

БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН (НА ПРИКЛАДІ ЗЛАКОВИХ КУЛЬТУР)

Романчук Л.Д.¹, Голуб В.О.², Кравчук-Ободзінська Т.В.¹

¹Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

²Волинський національний університет імені Лесі Українки

вул. Потапова, 9, корпус С, 43025, м. Луцьк

ke_rld@ztu.edu.ua, Golub.Valentina@vnu.edu.ua, ke_ktv@ztu.edu.ua

У статті представлено результати комплексного багаторічного дослідження (2021–2024 рр.), спрямованого на оцінку ефективності біотехнологічних підходів у підвищенні екологічної безпеки виробництва харчової продукції в умовах посилення кліматичних змін. Об'єктом дослідження виступали основні злакові культури України – пшениця озима, ячмінь ярий, кукурудза та жито озиме, які мають стратегічне значення для забезпечення продовольчої безпеки держави. Дослідження проводили в межах трьох агрокліматичних зон України – Полісся, Лісостепу та Південного Степу – з урахуванням регіональних відмінностей гідротермічного режиму та рівня адаптивності культур до абіотичних стресів.

Метою роботи було встановити вплив кліматичних факторів, насамперед гідротермічних умов, на врожайність та екологічну стабільність злакових культур, а також оцінити ефективність застосування різних груп біотехнологічних та їх комплексного поєднання в системах адаптивного землеробства.

Отримані результати свідчать, що в умовах інтенсивної посухи середнє зниження врожайності становило 38–43 % залежно від культури, причому найбільш чутливою до дефіциту вологи виявилася кукурудза, тоді як жито озиме демонструвало відносно вищу стійкість до гідротермічного стресу. Встановлено, що використання біотехнологічних засобів дозволяє істотно пом'якшити негативний вплив посушливих умов: урожайність пшениці озимої зросла на 22,4 %, ячменю ярого – на 22,2 %, кукурудзи – на 21,0 %, жита озимого – на 18,6 % порівняно з контролем. Найвищу ефективність продемонструвало комплексне застосування препаратів, що поєднувало властивості біодобрих, біозахисту та біостимуляторів.

Механізм дії таких засобів пов'язаний із покращенням біологічної активності ґрунту, стимуляцією розвитку ризосферної мікрофлори, посиленням фотосинтетичної активності рослин і підвищенням їхньої здатності до накопичення осмотичних регуляторів. Це забезпечує підвищення водоутримуючої здатності рослин, оптимізацію азотного обміну та стійкість до оксидативного стресу.

Отримані результати мають практичне значення для формування адаптивних систем управління агрофітоценозами злакових культур, розроблення регіональних стратегій сталого агровиробництва та удосконалення політики екологічної безпеки в аграрному секторі. *Ключові слова:* кліматологічні зміни, біологічна адаптація, біотехнологічні засоби, екологічна безпека, харчові продукти, екологія, продовольча безпека, сталий розвиток.

Biotechnological approaches to improving the environmental safety of food production in the context of climate change (on the example of cereal crops). Romanchuk L., Holub V., Kravchuk-Obodzinska T.

The article presents the results of a comprehensive multi-year study (2021–2024) aimed at assessing the effectiveness of biotechnological approaches in improving the environmental safety of food production in the context of intensifying climate change. The study focused on Ukraine's main cereal crops—winter wheat, spring barley, corn, and winter rye—which are of strategic importance for ensuring the country's food security. The research was conducted in three agroclimatic zones of Ukraine—Polissya, Forest-Steppe, and Southern Steppe—taking into account regional differences in the hydrothermal regime and the level of crop adaptability to abiotic stresses.

The aim of the study was to determine the influence of climatic factors, primarily hydrothermal conditions, on the yield and ecological stability of cereal crops, as well as to evaluate the effectiveness of various groups of biotechnological products and their complex combination in adaptive farming systems.

The results show that under conditions of intense drought, the average yield reduction was 38–43% depending on the crop, with corn being the most sensitive to moisture deficiency, while winter rye showed relatively higher resistance to hydrothermal stress. It has been established that the use of biotechnological means can significantly mitigate the negative impact of arid conditions: the yield of winter wheat increased by 22.4%, spring barley by 22.2%, corn by 21.0%, and winter rye by 18.6% compared to the control. The highest efficiency was demonstrated by the complex application of preparations that combined the properties of biofertilizers, bioprotection, and biostimulants.

The mechanism of action of such agents is associated with improving the biological activity of the soil, stimulating the development of rhizosphere microflora, enhancing the photosynthetic activity of plants, and increasing their ability to accumulate osmotic regulators. This ensures an increase in the water-holding capacity of plants, optimization of nitrogen metabolism, and resistance to oxidative stress.

The results obtained are of practical importance for the formation of adaptive management systems for cereal crop agro-phytocenoses, the development of regional strategies for sustainable agricultural production, and the improvement of environmental safety policies in the agricultural sector. *Key words:* climate change, biological adaptation, biotechnological means, environmental safety, food products, ecology, food security, sustainable development.

Постановка проблеми. Сучасне агровиробництво перебуває під значним впливом кліматичних змін, які викликають підвищення частоти екстремальних погодних явищ, порушення водного балансу, деградації ґрунтів та зниження продуктивності основних сільськогосподарських культур [1, 2]. Особливо вразливою є група злакових культур – пшениця, ячмінь, кукурудза, рис та жито, які становлять основу продовольчої безпеки як в Україні, так і у світі. Згідно з дослідженнями світових вчених [3], навіть короточасні посухи або температурні стреси можуть зменшувати врожайність зернових на 10–20 %, що ставить під загрозу стабільність продовольчих систем.

У контексті таких викликів зростає потреба у переході від традиційних агротехнологій до біотехнологічно орієнтованих сільськогосподарських систем виробництва, які поєднують високий рівень продуктивності з екологічною безпекою та стійкістю до кліматичних стресів [4]. Біотехнологічні підходи відкривають можливості для селекції нових сортів злаків із підвищеною витривалістю до посухи, солоності, коливань температури та патогенів, а також для зниження антропогенного навантаження через оптимізацію використання добрив і засобів захисту рослин [5,6].

Разом із тим, у сучасній науковій літературі спостерігається недостатня інтеграція біотехнологічних рішень щодо екологічної безпеки агровиробництва. Більша кількість досліджень зосереджена або на підвищенні врожайності, або на адаптаційних механізмах рослин до стресів, без комплексного врахування екологічних ризиків, пов'язаних із впровадженням нових біотехнологічних систем [7,8].

Саме тому, актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування та розроблення біотехнологічних підходів до підвищення екологічної безпеки виробництва харчової продукції на основі злакових культур у контексті зміни клімату. Вирішення цієї проблеми дозволить забезпечити сталий розвиток агросфери, знизити екологічні ризики та підвищити продовольчу незалежність держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові дослідження підкреслюють, що біотехнології становлять ключовий інструмент для підвищення стійкості агросистем до кліматичних стресів – шляхом прискореної селекції, цілеспрямованої модифікації геному, маніпуляції мікробіомом та впровадження біостимуляторів у системи управління ґрунтом і живленням [9,10].

Наукові дослідження 2020–2024 рр. свідчать про значну роль біостимуляторів (органо-мінеральні добавки, морські екстракти, ферментовані продукти) у підвищенні стрес-толерантності злакових культур та зменшенні застосування синтетичних засобів захисту рослин. Емпіричні дослідження показують покращення показників водокористування та зниження ерозії ґрунтів при інтеграції таких засобів у системи обробітку [10,11].

Сучасні наукові праці демонструють широкий спектр перспективних біотехнологічних підходів для підвищення екологічної безпеки виробництва злакових культур в умовах кліматичних змін: від прискореної генетичної інновації до маніпуляції мікробіомом і впровадження біостимуляторів, а також застосування цифрових платформ для моніторингу та прийняття рішень. Одночасно ключовими перешкодами є: розрив між лабораторними результатами і польовою ефективністю, питання масштабування інокулянтів, регуляторна невизначеність та потреба в міждисциплінарних дослідженнях, які би поєднали різні агроекологічні підходи.

Мета досліджень. Метою нашого дослідження є комплексне наукове обґрунтування біотехнологічних підходів до підвищення екологічної безпеки виробництва харчової продукції із злакових культур з урахуванням впливу кліматичних чинників та адаптивних можливостей агроecosистем різних агрокліматичних зон України.

Методика досліджень. Дослідження проводились у 2021–2024 роках у трьох основних агрокліматичних зонах України – Поліссі, Лісостепу та Південному Степу, що відрізнялись рівнем зволоження, температурним режимом і типом ґрунтів. Об'єктами дослідження були представники основних злакових культур – пшениця м'яка озима, ячмінь ярий, кукурудза та жито озиме, які мають різний рівень адаптивності до абіотичних стресів.

Результати досліджень та їх обговорення. Упродовж 2021–2024 рр. нами було проведено комплексні польові дослідження, спрямовані на оцінку впливу кліматичних умов на формування врожайності основних злакових культур – пшениці озимої, ячменю ярого, кукурудзи та жита озимого – у трьох агрокліматичних зонах України: Поліссі, Лісостепу та Південному Степу.

Дослідження здійснювали за трьома гідротермічними сценаріями, що відображали типові умови зволоження клімату. Перший сценарій – оптимальне зволоження (контроль) – характеризувався середніми багаторічними показниками опадів і температурного режиму, що відповідають кліматичній нормі для кожної зони. Другий сценарій, а саме помірна посуха, передбачав дефіцит опадів на 25–30 % від багаторічного середнього значення при незначному підвищенні середньодобової температури. Третій сценарій, інтенсивна посуха, моделював екстремальні умови дефіциту вологи (понад 50 % від норми) у поєднанні з високими температурами повітря (понад +30 °C протягом десяти і більше діб).

Умови водного дефіциту створювали шляхом регульованого обмеження поливів у критичні фази органогенезу злакових культур, а саме кушіння, колосіння та наливу зерна, що дозволяло кількісно оцінити реакцію кожного виду на різні рівні дефіциту вологи та визначити закономірності зміни їхньої продуктивності залежно від гідротермічного режиму.

Таблиця 1

Продуктивність злакових культур за різних умов зволоження

Культура	Оптимальне зволоження, т/га	Помірна посуха, т/га	Інтенсивна посуха, т/га	Відносне зниження, %*
Пшениця озима	6,2	5,0	3,8	38,7
Ячмінь ярий	5,4	4,3	3,2	40,7
Кукурудза	8,9	7,2	5,1	42,7
Жито озиме	4,8	3,9	2,9	39,6

Таблиця 2

Ефективність біотехнологічних засобів у вирощуванні злакових культур

Культура	Контроль, т/га	Біодобрива, т/га	Біозахист, т/га	Біостимулятори, т/га	Комплексне застосування, т/га	Приріст до контролю, %
Пшениця озима	5,8	6,4	6,2	6,6	7,1	+22,4
Ячмінь ярий	4,9	5,5	5,3	5,6	6,0	+22,2
Кукурудза	8,1	8,9	8,6	9,1	9,8	+21,0
Жито озиме	4,3	4,7	4,5	4,8	5,1	+18,6

Результати наших досліджень свідчать про суттєвий вплив рівня зволоження на продуктивність основних злакових культур, що вирощувались у різних агрокліматичних зонах України. При оптимальному зволоженні, що відповідало середнім багаторічним показникам опадів, спостерігалось формування максимальних показників врожайності: для пшениці озимої – 6,2 т/га, ячменю ярого – 5,4 т/га, кукурудзи – 8,9 т/га, а жита озимого – 4,8 т/га. Дані показники відображають потенціал культур за умов достатнього водопостачання й оптимального теплового режиму.

При умові помірної посухи спостерігалось зниження урожайності на 15–20 % залежно від культури. Найменше відреагувало на посушливі умови жито озиме (зменшення врожайності на 18,8 %), що свідчить про його вищу стійкість до дефіциту вологи. Натомість у кукурудзи врожайність знизилася з 8,9 до 7,2 т/га, що становить втрату близько 19,1 %, це пов'язано з високими потребами цієї культури у волозі під час активного росту та наливу зерна.

За умов інтенсивної посухи спостерігалось істотне зменшення врожайності всіх злакових культур на 38–43 % відносно контрольного варіанта. Найчутливішою до водного дефіциту виявилася кукурудза, у якої врожайність зменшилася до 5,1 т/га, що на 42,7 % нижче за контроль. Подібна тенденція спостерігалася і для ячменю ярого – зниження врожайності на 40,7 %. Пшениця озима та жито озиме продемонстрували відносно вищу толерантність до посушливих умов, зменшення врожайності становило відповідно 38,7 % та 39,6 %.

Результати наших досліджень свідчать, що інтенсивність зниження продуктивності злакових культур

прямо залежить від рівня водного дефіциту, а стійкість культур до посухи визначається особливостями їхньої морфологічної адаптації. Зокрема, культури з глибшою кореневою системою (жито, пшениця) мають перевагу за екстремальних кліматичних умов. Результати дослідження узгоджуються з висновками міжнародних робіт, які вказують на прямий лінійний зв'язок між зростанням температури повітря, зменшенням вологості ґрунту та втратою врожайності зернових культур у регіонах із нестабільним зволоженням.

Результати наших досліджень підтверджують високу ефективність застосування біотехнологічних засобів у системі вирощування основних злакових культур, зокрема пшениці озимої, ячменю ярого, кукурудзи та жита озимого. Усі варіанти із використанням біотехнологічних препаратів продемонстрували суттєве зростання урожайності порівняно з контролем, що свідчить про їхній позитивний вплив на фізіологічні процеси рослин і загальний стан агроєкосистеми.

При використанні біологічних добрив спостерігався ріст врожайності в середньому на 10–12 %. Найвищий ефект спостерігався у кукурудзи, де врожайність підвищилася з 8,1 до 8,9 т/га. Це пояснюється активізацією азотного та фосфорного живлення під дією азотфіксувальних та фосфатомобілізувальних мікроорганізмів. У варіантах із біозахистом урожайність зросла на 7–9 %, що пов'язано зі зниженням фітопатогенного навантаження та покращенням фітосанітарного стану посівів.

Біостимулятори росту сприяли підвищенню врожайності на 13–15 % порівняно з контролем, забезпечуючи підвищення фотосинтетичної діяльності та поліпшення водного режиму рослин у критичні фази

вегетації. Особливо помітним цей ефект був у пшениці озимої (зростання з 5,8 до 6,6 т/га) та кукурудзи (з 8,1 до 9,1 т/га).

Найвищі показники зафіксовано у варіантах комплексного застосування біодобрив, біозахисту та біостимуляторів, про що свідчить приріст урожайності на 18–22 % порівняно з контролем. Зокрема, врожайність пшениці озимої сягнула 7,1 т/га, ячменю ярого – 6,0 т/га, кукурудзи – 9,8 т/га, а жита озимого – 5,1 т/га. Такий ефект пояснюється синергічною дією біологічних препаратів, які одночасно покращують живлення, стимулюють ростові процеси та підвищують імунологічну стійкість рослин.

Отримані результати досліджень доводять, що комплексне застосування біопрепаратів підвищує ефективність використання елементів живлення, посилює стійкість до абіотичних стресів і сприяє формуванню екологічно безпечної врожайності. Таким чином, використання біотехнологічних засобів може розглядатися як один із ключових напрямів підвищення екологічної безпеки та адаптивності злакових агроценозів в умовах кліматичних змін.

Висновки. У результаті проведених у 2021–2024 рр. польових досліджень встановлено, що кліматичні умови та біотехнологічні чинники істотно впливають на продуктивність і екологічну стабільність злакових культур у різних агрокліматичних зонах України. Виявлено чітку тенденцію до

зниження врожайності за умов дефіциту вологи – від 15–20 % за помірної посухи до понад 40 % за інтенсивної. Найбільш толерантними до водного стресу виявилися пшениця озима та жито озиме, що зумовлено їхніми морфологічними адаптаціями до коливань гідротермічного режиму.

Найвищий ефект забезпечувало комплексне використання препаратів різних груп, що має синергічний вплив на обмін речовин рослин, активізує кореневе живлення та підвищує імунітет культур до біотичних і абіотичних стресів.

Результати досліджень підтверджують, що біотехнологічні підходи є дієвим інструментом екологізації агровиробництва, оскільки дозволяють зменшити застосування мінеральних добрив і пестицидів, покращити структуру ґрунту, оптимізувати мікробіологічні процеси та знизити антропогенне навантаження на агроєкосистеми. Впровадження таких рішень сприяє зміцненню екологічної та продовольчої безпеки України, забезпечуючи стабільне виробництво високоякісної зернової продукції навіть в умовах кліматичних коливань.

У подальших дослідженнях доцільно зосередитись на оцінці довготривалого впливу біотехнологічних препаратів на агробіоценози, визначенні економічної ефективності їх застосування у різних системах землеробства та розробці інтегрованих моделей управління агроєкосистемами з урахуванням сценаріїв кліматичних змін.

Література

1. Wheeler T, von Braun J. Climate change impacts on global food security. *Science*. 2013. Aug 2.; P. 341. doi: 10.1126/science.1239402.
2. Романчук Л.Д., Кравчук Т.В., Можарівська І.А. Вплив агроєкологічних елементів технології вирощування на вміст мікроелементів в зеленій масі амаранту. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. Вип. № 5(44). 2022. С. 130-133.
3. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. *Rome, FAO*. 2022. P. 260. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>
4. Timmis K. N. The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Microbial Biotechnology*, 10(5), P. 984–987.
5. Lata C., Muthamilarasan M., Prasad, M. Biotechnological interventions for improving drought tolerance in cereals. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2018. 38(8). P. 920–936.
6. Романчук Л.Д., Кравчук Т.В. Жирнокислотний та біохімічний склад насіння амаранту залежно від сорту та системи удобрення. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія»*. 2024. Вип. 55 № 1. С. 138-143.
7. Drobitko A., Markova N., Tarabrina A., Tereshchenko A. Land degradation in Ukraine: retrospective analysis 2017-2022. *International Journal of Environmental Studies*. December 2022. 80(13). P. 1-8. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2160079>
8. Романчук Л.Д., Кравчук Т.В. Концентрація важких металів у ґрунті при вирощуванні амаранту в умовах Житомирського Полісся. *Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства Національної академії аграрних наук України. Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 58-60.
9. Zhao J., Liu D., Huang R. A Review of Climate-Smart Agriculture: Recent Advancements, Challenges, and Future Directions. *Sustainability* 2023. 15. 3404. <https://doi.org/10.3390/su15043404>
10. Романчук Л.Д., Кравчук-Ободзінська Т.В. Амарант і традиційні культури: біохімічна характеристика та перспективи використання. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. Випуск 4(108). С. 194-204.
11. Hussain, S. DREB Transcription Factors in Wheat: Improving Drought Resistance. *Journal of Plant Research*. 132(3). 231–245.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийняття до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025