

УДК 631.6.02:[(292:485+438.42(477))

DOI: <https://doi.org/10.31073/abg.70.15>

МОДЕЛЮВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВИРОЩУВАННЯ БОБОВИХ У ЗВ'ЯЗКУ З КЛІМАТИЧНИМИ ЗМІНАМИ: РЕГІОНАЛЬНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ПОЛІССЯ ТА ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

Ю. А. НИКИТЮК¹, О. І. КРАВЧЕНКО²¹Поліський національний університет (Житомир, Україна)²Інститут розведення і генетики тварин імені М.В. Зубця НААН (Чубинське, Україна)<https://orcid.org/0000-0001-9142-7699> – Ю. А. Никитюк<https://orcid.org/0009-0002-5468-4404> – О. І. Кравченко

kravchenko.irgt@gmail.com

У цьому дослідженні розроблено просторово деталізовані моделі придатності звичайної квасолі (*Phaseolus vulgaris* L.) для вирощування в регіонах Полісся та Лісостепу України з урахуванням прогнозованих кліматичних змін ХХІ століття. Актуальний ареал вирощування цієї культури був визначений за допомогою глобальних баз даних картографування сільськогосподарських угідь і зіставлений із кліматичними та ґрунтовими даними високої просторової роздільності (близько одного кілометра). Було використано 19 біокліматичних показників, що відображають річні кліматичні характеристики, сезонні коливання та екстремальні погодні явища, отриманих із загальнодоступних кліматичних моделей. Ґрунтові характеристики, зокрема насипна щільність, гранулометричний склад і вміст органічної речовини у шарі глибиною 5–15 см, були виділені на основі цифрових ґрунтових карт. Для зменшення мультиколінеарності застосовано двоетапну процедуру вибору предикторів, що поєднує аналіз головних компонент (для виявлення некорельованих екологічних градієнтів) з ієрархічним кластерним аналізом стандартизованих змінних, обравши по одному репрезентативному фактору на кожен кластер. За допомогою багатовимірної лінійної регресійної моделі трансформовану залежну змінну було зіставлено з відібраними кліматичними та ґрунтовими предикторами. Ефективність моделі перевіряли, використовуючи скоригований коефіцієнт детермінації та діагностичні графіки, які засвідчили відсутність суттєвих відхилень від гомоскедастичності та просторової автокореляції. Отримані емпіричні результати свідчать, що зниження температури у періоди, схильні до заморозків, а також менша кількість опадів протягом року негативно впливають на придатність територій для вирощування квасолі. Натомість сприятливими для цієї культури є тепліші та вологі умови в основний вегетаційний період, а також більші добові амплітуди температур. Серед ґрунтових чинників значний позитивний вплив на потенціал вирощування виявляють підвищена насипна щільність ґрунту та вищий вміст органічної речовини.

Ключові слова: моделювання придатності сільськогосподарських культур, взаємодія температури та опадів, просторова регресія, агроекологічне зонування, спільні соціально-економічні шляхи, адаптація до землекористування

MODELING LEGUME CULTIVATION POTENTIAL UNDER CLIMATE CHANGE: A REGIONAL APPROACH FOR POLISSYA AND THE FOREST-STEPPE OF UKRAINE

Yu. A. Nykytiuk¹, O. I. Kravchenko²¹Polissia National University (Zhytomyr, Ukraine)²Institute of Animal Breeding and Genetics n.d. a. M.V. Zubets of NAAS (Chubynske, Ukraine)

This study developed spatially detailed suitability models for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivation in the Polissya and Forest-Steppe regions of Ukraine, taking into account

projected climate changes of the 21st century. The current distribution of bean cultivation was determined using global agricultural land mapping databases and aligned with high-resolution climate and soil datasets (approximately one-kilometer spatial resolution). Nineteen bioclimatic variables reflecting annual trends, seasonal variability, and extreme weather conditions were derived from publicly available climate model ensembles. Soil characteristics, including bulk density, particle size distribution, and organic matter content at a depth of 5–15 cm, were extracted from digital soil maps. To reduce multicollinearity, a two-step predictor selection procedure was applied, combining Principal Component Analysis (PCA) to identify uncorrelated environmental gradients with hierarchical clustering of standardized variables, selecting one representative variable per cluster. Using a multivariate linear regression model, the transformed dependent variable was associated with the selected climatic and soil predictors. The model's performance was assessed using the adjusted coefficient of determination and diagnostic plots, which confirmed the absence of significant violations of homoscedasticity and spatial autocorrelation. The empirical results indicate that lower temperatures during frost-prone periods, as well as reduced annual precipitation, negatively affect the suitability of areas for bean cultivation. Conversely, warmer and wetter conditions during the main growing season, along with greater daily temperature ranges, are favorable for this crop. Among soil factors, higher bulk density and increased organic matter content were found to have a significant positive effect on the potential for bean production.

Keywords: **crop suitability modelling; temperature–precipitation interactions; spatial regression; agroecological zoning; shared socioeconomic pathways; land-use adaptation**

Вступ. Прогнозування просторових змін у врожайності сільськогосподарських культур у контексті глобального потепління набуває особливої значущості через зростання кліматичних загроз для аграрного сектору (Nykytiuk & Kravchenko, 2024). Коливання температурних режимів, зміни в кількості та сезонному розподілі опадів, підвищення частоти екстремальних погодних подій, деградація ґрунтів і скорочення водних ресурсів суттєво впливають на урожайність культур і стійкість агровиробництва загалом. У зв'язку з цим зростає потреба у створенні моделей, здатних оцінювати просторову варіативність кліматичних впливів і адаптивний потенціал регіональних агросистем (Rezaei et al., 2023). Важливим напрямом є поєднання кліматичних прогнозів із геопросторовим моделюванням, яке враховує не лише кліматичні та ґрунтові умови, а й топографічні особливості та антропогенний вплив. Такі прогностичні моделі допомагають ідентифікувати території з потенційним зростанням або зниженням врожайності, а також оцінити можливості для перенесення вирощування сільськогосподарських культур на нові, більш сприятливі площі. Спільні соціально-економічні траєкторії розвитку (SSP) відіграють ключову роль у проведенні подібних оцінок, оскільки враховують динаміку викидів парникових газів, демографічні процеси та трансформації у землекористуванні (Zimmermann et al., 2017). Особливу цінність мають моделі, які інтегрують регіональні особливості агроєкологічних умов, дозволяючи ідентифікувати як зони з високим потенціалом до адаптації, так і ті території, що потребуватимуть переорієнтації на інші культури або застосування адаптивних технологій (Minoli et al., 2022). У цьому контексті просторове моделювання врожайності виступає важливим інструментом стратегічного агропланування, що сприяє зниженню кліматичних ризиків, оптимізації структури посівних площ та забезпеченню продовольчої безпеки в умовах кліматичних змін. Загалом, дослідження просторових закономірностей зміни врожайності у зв'язку з глобальним потеплінням створює наукову основу для впровадження кліматично адаптованого землеробства та підвищення резистентності агроєкосистем до сучасних екологічних викликів (Hasegawa et al., 2022).

Вирощування квасолі значною мірою залежить від комплексу екологічних умов, серед яких визначальну роль відіграють кліматичні та ґрунтові чинники (Li et al., 2021). Через специфічні екологічні потреби ця культура чутливо реагує на температурний режим, рівень вологи, родючість ґрунтів та агрокліматичні характеристики певної місцевості. Однією з основних кліматичних перешкод є низькі температури в холодний період, які можуть пошкоджу-

вати рослини на ранніх фазах росту або під час перезимівлі. Зокрема, критичною є мінімальна температура найхолоднішого місяця, що обмежує поширення квасолі в північних регіонах (Svanes et al., 2022). Водночас екстремально високі температури у фазі цвітіння чи формування зерна можуть призводити до зниження врожайності внаслідок прискореного дозрівання або стерильності квіток. Опади також відіграють двояку роль: з одного боку, на ранніх етапах розвитку рослина потребує достатнього зволоження, а з іншого – надмірна волога і застій води створюють ризики для розвитку кореневих хвороб (Murube et al., 2021). Особливе значення мають обсяги опадів у найвологішій чверті року та загальна вологість упродовж вегетаційного періоду.

Ґрунтові умови також суттєво впливають на врожайність квасолі. Найсприятливішими для цієї культури є легкі та середньосуглинисті ґрунти з нейтральною або слабо кислою реакцією, високим вмістом гумусу та добрим дренажем. Висока кислотність, засолення або ущільнення ґрунтів негативно впливають на активність бульбочкових бактерій і процес симбіотичної фіксації азоту, що, у свою чергу, знижує врожайність і агроекологічну ефективність системи землеробства (Croissant et al., 1991). Отже, для успішного вирощування квасолі необхідне гармонійне поєднання температурних, вологісних і ґрунтових умов. Кожен із цих факторів може істотно вплинути на регіональний потенціал виробництва, що набуває особливої актуальності в умовах кліматичних змін (Losa et al., 2022).

Аналіз впливу кліматичних змін на вирощування бобових культур має стратегічне значення як в агроекономічному, так і в екологічному контексті. Квасоля займає важливе місце у побудові стійких агросистем завдяки здатності до фіксації атмосферного азоту, що сприяє підвищенню родючості ґрунтів і зменшує залежність від мінеральних азотних добрив (Bellows et al., 1996). Крім того, вона відзначається високою харчовою цінністю, слугуючи джерелом білка як для людини, так і для тварин. У світлі кліматичних трансформацій ці переваги надають квасолі значного потенціалу для адаптації аграрного виробництва до нових умов (Melnychuk et al., 2024). Проте, квасоля залишається однією з найуразливіших культур до дії кліматичних стресів. Температурні коливання, посухи, зміни у фазах вегетації, надмірна вологість та інші аномальні погодні явища можуть серйозно порушити її ріст, симбіотичні зв'язки та врожайність. Тому прогнозування майбутньої придатності земель для вирощування квасолі є важливим елементом агропланування, дозволяє ефективніше управляти ризиками та здійснювати селекційний добір сортів, адаптованих до нових кліматичних умов (Tkachuk et al., 2024).

Матеріали та методи досліджень. Усі історичні змінні, що використовувалися як вхідні дані для моделювання врожайності, були інтегровані в єдиний стек растрових шарів. До нього увійшли маска території вирощування бобів, 19 біокліматичних показників (bio1–bio19), а також дев'ять ґрунтових параметрів. Перед об'єднанням шарів було перевірено відповідність їхньої системи координат (CRS), просторової протяжності та роздільної здатності, що гарантувало коректність подальшого аналізу. Це дозволило забезпечити точне просторове вирівнювання всіх змінних на рівні пікселів та уникнути потенційних розбіжностей у гео-даних.

З метою усунення мультиколінеарності серед численних біокліматичних параметрів і зменшення розмірності кліматичних даних, було проведено аналіз головних компонент (PCA) на основі стандартизованих значень змінних bio1–bio19. До аналізу були включені лише ті пікселі, де всі значення змінних були скінченними, а також тільки ті змінні, що мали додатну дисперсію. Відповідно до критерію Кайзера для подальшого розгляду було обрано чотири головні компоненти з власними значеннями (λ), що перевищують одиницю. Для кожної компоненти була визначена змінна з найбільшим внеском, яку використали як репрезентативний кліматичний предиктор. Щоб усунути колінеарність між рештою біокліматичних змінних і цими ключовими показниками, було розраховано регресійні залишки кожної змінної по відношенню до первинно обраних. Отримані залишкові змінні зберегли унікальну, некорельовану інформацію та були інтегровані в модель як ортогоналізовані кліматичні пре-

диктори. Після проведення ортогоналізації кліматичних показників було сформовано підмножину пікселів, для яких наявні повні дані всіх необхідних параметрів. Для цих пікселів значення ґрунтових змінних були екстраговані з шару історичних ґрунтових даних.

Прогнозована просторово-часова динаміка розподілу площ під бобовими культурами в межах Полісся та Лісостепу України демонструє чітку залежність як від кліматичних сценаріїв (SSP), так і від часових періодів. У всіх моделях зберігається характерна закономірність розподілу — найвищі частки прогножуються в південно-східній і центральній частинах Лісостепу, тоді як найнижчі — на півночі Полісся. У сценарії SSP126, що передбачає найменші кліматичні зміни, загальна структура просторового розподілу залишається відносно стабільною протягом 2021–2080 років. Проте спостерігається поступове зниження максимальної прогнозованої частки посівів бобів: з 2,43 у 2021–2040 рр. до 1,99 у 2061–2080 рр., що свідчить про потенційне зниження агрокліматичної придатності навіть за відносно сприятливих умов. Сценарій SSP245 демонструє подібну тенденцію: пік частки прогнозується в першому часовому вікні (до 2,25 у 2021–2040 рр.), проте у подальшому спостерігається значне зменшення — до 1,55 у 2061–2080 рр. Це може бути пов'язано з посиленням водного дефіциту та порушенням температурних режимів, оптимальних для квасолі. У випадку середньоінтенсивного сценарію SSP370 найвищі показники площі під бобами спостерігаються в короткостроковій перспективі — до 2,51 у 2021–2040 роках. Однак до 2061–2080 рр. прогнозується спад до 2,06, особливо у північних районах. Просторова структура стає більш мозаїчною, з чітко локалізованими зонами зниження придатності. Найбільш екстремальний сценарій — SSP585 — також показує пікові значення в ранньому прогнозному періоді (до 2,37), після чого прогнозується зменшення до 1,85 у 2061–2080 роках. Картографічний аналіз вказує на поступове поширення малоприсаєднаних територій, особливо у північній та частково центральній частинах регіону. Усі сценарії демонструють спільну тенденцію: найсприятливіші умови для вирощування бобових спостерігаються в першому прогнозному періоді (2021–2040), із подальшим зниженням у більш віддаленому майбутньому. Це зменшення є найбільш вираженим у сценаріях зі значним кліматичним навантаженням (SSP370, SSP585). Аналіз просторово-часових змін свідчить про загрозу скорочення площ під квасолею внаслідок кліматичних трансформацій, при цьому північні регіони виявляються найбільш вразливими. Найсприятливішими для збереження посівів залишаються центральні частини Лісостепу, які й надалі зберігатимуть найвищу агрокліматичну придатність до вирощування бобових культур.

Результати досліджень. У межах Полісся та Лісостепу України в історичному періоді просторовий розподіл частки площ, зайнятих бобовими культурами серед загальної структури посівів, визначався сукупним впливом біокліматичних і ґрунтових чинників. Проведення лінійної регресії із трансформованою за методом Вох-Сох залежною змінною, після виключення мультиколінеарності серед предикторів, показало, що середня температура найхолоднішого місяця (bio11) мала найбільш виражений негативний вплив. Це свідчить про зменшення частки бобових культур за умов м'яких зим. Подібним чином, зниження частки бобів спостерігалось також у районах із підвищеною річною кількістю опадів (bio12) та інтенсивними опадами в найхолоднішу чверть року (bio19), що, ймовірно, пов'язано з негативним впливом надмірної вологості на розвиток бобових культур.

Діапазон середньодобових температур (bio2) та температура найвологішої чверті року (bio8) також виявили позитивний, хоча й менш інтенсивний, вплив на частку бобових культур у структурі посівів. Серед ґрунтових характеристик особливу роль відігравала щільність ґрунту (bdod), яка виявилася негативним предиктором, що вказує на перевагу бобових до більш пухких ґрунтів із кращими умовами для водо- і повітрообміну. Крім того, вміст загального азоту в ґрунті також виявив негативну кореляцію з часткою бобових культур. Це пояснюється їхньою здатністю до симбіотичної фіксації атмосферного азоту, що робить їх менш конкурентоспроможними на багатих на азот ґрунтах. Таким чином, результати аналізу демонструють, що у ретроспективному періоді поширення бобових культур залежало від поєднання температурного режиму, гідротермічних умов та фізико-хімічних властивостей

грунту, які формували або сприятливе середовище, або обмеження для ефективного вирощування цих культур.

Прогнозована просторово-часова динаміка розподілу площ, зайнятих бобовими культурами на території Полісся та Лісостепу України, демонструє чітку залежність як від кліматичних сценаріїв (SSP), так і від обраних часових періодів (рис. 1). У межах усіх сценаріїв простежується стабільна тенденція просторового розподілу: найвищі показники прогнозуються для південно-східної та центральної частин Лісостепу, тоді як найнижчі — для північних районів Полісся. У сценарії SSP126, який передбачає найменші кліматичні зміни, просторові моделі зберігають відносну сталість протягом усього періоду 2021–2080 років. Однак спостерігається поступове зменшення максимальної прогнозованої частки площ під бобовими: від 2,43% у 2021–2040 роках до 1,99% у 2061–2080 роках. Це свідчить про потенційне погіршення умов для вирощування бобів навіть за помірною кліматичною сценарієм. Сценарій SSP245 демонструє подібну динаміку: пік прогнозованої частки досягає 2,25% у 2021–2040 роках, але до кінця періоду (2061–2080) вона знижується до 1,55%. Така тенденція, ймовірно, пов'язана зі зростанням водного стресу та відхиленням температурного режиму від оптимального для цієї культури. У разі сценарію SSP370, що моделює середню інтенсивність кліматичних змін, найвищі показники серед усіх сценаріїв прогнозуються вже в найближчому майбутньому — до 2,51% у 2021–2040 роках. Проте в наступних періодах спостерігається поступове зниження до 2,06% у 2061–2080 роках, що найбільш помітно у північних частинах регіону.

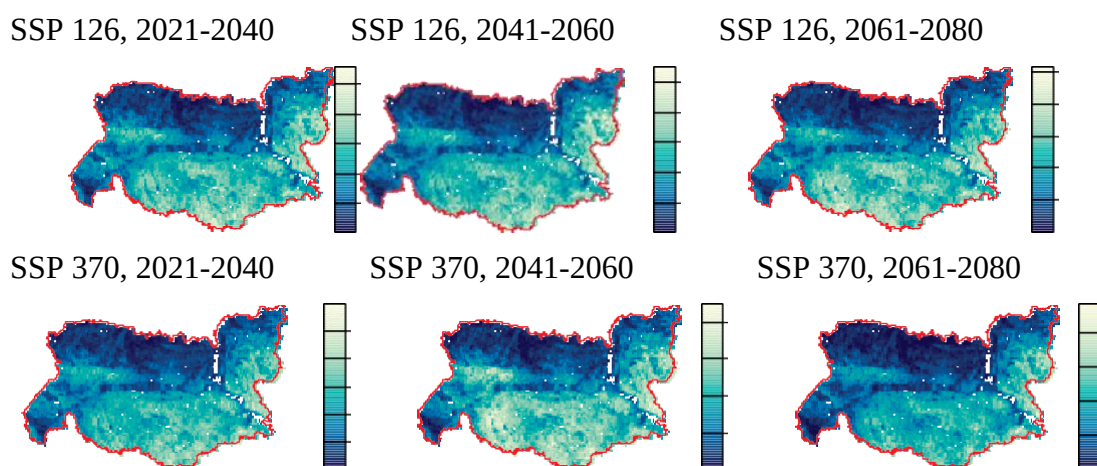


Рис. 1. Прогнозовані зміни площі бобових культур за різних сценаріїв майбутнього розвитку суспільства використано для моделювання зміни клімату у поєднанні з різними рівнями впливу парникових газів SSP у 2021–2080 роках: на картах показана просторова мінливість врожайності бобових культур (у гектарах на піксель) у межах досліджуваного регіону України за три часові періоди (2021–2040, 2041–2060 рр., 2061–2080).

Прогнозовані зміни у частці площ, зайнятих бобовими культурами, порівняно з історичним періодом, демонструють виразну просторову та часову неоднорідність, що залежить від кліматичних сценаріїв SSP і обраного прогнозного інтервалу (рис. 2). Аналіз дельта-зростання свідчить, що найбільш відчутне позитивне відхилення очікується лише в першому часовому вікні (2021–2040 роки), тоді як у наступні періоди спостерігається стійка тенденція до скорочення площ під бобами майже на всій території. Для сценарію SSP126 у ранньому періоді можливе максимальне зростання частки посівів до +1,31. Однак у 2061–2080 роках простежується переважання негативних змін, особливо у північних і північно-східних регіонах, де скорочення площ може сягати –2,43. Просторовий розподіл дельта-значень свідчить про відносну стабільність у центральних частинах країни, хоча в останньому прогнозованому періоді домінує загальна тенденція зниження показників порівняно з історичним рівнем. Для SSP370 прогнозована динаміка змін на площі під бобами також є негативною в довгостроко-

вій перспективі. Хоча у 2021–2040 роках частка може зрости на місцевому рівні до +1,21, у другому періоді прогнозується скорочення площі під бобами, що охоплює більшу частину півночі та заходу. До кінця століття (2061–2080 рр.) Скорочення площ під бобами охопить майже всю північну смугу, особливо на заході, з дельтою -1,09.

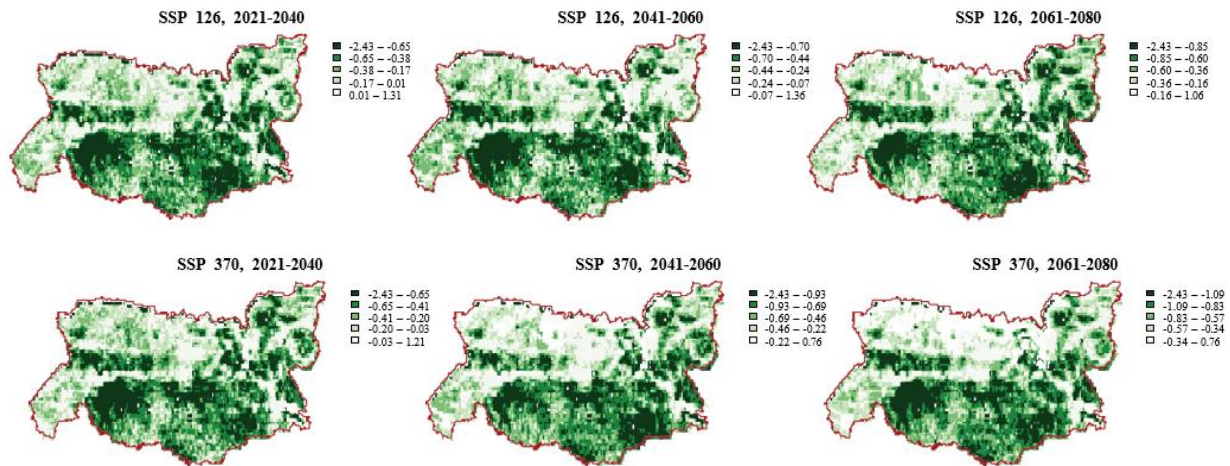


Рис. 2. На картах відображена просторова варіабельність врожайності бобових культур (у гектарах на піксель) у межах досліджуваного регіону України за три часові періоди (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080)

Дослідження просторового розподілу бобових культур у Поліссі та Лісостепу України в історичному періоді підкреслює вагому роль як кліматичних, так і ґрунтових факторів (Nykytiuk et al., 2025). Найбільшу просторову варіативність пояснюють температурні показники вегетаційного періоду, зокрема температура вологого кварталу та середня температура найтеплішої чверті року, а також річна кількість опадів (Nykytiuk et al., 2025). Високий рівень мінерального азоту та підвищена щільність ґрунту чинять стримувальний вплив на поширення бобових культур, що, ймовірно, зумовлено зниженою потребою рослин у симбіотичній азотфіксації та недостатньою аерацією. Отримані дані свідчать, що структура врожайності формується як результат адаптації до температурно-вологісних умов, у тісному зв'язку з ґрунтовими властивостями, що визначають доступність води та поживних речовин. Прогнозні оцінки просторових змін частки земель під бобовими культурами вказують на неоднорідність тенденцій залежно від кліматичних сценаріїв і часових періодів. Незважаючи на локальні зони зі збільшенням площ у деяких регіонах, загальний тренд характеризується поступовим скороченням частки посівів бобів, особливо в північних районах. Найбільш виражене зниження прогнозується в другій половині XXI століття, коли майже всі сценарії демонструють зменшення площ під бобовими у північному Поліссі та зростання фрагментації сприятливих зон у Лісостепу. Такі зміни свідчать про високу чутливість квасолі до кліматичних екстремумів, зокрема літніх посух і надмірного зволоження в міжсезоння.

Практичне значення проведеного дослідження полягає у створенні просторової бази для адаптивного планування посівів зернобобових культур в умовах змін клімату. Розроблені карти придатності для вирощування квасолі – як на основі ретроспективних даних, так і з урахуванням прогнозованих сценаріїв – дають змогу ідентифікувати території з постійно сприятливими, умовно стабільними або ризикованими агрокліматичними умовами. Це має ключове значення для формування диференційованих стратегій у сільському господарстві. Отримані просторові моделі можуть слугувати інструментом для агровиробників, агрономів і представників регіонального управління при ухваленні рішень щодо доцільності розширення або скорочення площ під квасолею в конкретних природно-кліматичних умовах. Зокрема, результати аналізу вказують на можливість тимчасового розширення посівів у північних і центральних регіонах за умов помірного потепління. Водночас у південних регіонах, які де-

монструють ризики втрати агроекологічної стабільності, виникає потреба у впровадженні адаптаційних заходів – зокрема, вирощуванні посухостійких сортів або перегляді сівозмін.

Крім того, це дослідження створює аналітичну основу для врахування кліматичних змін при формуванні державних програм підтримки культур, що забезпечують біологічну фіксацію азоту, тим самим сприяючи зміцненню адаптивності й стійкості агроecosистем.

Висновки. У даному дослідженні проаналізовано чинники, що впливають на придатність Поліського та Лісостепового регіонів України для вирощування квасолі в умовах сучасного клімату та з урахуванням прогнозованих змін за сценаріями Спільних соціально-економічних шляхів (SSP). Застосована модель дала змогу виявити основні екологічні обмеження та сприятливі умови, серед яких вирішальними виявилися низькі температури взимку та надмірна вологість. Водночас, підвищення температури та оптимальні характеристики ґрунтів позитивно впливали на потенціал вирощування квасолі. Просторово-часовий аналіз засвідчив поступове зміщення сприятливих для культури зон у північному напрямку внаслідок кліматичного потепління, що, натомість, призводить до зменшення площ у південних регіонах, особливо за сценарієм SSP5-8.5. Отримані результати вказують на необхідність адаптації агропланування до регіональних кліматичних змін, зокрема шляхом впровадження нових культур на півдні та активного використання нових перспективних територій на півночі. Запропонована методика може стати науковим підґрунтям для стратегічного розвитку аграрного сектору, реалізації адаптаційних стратегій та ефективного управління кліматичними ризиками.

REFERENCES

- Bellows, B. C., Hildebrand, P. E., & Hubbell, D. H. (1996). Sustainability of bean production systems on steep lands in Costa Rica. *Agricultural Systems*, 50(4), 391–410. [http://dx.doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00069-4](http://dx.doi.org/10.1016/0308-521X(94)00069-4)
- Croissant, R. L., Schwartz, H. F., & Ayers, P. D. (1991). Soil compaction and tillage effects on dry bean yields. *Journal of Production Agriculture*, 4(4), 461–464. <https://doi.org/10.2134/jpa1991.0461>
- Hasegawa, T., Wakatsuki, H., Ju, H., Vyas, S., Nelson, G. C., Farrell, A., Deryng, D., Meza, F., & Makowski, D. (2022). A global dataset for the projected impacts of climate change on four major crops. *Scientific Data*, 9(1), 58. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01150-7>
- Li, S., You, S., Song, Z., Zhang, L., & Liu, Y. (2021). Impacts of climate and environmental change on bean cultivation in China. *Atmosphere*, 12(12), 1591. <https://doi.org/10.3390/atmos12121591>
- Losa, A., Vorster, J., Cominelli, E., Sparvoli, F., Paolo, D., Sala, T., Ferrari, M., Carbonaro, M., Marconi, S., Camilli, E., Reboul, E., Waswa, B., Ekesa, B., Aragão, F., & Kunert, K. (2022). Drought and heat affect common bean minerals and human diet – What we know and where to go. *Food and Energy Security*, 11(1), e351. <https://hdl.handle.net/10568/127131>
- Melnychuk, T., Korepanova, K., Fedoniuk, T., & Zymarioieva, A. (2024). Geospatial applications as an integral component of wildlife monitoring in the Chernobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve. *Biosystems Diversity*, 32(1), 127–134. <https://doi.org/10.15421/012412>
- Minoli, S., Jägermeyr, J., Asseng, S., Urfels, A., & Müller, C. (2022). Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change. *Nature Communications*, 13(1), 7079. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34411-5>
- Murube, E., Beleggia, R., Pacetti, D., Nartea, A., Frascarelli, G., Lanzavecchia, G., Bellucci, E., Nanni, L., Gioia, T., Marciello, U., Esposito, S., Foresi, G., Logozzo, G., Frega, G. N., Bitocchi, E., & Papa, R. (2021). Characterization of nutritional quality traits of a common bean germplasm collection. *Foods*, 10(7), 1572. <https://doi.org/10.3390/foods10071572>
- Nykytiuk, Y., & Kravchenko, O. (2024). Regulatory mechanisms in agroecosystems: A retrospective and forecast of spatial and temporal dynamics of precipitation as a factor of crop yield. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 15(4), 688–695. <https://doi.org/10.15421/022499>

- Nykytiuk, Y., Kravchenko, O., Pitsil, A., Bambura, V., & Seredniak, D. (2025). Global climate change may reduce the anti-erosion regulatory capacity of vegetation cover in Ukraine's Polissya and Forest-Steppe regions. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 33(1), e25004. <https://doi.org/10.15421/0225004>
- Rezaei, E. E., Webber, H., Asseng, S., Boote, K., Durand, J. L., Ewert, F., Martre, P., & MacCarthy, D. S. (2023). Climate change impacts on crop yields. *Nature Reviews Earth and Environment*, 4(12), 831–846. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0>
- Svanes, E., Waalen, W., & Uhlen, A. K. (2022). Environmental impacts of field peas and faba beans grown in Norway and derived products, compared to other food protein sources. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 756–766. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.07.020>
- Tkachuk, R., Nykytiuk, Y., Komorna, O., Kravchenko, O., & Zymaroieva, A. (2024). Ecological groups of birds of Zhytomyr region (Ukraine) in relation to thermal regime and their future prospects in the context of global climate change. *Biosystems Diversity*, 32(3), 297–305. <https://doi.org/10.15421/012432>

Одержано редколегією 22.07.2025 р.

Прийнято до друку 21.08.2025 р.