
- Saini H.S., Westgate M.E. Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*. 1999. Vol. 68. P. 59–96. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60843-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3).
- Salika R., Riffat J. Abiotic stress responses in maize: a review. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2021. Vol. 43. № 9. P. 130. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03296-0>.
- Sheoran S., Kaur Y., Kumar S., Shukla S., Rakshit S., Kumar R. Recent Advances for Drought Stress Tolerance in Maize (*Zea mays* L.): Present Status and Future Prospects. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 872566. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.872566>.
- Verbraeken L., Wuyts N., Mertens S., Cannoot B., Maleux K., Demuyne K., De Block J., Merchie J., Dhondt S., Bonaventure G., Crafts-Brandner S., Vogel J., Bruce W., Inzé D., Maere S., Nelissen H. Drought affects the rate and duration of organ growth but not inter-organ growth coordination. *Plant Physiology*. 2021. Vol. 186. № 2. P. 1336–1353. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab155>.
- 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. № 9. P. 1835. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091835>.
- Yasin S., Zavala-García F., Niño-Medina G., Rodríguez-Salinas P.A., Gutiérrez-Diez A., Sinagawa-García S.R., Lugo-Cruz E. Morphological and Physiological Response of Maize (*Zea mays* L.) to Drought Stress during Reproductive Stage. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. № 8. P. 1718. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081718>.
- Yousaf M.I., Riaz M.W., Jiang Yu., 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. P. 898823. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.898823>.

Zhang D., Sun Z., Feng L., Bai W., Yang N., Zhang Z., Du G., Feng C., Cai Q., Wang Q., Zhang Yu., Wang R., Arshad A., Hao X., Sun M., Gao Z., Zhang L. Maize plant density affects yield, growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping. *Field Crops Research*. 2020. Vol. 257. P. 107926. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107926>.

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. P. 752606. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.752606>.

References

Andriienko, A., & Romanenko, M. (2013). Hustota yak faktor produktyvnosti kukurudzy [Density as a factor in corn productivity]. *Propozytsiia [Proposal]*. [Electronic resource]. URL: <https://surli.cc/rhenua> (access date 01.07.2025) [in Ukrainian].

Shults, P. (2022). Vplyv hustoty vysivu kukurudzy na urozhainist [The effect of corn seeding density on yield]. *Ahronom [Agronomist]*. [Electronic resource]. URL: <https://surl.li/fxyexz> (access date 01.07.2025) [in Ukrainian].

Ushkarenko, V.O., Nikishenko, V.L., Holoborodko, S.P., & Kokovikhin, S.V. (2008). Dyspersiyni i koreliatsiyni analiz u zemlerobstvi ta roslynnytstvi : navchalnyi posibnyk [Dispersion and correlation analysis in agriculture and crop production : a textbook]. Kherson : Ailant, 272 [in Ukrainian].

Adee, E., Roozeboom, K., Balboa, G. R., Schlegel, A., & Ciampitti, I. A. (2016). Drought-tolerant corn hybrids yield more in drought-stressed environments with no penalty in non-stressed environments. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1534. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01534> [in English].

Correndo, A.A., Fernandez, J.A., Vara Prasad, P.V., & Ciampitti, I.A. (2021). Do Water and Nitrogen Management Practices Impact Grain Quality in Maize? *Agronomy*, 11 (9), 1851. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091851> [in English].

Djalovic, I., Prasad, P. V. V., Dunderski, D., Katanski, S., Latković, D., & Kolarić, L. (2024). Optimal Plant Density Is Key for Maximizing Maize Yield in Calcareous Soil of the South Pannonian Basin. *Plants*, 13 (13), 1799. <https://doi.org/10.3390/plants13010143> [in English].

Djaman, K., Allen, S., Djaman, D. S., Koudahe, K., Irmak, S., Puppala, N., Darapuni, M. K., & Angadi, S. V. (2022). Planting date and plant density effects on maize growth, yield and water use efficiency. *Environmental Challenges*, 6, 100417. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100417> [in English].

Feng, X.Z. (2024). Genetic and environmental factors influencing grain quality in maize. *Maize Genomics and Genetics*, 15 (2), 93–101. <https://doi.org/10.5376/mgg.2024.15.0010> [in English].

Gong, H., Xiang, Y., Wako, B. K., & Jiao, X. (2022). Complementary effects of phosphorus supply and planting density on maize growth and phosphorus use efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 26 (13), 983788. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.983788> [in English].

Guo, J., Qu, L., Hu, Y., Lu, W., & Lu, D. (2021). Proteomics reveals the effects of drought stress on the kernel development and starch formation of waxy maize. *BMC Plant Biology*, 21, 434. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03214-z> [in English].

Huang, C., Qin, A., Gao, Ya., Ma, S., Liu, Z., Zhao, B., Ning, D., Zhang, K., Gong, W., Sun, M., & Liu, Z. (2023). Effects of water deficit at different stages on growth and ear quality of waxy maize. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1069551. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1069551> [in English].

Jiang, Y., Wei, H., Hou, S., Yin, X., Wei, S., & Jiang, D. (2023). Estimation of Maize Yield and Protein Content under Different Density and N Rate Conditions Based on UAV Multi-Spectral Images. *Agronomy*, 13 (2), 421. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020421> [in English].

Li, J., Xie, R.Z., Wang, K.R., Hou, P., Ming, B., Zhang, G.Q., Liu, G.Z., Wu, M., Yang, Z.S., & Li, S.K. (2018). Response of canopy structure, light interception and grain yield to plant density in maize. *The Journal of Agricultural Science*, 156(6), 785–794. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000692> [in English].

Li, Ya., Zhang, P., Sheng, W., Zhang, Z., Rose, R.J., & Song, Y. (2023). Securing maize reproductive success under drought stress by harnessing CO₂ fertilization for greater productivity. *Front. Plant Sci*, 14, 1221095. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1221095> [in English].

McMillen, M.S., Mahama, A.A., Sibiya, J., Lübberstedt, T., & Suza, W.P. (2022). Improving drought tolerance in maize: Tools and techniques. *Frontiers in Genetics*, 13, 1001001. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1001001> [in English].

Meng, L., Zhang, J., & Clarke, N. (2024). A Critical Review of Recent Advances in Maize Stress Molecular Biology. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22), 12383. <https://doi.org/10.3390/ijms252212383> [in English].

Obeng-Bio, E., Badu-Apraku, B., Ifie, B.E., Danquah, A., Blay, E.T., & Annor, B. (2019). Genetic analysis of grain yield and agronomic traits of early provitamin A quality protein maize inbred lines in

contrasting environments. *Journal of Agricultural Science*, 157, 413–433. <https://doi.org/10.1017/S0021859619000753> [in English].

Owusu, G.A., Ribeiro, P.F., & Abe, A. (2022). Genetic analysis of grain yield and agronomic traits of quality protein maize inbred lines and their single-cross hybrids under drought stress and well-watered conditions. *Ecological Genetics and Genomics*, 22, 100105. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2021.100105> [in English].

Popa, C., Călugăr, R.E., Varga, A., Muntean, E., Băcilă, I., Vana, C.D., Racz, I., Tritean, N., Berindean, I.V., Ona, A.D., & Muntean, L. (2025). Evaluating Maize Hybrids for Yield, Stress Tolerance, and Carotenoid Content: Insights into Breeding for Climate Resilience. *Plants*, 14 (1), 138–157. <https://doi.org/10.3390/plants14010138> [in English].

Qin, J., Wang, X., Fan, X., Jiang, M., & Lv, M. (2022). Whether Increasing Maize Planting Density Increases the Total Water Use Depends on Soil Water in the 0–60 cm Soil Layer in the North China Plain. *Sustainability*, 14 (10), 5848. <https://doi.org/10.3390/su14105848> [in English].

Rasheed, A., Jie, H., Ali, B., He, P., Zhao, L., Ma, Yu., Xing, H., Qari, S.H., Hassan, M.U., Hamid, M.R., & Jie, Yu. (2023). Breeding Drought-Tolerant Maize (*Zea mays*) Using Molecular Breeding Tools: Recent Advancements and Future Prospective. *Agronomy*, 13 (6), 1459. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061459> [in English].

Safian, N., Naderi, M.R., Torabi, M., Soleymani, A., & Salemi, H.R. (2022). Corn (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) yield and nutritional quality affected by drought stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 45, 102486. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102486> [in English].

Saini, H.S., & Westgate, M.E. (1999). Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, 68, 59–96. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60843-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3) [in English].

Salika, R., & Riffat, J. (2021). Abiotic stress responses in maize: a review. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(9), 130. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03296-0> [in English].

Sheoran, S., Kaur, Y., Kumar, S., Shukla, S., Rakshit, S., & Kumar, R. (2022). Recent Advances for Drought Stress Tolerance in Maize (*Zea mays* L.): Present Status and Future Prospects. *Frontiers in Plant Science*, 13, 872566. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.872566> [in English].

Verbraeken, L., Wuyts, N., Mertens, S., Cannoot, B., Maleux, K., Demuynck, K., De Block, J., Merchie, J., Dhondt, S., Bonaventure, G., Crafts-Brandner, S., Vogel, J., Bruce, W., Inzé, D., Maere, S., & Nelissen, H. (2021). Drought affects the rate and duration of organ growth but not inter-organ growth coordination. *Plant Physiology*, 186 (2), 1336–1353. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab155> [in English].

Wang, F., Wang, L., Yu, X., Gao, J., Ma, D., Guo, H., & Zhao, H. (2023). Effect of Planting Density on the Nutritional Quality of Grain in Representative High-Yielding Maize Varieties from Different Eras. *Agriculture*, 13 (9), 1835. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091835> [in English].

Yasin, S., Zavala-García, F., Niño-Medina, G., Rodríguez-Salinas, P.A., Gutiérrez-Diez, A., Sinagawa-García, S.R., & Lugo-Cruz, E. (2024). Morphological and Physiological Response of Maize (*Zea mays* L.) to Drought Stress during Reproductive Stage. *Agronomy*, 14 (8), 1718. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081718> [in English].

Yousaf, M.I., Riaz, M.W., Jiang, Yu., Yasir, M., Aslam, M.Z., Hussain, S., Shah, S.A.S., Shehzad, A., Riasat, G., Manzoor, M.A., & Akhtar, I. (2022). 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*, 13, 898823. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.898823> [in English].

Zhang, D., Sun, Z., Feng, L., Bai, W., Yang, N., Zhang, Z., Du, G., Feng, C., Cai, Q., Wang, Q., Zhang, Yu., Wang, R., Arshad, A., Hao, X., Sun, M., Gao, Z., & Zhang, L. (2020). Maize plant density affects yield, growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping. *Field Crops Research*, 257, 107926. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107926> [in English].

Zhang, Y., Xu, Z., Li, J., & Wang, R. (2021). Optimum Planting Density Improves Resource Use Efficiency and Yield Stability of Rainfed Maize in Semiarid Climate. *Frontiers in Plant Science*, 12, 752606. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.752606> [in English].

Отримано: 18.07.2025

Прийнято: 26.08.2025

Опубліковано: 17.10.2025

