

Науковий вісник Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.
Серія: Сільськогосподарські науки

Scientific Messenger of Lviv National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.
Series: Agricultural sciences

ISSN 2519–2698 print

ISSN 2707-5834 online

doi: 10.32718/nvlvet-a10335

<https://nvlvet.com.ua/index.php/agriculture>

UDC 631.95(477.83)

Ecologically oriented yield monitoring as a tool for climate change adaptation

B. Kalyn¹✉, S. Kropyvka¹, R. Paraniak¹, V. Momut¹, M. Zhuk²

¹Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine

²Private Enterprise Agrofirm “Khllybodan”, Torky, Ukraine

Article info

Received 27.08.2025

Received in revised form

29.09.2025

Accepted 30.09.2025

Stepan Gzhytskyi National
University of Veterinary
Medicine and Biotechnologies,
Pekarska Str., 50, Lviv,
79010, Ukraine.
Tel.: +38-096-289-52-40
E-mail: dana24b@ukr.net

Private Enterprise Agrofirm
“Khllybodan”, Shevchenko Str., 33,
Radekhyv District, Lviv Region,
Torky village, 80210, Ukraine.

Kalyn, B., Kropyvka, S., Paraniak, R., Momut, V., & Zhuk, M. (2025). Ecologically oriented yield monitoring as a tool for climate change adaptation. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences, 27(103), 290–297. doi: 10.32718/nvlvet-a10335

Despite the exceptional importance of the grain industry in both the global and national economies, a number of systemic problems still persist at the regional level in Ukraine, hindering productivity growth and reducing the profitability of the sector. Grain production forms the foundation of food security, constitutes a significant share of agricultural exports, supports rural employment, and promotes the development of related industries – livestock farming, food processing, and manufacturing. At the same time, the efficiency of its functioning remains vulnerable to a complex set of natural, economic, and organizational factors. The leading among them are climatic conditions, soil quality and fertility, the level of material and technical support, the use of modern innovative agricultural technologies, and the adaptation of farms to the challenges of climate change. The article summarizes the results of studies concerning the relationship between the yield of grain crops and the efficiency of using natural, labor, and production resources. The focus is placed on the influence of crop management systems, as well as ecological and socio-economic factors that determine the spatial differentiation of productivity. The role of climate change, soil degradation processes, farming intensity, and institutional prerequisites for sectoral development are highlighted. Using Lviv region as a case study, the main factors causing differences in grain yield are outlined, and limiting conditions influencing productivity are identified. Special attention is paid to climate forecasts that indicate an increase in the frequency of extreme weather events, changes in the length of the growing season, and rising risks to production stability. These trends require the adaptation of agrotechnologies, optimization of crop structure, and the implementation of resource-saving and soil-protective practices. The results of the conducted analysis make it possible to substantiate a set of recommendations aimed at improving the yield and efficiency of the regional grain industry. Their implementation will contribute to strengthening the competitiveness of agricultural production, enhancing the sustainability of agroecosystems, and ensuring the food security of the state amid ongoing climatic and economic transformations.

Keywords: climatic conditions, yield level, transformation of the agrarian sector, grain crops.

Екологічно орієнтований моніторинг врожайності як інструмент адаптації до кліматичних змін

Б. Калин¹✉, С. Кропивка¹, Р. Параняк¹, В. Момут¹, М. Жук²

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, Україна

²Приватне підприємство агрофірма “Хлібодар”, с. Торки, Радехівський р-н, Львівська обл., Україна

Незважаючи на виняткове значення зернового господарства у світовій та національній економіці, на рівні окремих регіонів України й досі спостерігається низка системних проблем, що гальмують підвищення продуктивності та знижують рентабельність галузі. Зерновиробництво виступає основою продовольчої безпеки, формує значну частку аграрного експорту, сприяє зайнятості сільського населення й забезпечує розвиток суміжних галузей – тваринництва, харчової та переробної промисловості.

Водночас ефективність його функціонування залишається вразливою до комплексу природних, економічних та організаційних чинників. Провідне місце серед них посідають кліматичні умови, якість і родючість ґрунтів, рівень матеріально-технічного забезпечення, застосування сучасних інноваційних технологій у землеробстві та адаптація господарств до викликів змін клімату. У статті здійснено узагальнення результатів досліджень, що стосуються взаємозв'язку між врожайністю зернових культур та ефективністю використання природних, трудових і виробничих ресурсів. Акцент зроблено на впливі системи управління технологіями вирощування, екологічних і соціально-економічних факторів, які визначають просторову диференціацію продуктивності. Висвітлено роль кліматичних змін, деградаційних процесів у ґрунтовому покриві, рівня господарського навантаження й інституційних передумов розвитку галузі. На прикладі Львівської області окреслено основні чинники, що зумовлюють відмінності у врожайності зернових культур, і визначено лімітуючі умови їх формування. Особливу увагу приділено кліматичним прогнозам, які свідчать про зростання частоти екстремальних погодних явищ, зміну тривалості вегетаційного періоду та підвищення ризиків нестабільності виробництва. Це вимагає глибокої адаптації агротехнологій, оптимізації структури посівних площ, переходу до ресурсозберігаючих і ґрунтозахисних практик. Результати проведеного аналізу дозволяють обґрунтувати комплекс рекомендацій, спрямованих на підвищення врожайності та ефективності зернового господарства регіону. Їх реалізація сприятиме зміцненню конкурентоспроможності аграрного виробництва, стійкості агроєкосистем і забезпеченню продовольчої безпеки держави в умовах сучасних кліматичних і економічних трансформацій.

Ключові слова: кліматичні умови, рівень урожайності, трансформація аграрного сектора, зернові культури.

Вступ

Зростання чисельності населення планети та зміни у харчуванні створюють значний тиск на світові продовольчі ресурси. Оцінка впливу попиту на продукти харчування та, зокрема зернові культури, до 2050 року є складним завданням. Детальний аналіз показує, що для задоволення очікуваного попиту буде потрібно збільшення виробництва зернових культур, які широко культивуються порівняно з іншими культурами у світі, на 50 %. Однак, якщо поточні темпи зростання врожайності зернових збережуться, можлива криза нестачі зерна. За прогнозами ООН, протягом наступних 30 років населення Землі зросте до 9,7 мільярдів. Крім того, у різних країнах люди стали споживати більше калорій (з 2250 ккал/день у 1860-х роках до 2880 ккал у 2015 році, а за прогнозами до 3900 ккал до 2050 року) (Pardey et al., 2014; Valin et al., 2014). Це призвело до зростання попиту не лише на зерно для харчування людей, але й на корми для тварин. Три основні зернові культури (рис, пшениця і кукурудза) задовольняють світовий попит на білок та калорії. Тому, за оцінками ФАО, для забезпечення продовольчої безпеки необхідно збільшити світове виробництво зернових більш ніж на 70 %.

Парадигма лімітуючих факторів передбачає, що ріст рослин обмежений лише одним ресурсом, доступність якого настільки низька, що він виключно гальмує більший ріст або темпи росту. Однак ця парадигма ігнорує велику гнучкість рослин до морфологічної та фізіологічної адаптації до змінних умов навколишнього середовища (Sinclair & Park, 1993). Оскільки гранична віддача для кожного ресурсу, ймовірно, змінюватиметься в міру розвитку культури та зміни навколишнього середовища, розподіл ресурсів (тобто розвиток рослин та фізіологія) передбачається динамічним та постійно коригуватиметься протягом життєвого циклу рослини. За багатьох умов низка ресурсів одночасно обмежуватиме ріст сільськогосподарських культур. Наші дослідження зосереджені на кількісній оцінці потенційної врожайності та розриву з

фактичною врожайністю, з приблизним поясненням факторів, що обмежують таку.

Мета дослідження

Метою роботи було вивчити загальну характеристику впливу окремих груп чинників на урожайність зернових культур та прогноз подальшої трансформації аграрного сектора у регіональному та світовому вимірах.

Матеріал і методи досліджень

Дослідження щодо потенційної врожайності в основному зосереджені на оцінці потенціалу, аналізі факторів, що обмежують врожайність, та ефективності використання ресурсів у регіональному вимірі, що надає важливу інформацію для подальшого зростання виробництва продуктів харчування та розробки аграрної політики. Матеріалами досліджень слугували іноземні та вітчизняні праці та аналітичні матеріали за даною тематикою; дані про урожайність зернових культур були отримані у Державній службі статистики України (<http://www.ukrstat.gov.ua/>) та Головного управління статистики у Львівській області.

Результати та їх обговорення

Для України, зокрема і для Львівщини провідною галуззю рослинництва залишається зернове господарство. У структурі посівної площі сільськогосподарських підприємств зернові становлять 35–40 % та 41–47 % відповідно. Найпоширенішими зерновими культурами є пшениця озима та яра, ячмінь озимий та ярий, кукурудза, гречка та овес. Структуру посівних площ під зернові культури в Україні представлено на рис. 1. У Львівській області структура посівних площ зернових дещо різниться: пшениця – 56,32 %, кукурудза – 25,42 %, ячмінь – 10,17 %, овес – 4,34 %, гречка – 2,53 % від загальної площі відведеної під зернові культури.

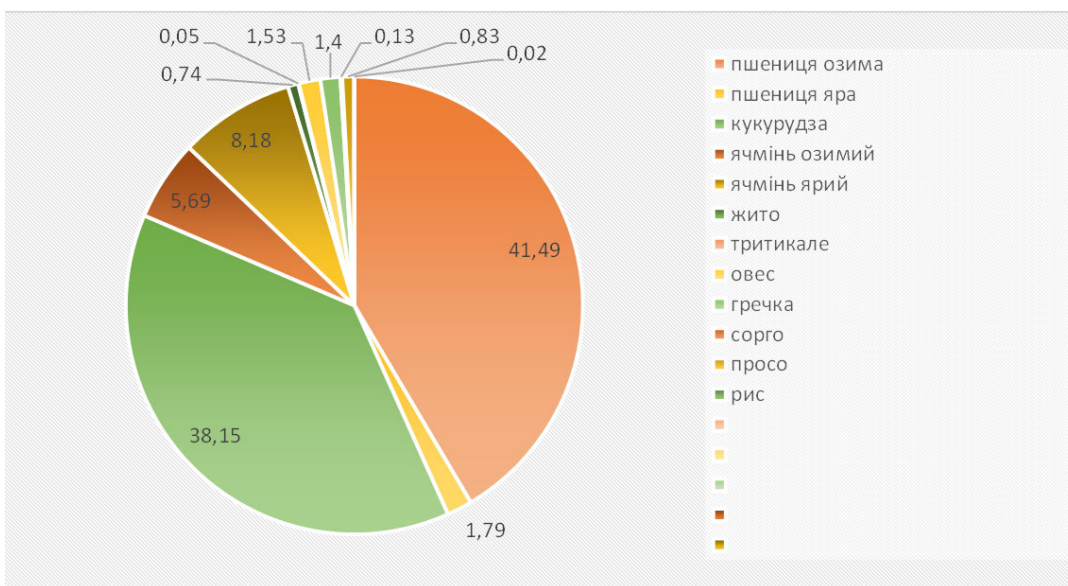


Рис. 1. Структура посівних площ зернових культур в Україні у 2023 р., % (за <http://www.ukrstat.gov.ua/>)

Економічна ефективність виробництва зерна залежить від рівня врожайності. У світі існує лише два основних шляхи збільшення кількості зернових культур: перший – збільшення площ оброблюваних земель, і другий – підвищення врожайності на вже оброблюваних землях. У першому випадку існує багато обмежень: від нестачі залучення нових площ земель до обробітку до неможливості використання земель як орних, що мають високу соціальну, економічну та екологічну цінність. Обмежена доступність наразі невикористаних, але придатних для використання у сільському господарстві, земель, зростаючі масштаби вивільнення CO₂ з органічної речовини ґрунту, що неминуче супроводжує перетворення лук або лісів на сільськогосподарські угіддя, сильне бажання зберегти досі недоторкані частини важливих екосистем та усвідомлення небезпек, пов'язаних з впливом сільського господарства на вразливі екосистеми, є важливими елементами розвитку цього консенсусу.

Для багатьох країн площа орних земель, яку можна збільшити, обмежена, а існуюча площа таких земель поступово зменшується через деградацію, втрати якісних сільськогосподарських ґрунтів для міської забудови та інших несільськогосподарських цілей, видобуток ресурсів (Fitzgerald et al., 2020). Фактично, площа сільськогосподарських земель у розвинених країнах зменшилася на 34 % з 1995 по 2007 рік, натомість площа оброблюваних земель у країнах, що розвиваються, збільшилася на 17,1 %, в основному за рахунок площ тропічних лісів.

Щодо України, то впродовж 2000–2021 років спостерігалась тенденція до зменшення площі сільськогосподарських земель та, зокрема, ріллі (рис. 2). Повномасштабне вторгнення російської федерації спричинило втрату та неможливості використання значної площі земель, зокрема площа постраждалих сільськогосподарських угідь у 2022 р. складала 10514,13 тис. га або 26 % (Nykoliuk et al., 2022).



Рис. 2. Динаміка площ сільськогосподарських земель України, тис. га

Отже, важко досягти суттєвого збільшення світового виробництва продовольства за рахунок збільшення площі оброблюваних земель. А відтак це стимулює пошук перспектив задоволення попиту на продовольство за рахунок збільшення врожайності сільськогосподарських культур на землях, що зараз використовуються.

Друга половина ХХ століття ознаменувалась зеленою революцією, що дозволила втричі збільшити урожаї сільськогосподарських угідь. Але і цей шлях має свої обмеження. Подальші важливі аспекти цієї дискусії полягають у тому, чи демонструє прогрес у врожайності ознаки стабілізації та чи є відносні темпи зростання, що спостерігаються у сільськогосподарських культурах та регіонах, де врожайність зростає, достатніми для досягнення складних темпів зростання 1,16–1,31 % на рік (діапазон оцінки потреби), необхідних для задоволення прогнозованого попиту на зернові для виробництва продуктів харчування, кормів та біопалива до 2050 року (Hall & Richards, 2013). Нинішні темпи зростання врожайності сільськогосподарських культур в основних країнах-виробниках продовольства сповільнилися або навіть зупинилися.

Впродовж 2015–2023 рр. розвиток зернового господарства у сільськогосподарських підприємствах Львівської області є відносно стабільним, що бачимо з показників виробництва основних зернових культур

– пшениці, ячменю та кукурудзи (рис. 3). Посівна площа цих культур зросла на 26% з 2005 року, проте таке зростання відбулось в основному за рахунок зменшення посівних площ вівса та інших зернових та зерновобобових культур, тому загальне збільшення посівних площ зернових культур становило 20%. Виробництво основних зернових культур за аналізований період зросло у 2,8 рази, найбільшим воно було для кукурудзи – 9,77 рази, тоді як для пшениці та

ячменю лише 2,18 та 1,97 відповідно. Підвищення врожайності найвищим було у кукурудзи – в 2,08 рази та пшениці – в 2 рази, дещо нижчим для ячменю – 1,96 рази. Отже, аналіз показників розвитку зерновиробництва вказує на те, що зростання валового збору зернових значним чином відбувається за рахунок підвищення врожайності, тобто інтенсифікації виробництва.

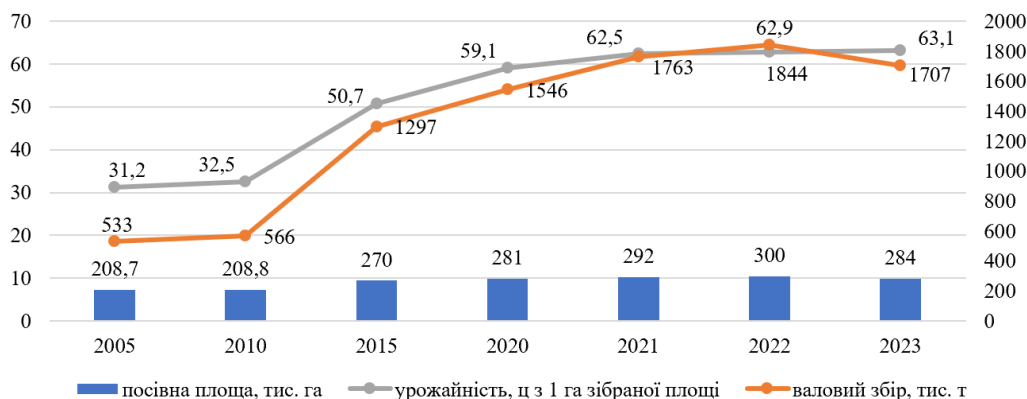


Рис. 3. Динаміка показників розвитку виробництва основних зернових культур (пшениця, ячмінь, кукурудза) у сільськогосподарських підприємствах Львівської області

Наразі світовий потенціал врожайності пшениці становить 7,7 т/га. Однак фактична врожайність становить лише 4,1 т/га. Ірландія до 2021 року мала найвищу врожайність пшениці, майже всі країни Західної Європи були високоврожайним регіоном для пшениці та могли виробляти більше 6 т/га. На сьогодні врожайність пшениці в Україні становить 4,94 т/га, а для Львівщини – 4,87 т/га.

За даними (Rong et al., 2021) існує значна відмінність між можливою та фактичною врожайністю зернових у багатьох країнах. На рис. 3 фактична і потенційна врожайність для пшениці у таких країнах як Данія та Німеччина є практично відповідні, що майже унеможливило збільшення кількості отриманої продукції. Найбільший розрив між фактичною та потенційною врожайністю пшениці існує у Ефіопії та Танзанії. Для чотирьох основних країн-виробників пшениці (Китаю, Франції, Індії та США), хоча зростання врожайності зменшилося, воно ще не досягло порогу досяжної врожайності. Зменшення темпів зростання врожайності за останній аналізований період характерне для усіх країн.

Врожайність зернових культур є наслідком двох основних компонентів: кількості на одиницю площі, що виробляються культурою, та середньої ваги цих зерен. Природно, збільшення будь-якого з двох компонентів повинно призвести до збільшення врожайності. Хоча гіпотетично обидва компоненти можна вважати однаково цінними для покращення врожайності, у літературі існує величезна кількість доказів, які показують, що врожайність зерна майже завжди позитивно та тісно пов'язана з першим компонентом – кількістю зерен на одиницю площі – та практично не пов'язана з другим, незалежно від того, чи є джерелом варіації генетичне чи екологічне (Abeledo et al., 2019).

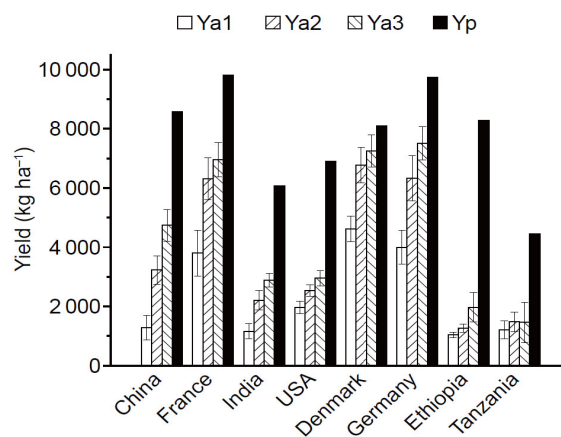


Рис. 4. Врожайність пшениці: фактична врожайність за 1961-1980, 1981-2000 та 2001-2018 роки (Ya1, Ya2 та Ya3 відповідно) і потенційна врожайність (Yp) (Rong et al., 2021)

Зазвичай розрив між потенційною та фактичною врожайністю безпосередньо використовується для кількісної оцінки факторів, що обмежують ріст врожайності. Клімат, вміст поживних речовин, запаси вологи, використання певних сортів сільськогосподарських культур, строки посіву та соціально-економічні умови є найбільш згадуваними в описі джерел літератури факторами, що обмежують врожайність. З точки зору використання ресурсів, ефективність використання азоту, води та сонячної радіації також все ще не є оптимальною (Rong et al., 2021).

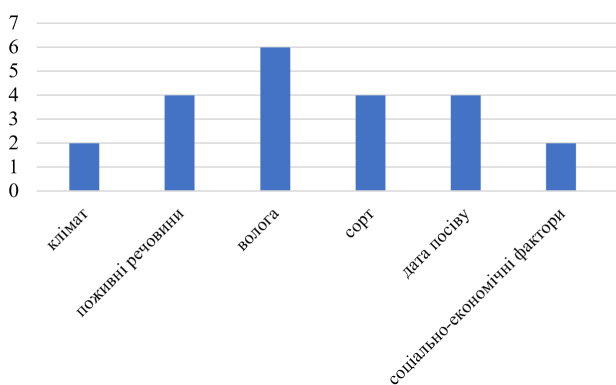


Рис. 5. Частота виділення факторів, як лімітуючих врожайність, в опублікованих наукових роботах

Зміна умов середовища та впливу лімітуючих факторів найбільшою мірою проявляється під час наливу зерна (рис. 5), впливаючи на кількість та якість врожаю. Оцінити різницю між фактичною та потенційною врожайністю можливо кількісно, наприклад визначивши різницю між врожайністю при різній кількості внесених добрив, та з допомогою методу аналізу граничних ліній. Останній дозволяє отримати сталий результат щодо впливу лімітуючого фактора.

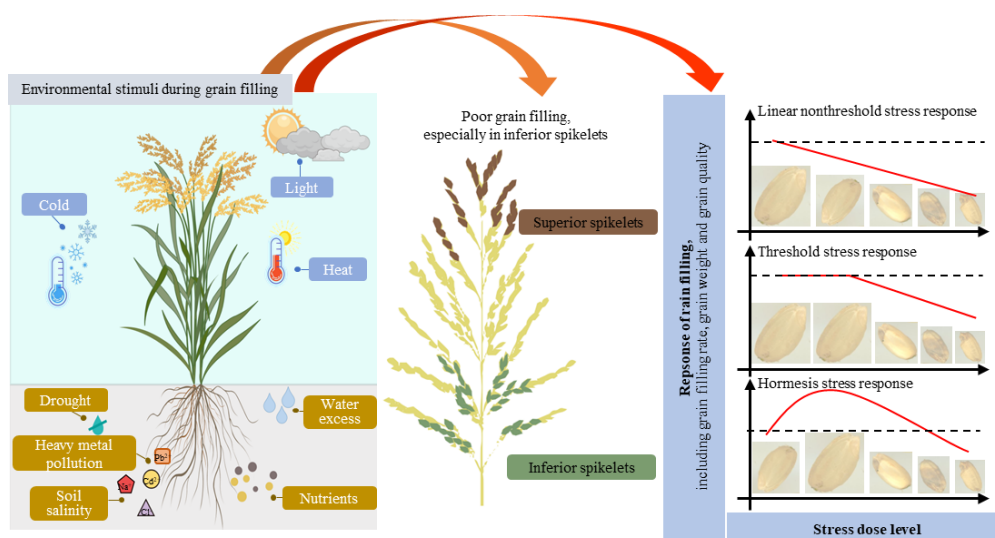


Рис. 6. Подразники навколишнього середовища та реакція зерна під час наливання зерна (Teng et al., 2023)

Окрім азоту, інші поживні речовини (такі як фосфор, калій тощо) також обмежуватимуть врожайність. Зокрема, нестача калійних добрив призвела до зменшення врожайності кукурудзи більше, ніж для виробництва рису та пшениці (Xu et al., 2016), дефіцит фосфору також може зменшити кількість зерна, його життєздатність та розмір, спричиняє погане куціння та затримку дозрівання зернових (Mardamootoo et al., 2021). Загальна кількість фосфору, необхідна культурі для виробництва тонни товарної продукції, варіюється залежно від польових культур, наприклад, 3,8, 4,8 кг для кукурудзи та пшениці відповідно.

Генетична варіація кожної з наших основних продовольчих культур була успішно рекомбінована селекціонерами рослин протягом останніх 100 років для забезпечення стабільного зростання врожайності. У

Більшість дослідників вказують, що серед багатьох використовуваних в сільськогосподарському виробництві ресурсів, вода та азот є найбільш важливими. Швидкість мінералізації азоту (N) з органічної речовини та процеси втрати поживних речовин тісно пов'язані з доступністю ґрунтової води. Встановлено, що врожайність зернових культур може бути безпосередньо пов'язана з внесенням азоту (Ladha et al., 2016). Щорічно під зернові культури вноситься приблизно 94 мільйони тонн азотних добрив, але культура використовується менше 40 %, тоді як решта розсіюється в навколишньому середовищі, що створює серйозні екологічні проблеми, такі як забруднення води та викиди парникових газів (Plett et al., 2018). У випадку азотних добрив, занадто багато або занадто мало азоту може негативно впливати на налив зерна. Занадто багато азоту призводить до несприятливої затримки старіння та поганого наливу зерна, що призводить до низької маси зерна та обмеження врожайності. І навпаки, помірне внесення азоту збалансує налив зерна між вищими та нижчими колосками, тим самим покращуючи масу зерна як вищих, так і нижчих колосків (Chen et al., 2022).

ранній зеленій революції (1961–1980) застосування нових сортів на 17 % збільшило врожайність сільськогосподарських культур особливо за умови зрошення в країнах, що розвиваються, а до періоду пізньої зеленої революції (1980–2000) ця частка зросла до 50 %. Senapati & Semenov (2020) вважали, що вирощування сортів стійких до тепла та посухи на стадії цвітіння, з кращою кореневою системою можуть збільшити вихід пшениці на 3,5–5,2 т/га. Для отримання більш високих врожаїв сільськогосподарських культур широко використовують гібриди та стійкі до гербіцидів сорти, які мають кращу пристосованість до навколишнього середовища.

Зміни рівня освітленості, вмісту атмосферного CO₂, температури та опадів є основними рушійними силами, що впливають на реакцію сільськогосподар-

ських культур на зміну клімату. Дослідження показали, що потепління клімату певною мірою знизить врожайність сільськогосподарських культур, і призведе до позитивної реакції на врожайність лише в окремих регіонах, наприклад, як Північно-Східний Китай (Kukul & Irmak, 2018), де температура не є першочерговим лімітуючим фактором. Територія ж України знаходиться у зоні швидкого зростання температури повітря, особливо це стосується її північної та північно-західної частин. Для нашої держави зростання теплозабезпеченості території має як негативні, так й позитивні наслідки для роботи аграрної галузі, та домінуюче впливає на її трансформацію. Зміни термічних умов вже спричинили зміну сільськогосподарської спеціалізації регіонів на користь збільшення частки теплолюбних та посухостійких культур, а також істотно вплинули на стан сільськогосподарських угідь, особливо у південних областях України (Balabukh, 2015). Адаптація сільськогосподарських практик до нових кліматичних умов є важливою у стратегії сталого землекористування в Україні та для вдосконалення методів прогнозування агрокліматичних ризиків.

Дослідженнями (Hlushko, 2023) встановлено найвищий коефіцієнт кореляції рівня урожайності і середньорічної температури для пшениці (0,674), сої (0,670) та кукурудзи (0,629). А найслабший кореляційний зв'язок серед зернових культур встановлено для вівса (0,340) та ріпаку (0,200), а для гречки не встановлено прямої кореляції між урожайністю та

середньорічною температурою (-0,026). Причиною цього є скорочення холодного періоду року, що сприяє збільшенню періоду вегетації, зростання середньодобових температур у зимовий період, а відповідно зменшення днів із приморозками. Протилежну залежність встановлено між врожайністю та кількістю днів з екстремально високими температурами. Найвища при цьому зворотня кореляція встановлена для гречки (-0,906) та жита озимого (-0,500), що в майбутньому може стати причиною зменшення врожайності.

Останні десятиліття характеризуються різкими коливаннями кількості опадів. Посуха та надмірні опади були першою та другою за величиною причинами втрати виробництва кукурудзи у Сполучених Штатах з 1989 по 2016 рік. Зміна кількості опадів на території України позначилась на площах областей із різними рівнями зволоження. Так, зона сильно посушлива розширилась крім Південного степу на північні, східні та центральні території України, натомість зона достатнього зволоження значно скоротилась у напрямку північного заходу (рис. 7). Відповідно межі агрокліматичних зон чітко демонструють зміщення на північ та північний захід. Найбільш суттєвих зміни торкнулися зон Полісся та Південного степу (Shevchenko & Balabukh, 2024). Щодо Львівської області, яка знаходиться в умовах достатнього зволоження, за рахунок природно-кліматичного впливу Карпат зміни меж агрокліматичних зон відбувається меншою мірою.

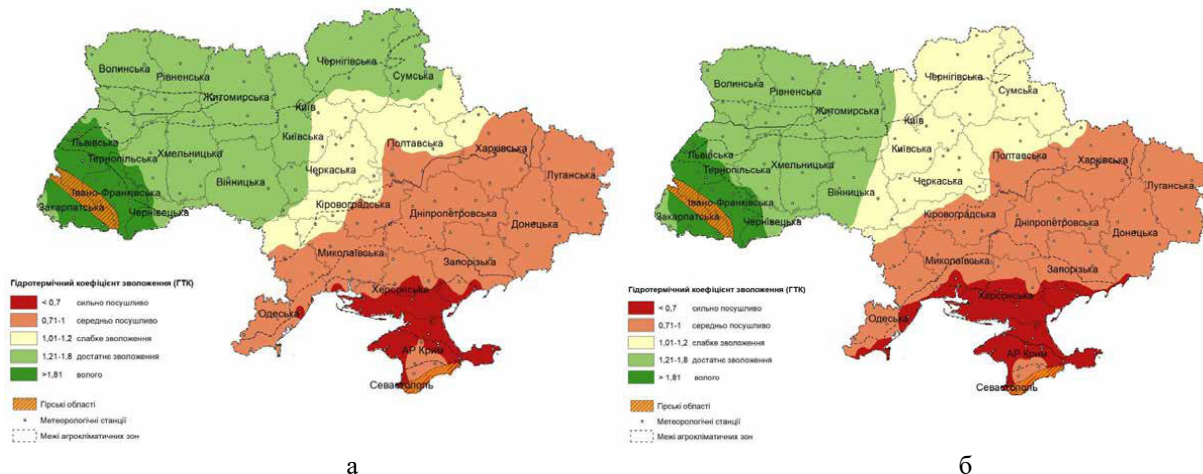


Рис. 7. Динаміка рівня зволоженості території України: а – 1961-1990 рр., б – 1991-2000 рр.

Кількість сонячної радіації та опадів відіграють важливу роль у рості та розвитку сільськогосподарських культур. Регулюючи дату посадки культури певною мірою можна краще використовувати ці ресурси. Багато досліджень показали, що помірні регіони, що стикаються з негативними наслідками глобального потепління, можуть збільшити виробництво за рахунок ранньої посадки.

Низький рівень освітлення значно знижує швидкість фотосинтезу, що призводить до пригнічення вуглецевого метаболізму в культурах (Yang et al., 2020) та зазвичай призводить до втрати близько 50 % врожаю. Крім того, нещодавні дослідження показали,

що світло бере участь у регуляції синтезу крохмалю в зернах (Li et al., 2022).

Соціально-економічні фактори включають агротехнічний обробіток, розмір господарства, трудові ресурси та досвід тощо. Сиротюк Г. (Syrotiuk, 2021) виділяє такі технологічні чинники, які впливають на підвищення врожайності зернових культур: впровадження науково обґрунтованих сівозмін, дотримання технологічних параметрів виробництва зерна, використання регуляторів росту, рослин та засобів захисту рослин, використання високоякісного насіння зерна та насіння районуваних сортів, раціональне використання органічних та мінеральних добрив. Зменшення розриву фактичної та потенційної врожайності за

допомогою кращих заходів управління може бути неможливим у всіх регіонах, оскільки це означає більш високі економічні та ресурсні інвестиції. Наприклад, незважаючи на те, що врожайність поліпшених сортів в Африці може бути втричі більша, ніж середній дохід, отриманий фермерами, вони часто не розглядають можливість використання цих поліпшених сортів через більш високі витрати на насіння та непереносимість посухи. Крім того, такі фактори, як розмір господарства, кількість та якість робочої сили, рівень освіти фермерів можуть вплинути на процеси прийняття рішень фермерів та кінцеве отримання врожаїв. Інші фактори, що обмежують врожайність, впливають менше, але це не означає, що вони є неважливими.

Висновки

Збільшення врожайності сільськогосподарських культур є основою на шляху до вирішення проблеми необхідного збільшення виробництва продуктів харчування протягом наступних десятиліть. Зернові культури є важливими для продовольчої безпеки, тому зменшення тенденцій підвищення їх врожайності викликає занепокоєння. Лише невелика частка необхідного збільшення виробництва продуктів харчування зрештою може бути досягнута за рахунок розширення площ, які зараз оброблюються. Для такої культури як пшениця для подальшого збільшення врожайності критично важливо продовжувати збільшувати кількість зерен на одиницю площі, ознаки, яка найкраще пов'язана з врожайністю.

Кліматичні зміни є потужним фактором, що вже зараз відчутно трансформує сільське господарство і змушує переглядати звичні підходи. Вони не лише впливають на те, де і що можна вирощувати, але й вимагають фундаментальних змін у способах ведення господарства, починаючи від вибору культур і закінчуючи застосуванням новітніх технологій. Для подальших досліджень слід використати дані дистанційного зондування для підвищення точності регіонального масштабу та впливу змін в управлінні сільськогосподарськими культурами на ефективність використання ресурсів. Адаптація стає ключовим фактором для забезпечення продовольчої безпеки в умовах мінливого клімату та способом зменшення негативного впливу факторів навколишнього середовища на виробництво зернових культур.

Відомості про конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів.

References

- Abeledo, L. G., Alvarez Prado, S., Puhl, L. E., Zhou, Y., Costa, J. M., & Miralles, D. J. (2019). Phenotypic and genetic analysis to identify secondary physiological traits for improving grain yield in wheat considering anthesis time variability. *Euphytica*, 215(10). DOI: 10.1007/s10681-019-2494-2.
- Balabukh, V. O. (2015). Potochna zmina klimatu, yii vplyv ta naslidky na natsionalnomu i rehionalnomu rivniakh. Karpatskyi instytut rozvytku. Ahentstvo spryannia stalomu rozvytku Karpatskoho rehionu «FORZA». URL: https://www.researchgate.net/publication/326319907_Potochna_zmina_klimatu_ii_vplyv_ta_naslidki_na_natsionalnomu_i_rehionalnomu_rivniakh (in Ukrainian).
- Chen, Y., Teng, Z., Yuan, Y., Yi, Z., Zheng, Q., Yu, H., Lv, J., Wang, Y., Duan, M., Zhang, J., & Ye, N. (2022). Excessive nitrogen in field-grown rice suppresses grain filling of inferior spikelets by reducing the accumulation of cytokinin and auxin. *Field Crops Research*, 283, 108542. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108542.
- Derzhavna sluzhba statystryky Ukrainy. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (in Ukrainian).
- Fitzgerald, T., Kuwayama, Y., Olmstead, S., & Thompson, A. (2020). Dynamic impacts of U.S. energy development on agricultural land use. *Energy Policy*, 137, 111163. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111163.
- Hall, A. J., & Richards, R. A. (2013). Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research*, 143, 18–33. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.05.014.
- Hlushko, D. (2023). Vplyv termichnykh umov na silske hospodarstvo Lvivskoi oblasti. Heohrafichna osvita i nauka: vyklyky i postup: materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, prysviachenoj 140-richchiu heohrafii u Lvivskomu universyteti (m. Lviv, 18–20 travnia 2023 r.) / vidpovid. redaktery: V. Bilaniuk, Ye. Ivanov. U 3-okh tomakh. Lviv: Prostir-M, 2, 34–37 (in Ukrainian).
- Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018). Climate-Driven Crop Yield and Yield Variability and Climate Change Impacts on the U.S. Great Plains Agricultural Production. *Scientific Reports*, 8(1). DOI: 10.1038/s41598-018-21848-2.
- Ladha, J. K., Tirol-Padre, A., Reddy, C. K., Cassman, K. G., Verma, S., Powlson, D. S., van Kessel, C., de B. Richter, D., Chakraborty, D., & Pathak, H. (2016). Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice and wheat production systems. *Scientific Reports*, 6(1), 19355. DOI: 10.1038/srep19355.
- Li, Q., Deng, F., Zeng, Y., Li, B., He, C., Zhu, Y., Zhou, X., Zhang, Z., Wang, L., Tao, Y., Zhang, Y., Zhou, W., Cheng, H., Chen, Y., Lei, X., & Ren, W. (2022). Low Light Stress Increases Chalkiness by Disturbing Starch Synthesis and Grain Filling of Rice. *International journal of molecular sciences*, 23(16), 9153. DOI: 10.3390/ijms23169153.
- Mardamootoo, T., du Preez, C. C., & Barnard, J. H. (2021). Phosphorus management issues for crop production: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 17(7), 939–952. DOI: 10.5897/ajar2020.15205.
- Mondal, S., Dutta, S., Crespo-Herrera, L., Huerta-Espino, J., Braun, H. J., & Singh, R. P. (2020). Fifty years of semi-dwarf spring wheat breeding at CIMMYT: Grain yield progress in optimum, drought and heat stress environments. *Field Crops Research*, 250, 107757. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107757.
- Nykoliuk, P., Pyvovar, R., Nazarkina, H., Stolnikovych, M., & Bohonos, O. (2022). Dynamika zemelnogo fondu: yak zminylisia zemelni resursy Ukrainy pislia 24 liutoho

- 2022 roku. Tsentr doslidzhen prodovolstva ta zemlekorystuvannia (KSE Ahrotsentr). URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/03/Agroviglyad_2_ukr.pdf (in Ukrainian).
- Pardey, P. G., Beddow, J. M., Hurley, T. M., Beatty, T. K. M., & Eidman, V. R. (2014). A Bounds Analysis of World Food Futures: Global Agriculture Through to 2050. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 58(4), 571–589. DOI: 10.1111/1467-8489.12072.
- Plett, D. C., Holtham, L. R., Okamoto, M., & Garnett, T. P. (2018). Nitrate uptake and its regulation in relation to improving nitrogen use efficiency in cereals. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 74, 97–104. DOI: 10.1016/j.semcd.2017.08.027.
- Rong, L.-B., Gong, K.-Y., Duan, F.-Y., Li, S.-K., Zhao, M., He, J., Zhou, W.-B., & Yu, Q. (2021). Yield gap and resource utilization efficiency of three major food crops in the world – A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(2), 349–362. DOI: 10.1016/s2095-3119(20)63555-9.
- Senapati, N., & Semenov, M. A. (2020). Large genetic yield potential and genetic yield gap estimated for wheat in Europe. *Global Food Security*, 24, 100340. DOI: 10.1016/j.gfs.2019.100340.
- Shevchenko, O. V., & Balabukh, V. O. (2024). Vplyv zminy klimatu na pryrodno-silskohospodarske raionuvannia terytorii Ukrainy. *Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyi zhurnal*. K.: Vydavnychiy dim «Helvetyka», 5(56), 222–231. DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.34 (in Ukrainian).
- Sinclair, T. R., & Park, W. I. (1993). Inadequacy of the Liebig Limiting-Factor Paradigm for Explaining Varying Crop Yields. *Agronomy Journal*, 85(3), 742–746. DOI: 10.2134/agronj1993.00021962008500030040x.
- Syrotiuk, H. (2021). Rozvytok ta efektyvnist zernovyrobnytstva: rehionalnyi aspekt. *Ahrarna ekonomika*, 14(1-2), 67–74 (in Ukrainian).
- Teng, Z., Chen, Y., Meng, S., Duan, M., Ye, N., & Zhang, J. (2023). Environmental Stimuli: A Major Challenge during Grain Filling in Cereals. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 2255. DOI: 10.3390/ijms24032255.
- Valin, H., Sands, R. D., van der Mensbrugge, D., Nelson, G. C., Ahammad, H., Blanc, E., Bodirsky, B., Fujimori, S., Hasegawa, T., Havlik, P., Heyhoe, E., Kyle, P., Mason-D'Croz, D., Paltsev, S., Rolinski, S., Tabeau, A., van Meijl, H., von Lampe, M., & Willenbockel, D. (2013). The future of food demand: understanding differences in global economic models. *Agricultural Economics*, 45(1), 51–67. DOI: 10.1111/agec.12089.
- Xu, X., He, P., Pampolino, M. F., Li, Y., Liu, S., Xie, J., Hou, Y., & Zhou, W. (2016). Narrowing yield gaps and increasing nutrient use efficiencies using the Nutrient Expert system for maize in Northeast China. *Field Crops Research*, 194, 75–82. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.05.005.
- Yang, H., Dong, B., Wang, Y., Qiao, Y., Shi, C., Jin, L., & Liu, M. (2020). Photosynthetic base of reduced grain yield by shading stress during the early reproductive stage of two wheat cultivars. *Scientific reports*, 10(1), 14353. DOI: 10.1038/s41598-020-71268-4.