

МАТЕМАТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГО-КЛІМАТИЧНОЇ СИТУАЦІЇ В УКРАЇНІ В КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ

ЛИХОВИД П.В. – доктор сільськогосподарських наук

orcid.org/0000-0002-0314-7644

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

ВОЖЕГОВА Р.А. – доктор сільськогосподарських наук, професор, академік

Національної академії аграрних наук України, заслужений діяч науки і техніки України

orcid.org/0000-0002-3895-5633

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

ГРАНОВСЬКА Л.М. – доктор економічних наук, професор, член-кореспондент

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0001-7021-3093

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

УШКАРЕНКО В.О. – доктор сільськогосподарських наук, професор, академік

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0002-7499-0938

Національна академія аграрних наук України

ЧАБАН В.О. – доктор сільськогосподарських наук

orcid.org/0009-0009-3292-2732

Херсонська державна морська академія

КУЗНЕЦОВ С.І. – кандидат технічних наук

orcid.org/0000-0003-1766-931X

Херсонський національний технічний університет

БІДНИНА І.О. – кандидат сільськогосподарських наук, учений секретар

orcid.org/0000-0001-8351-2519

Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України,

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

Постановка проблеми. Глобальне потепління є одним із найбільших викликів сьогодення. Катастрофічно швидкі темпи та інтенсивні зміни кліматичних умов, що відбуваються на планетарному рівні та рівні окремих екологічних зон, є чи не головною причиною загострення продовольчої кризи, яка стала особливо відчутною в останні роки, коли вона отримала додаткове загострення внаслідок воєнних конфліктів на території України, а також на Близькому Сході, особливо враховуючи прогнози, що до 2050 року населення планети потребуватиме вдвічі більшу кількість продовольства, ніж на сьогоднішній день [1, 2]. Оскільки сільське господарство є максимально вразливою галуззю економіки, від якої безпосередньо залежить рівень забезпечення продовольством, вивчення проблематики кліматичних змін та способів подолання їх негативних наслідків є важливим питанням не лише для географів, екологів та кліматологів, але і для науковців аграрного профілю. Якщо перші категорії науковців вивчають головним чином причини та наслідки кліматичних трансформацій в цілому, то останні в основному повинні сфокусуватися на таких питаннях як оцінка агроєкологічних умов у контексті глобального потепління, а також заходах щодо їх поліпшення та пом'якшення негативного впливу новосформованих агрометеорологічних умов на продуктивність аграрного сектору

економіки. Для фахівців рослинницького напрямку, чи не найбільш критичними є питання агроєкологічного районування сільськогосподарських земель і культурних видів рослин, обґрунтування агротехнічних та організаційно-економічних заходів подолання негативного кліматичного впливу на агрофітоценози, формування наукової картини щодо поточного стану та можливих сценаріїв подальшого розвитку агроєкологічної ситуації з метою попередження можливих негативних наслідків для галузі, зокрема, непередбачуваних втрат врожаїв та зниження якості продукції [3]. Для виконання останнього, важливим є ретроспективний аналіз багаторічних агрометеорологічних даних із залученням сучасного математичко-статистичного апарату та методів математичного прогнозування, які надають можливість оцінити тенденції та сформувані достовірні прогнози розвитку ситуації, прорахувати вплив змінних агрокліматичних умов на продуктивність агроєкосистем, що дозволить розробити ефективні та раціональні з точки зору використання наявних матеріально-технічних ресурсів методи та способи гнучкого оперативного реагування на зміни в агроєкологічних умовах для забезпечення стаłego виробництва рослинницької продукції і, відповідно, продовольчої безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення температурного режиму та режиму надходження опадів

на території України є одним із важливих етапів оцінки кліматичних процесів, які мають безпосередній вплив на продуктивність галузі рослинництва, стабільність надходження високоякісної продукції та забезпечення продовольчої безпеки держави.

Попередньо виконаний ретроспективний аналіз даних середньорічної температури повітря на території України за період 1753-2020 рр. засвідчив про тренд до поступового наростання температур, особливо стрімко цей процес розпочався з 2010-х рр. [4].

Щодо прогнозування еколого-кліматичної ситуації, варто відзначити факт неоднозначності прогнозів із декількох причин. По-перше, різні науковці використовують різні методичні підходи до оцінки кліматичних змін. Так, зокрема, інтенсивність наростання посушливості на території України оцінюють як за показником гідротермічного коефіцієнту (ГТК) Селянінова, так і за іншими індексами, наприклад, індексом аридності UNEP, а також даними супутникового моніторингу [4, 5, 6]. Так само рівень евапотранспірації оцінюють за різними методиками, зокрема, дуже часто виникає плутанина між потенційною (власне кліматичною) та референтною (власне агрономічною, оскільки вона покладена в основу розробки режимів зрошення сільськогосподарських культур) евапотранспірацією. Використання невідповідних методик спричиняє помилкові висновки, неточність оцінки та призводить до їх неоднозначності, а отже, формування певною мірою різноманітного уявлення про агрокліматичну ситуацію в Україні. Додаткової плутанини додають неточності в розрахункових оцінках, оскільки численними дослідженнями встановлено, що виконання розрахунків у різному програмному забезпеченні може давати інколи суттєву різницю в результатах оцінки евапотранспірації [7].

По-друге, існують різні підходи до оцінки циклічності кліматичних процесів, що істотно впливає на прогностичні моделі та їх точність, оскільки неправильне встановлення даного параметра може спричинити істотні спотворення у математичних розрахунках, у той самий час як оптимізація параметра сезонності дозволяє отримати максимальну точність прогнозування [8, 9]. Крім того, різні математичні алгоритми мають неоднакову ефективність у кліматичних прогнозах. Найчастіше, поряд із алгоритмами глибокого машинного навчання, дослідниками використовуються такі математичні методи прогнозування як ауторегресійні моделі (ARIMA та SARIMA), алгоритм Хольт-Вінтерса, різні регресійні моделі (як лінійні, так і нелінійні) та алгоритми рядів Фур'є, радіальної базисної функції, тощо [10]. Обрання раціональної методики є ключовим для побудови достовірного прогнозу.

По-третє, істотною мірою точність та достовірність прогнозування еколого-кліматичних змін залежить від достатнього вхідного набору даних для виконання математичних розрахунків і побудови моделей. Загальновідомим є факт, що використання невеликої вибірки даних часто результує у хибних висновках і помилкових моделях. Саме тому велику увагу варто приділяти формуванню якомога повного та масштабного набору вхідних даних.

До того ж варто наголосити, що прогностичні розрахунки можуть стосуватися короткострокових та довгострокових термінів, так само як бути приуроченими як до території держави в цілому, так і до окремих її природно-кліматичних або господарсько-економічних зон, як, наприклад, у роботі Пічури та ін. прогностичні розрахунки з високою достовірністю до 2030 року розроблено для Степу України, де продемонстровано циклічний тренд до наростання температури повітря в зоні до величини $12,9 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ за одночасного зменшення кількості опадів у зоні до $427 \pm 50 \text{ мм}$ [11].

Крім того, поряд із математико-статистичними, використовуються емпіричні моделі прогнозування змін клімату в Україні, які також відрізняються достатньою різноманітністю підходів та пропонуваними оцінками розвитку кліматичної ситуації [12]. Також існують прогностичні моделі для конкретних кліматично залежних екологічних явищ, як то наприклад, зміна інтенсивності та повторюваності злив на території України, динаміка розповсюдження шкочинних організмів відповідно до кліматичних змін, оцінка можливих змін у гідрологічних об'єктах на території держави, тощо [13, 14, 15]. Вищеперелічені прогностичні моделі є важливими для формування глибокого розуміння особливостей і закономірностей формування сучасного клімату на теренах України та його впливу на екологічні процеси, що мають відповідний вплив на продуктивність агроєкосистем.

Втім, на сьогодні не існує прогностичних розрахунків щодо встановлення трендів розвитку агрокліматичної ситуації в Україні для таких показників як сума річних опадів, середньорічна температура повітря, потенційна евапотранспірація та індекс аридності, так само як немає чітких прогностичних сценаріїв на довгостроковий період (до 2050 року) щодо можливого розвитку кліматичних подій, виконаного із використанням ауторегресійних моделей на основі ковзного середнього (ARIMA) з урахуванням наявності (або відсутності) сезонності та параметрів диференціації в погодних феноменах, а також математичного обґрунтування тенденцій у еколого-кліматичній динаміці метеоумов.

Мета – проаналізувати поточний стан та виконати прогнозне моделювання розвитку еколого-кліматичної ситуації в Україні до 2050 року з урахуванням ретроспективних даних за 1946-2021 рр., визначити можливі сценарії аридизації клімату та запропонувати дієві способи протидії негативному впливу кліматичних змін.

Матеріали та методика досліджень. Для реалізації поставленої мети було залучено найбільш повну метеорологічну базу даних по температурному режиму в Україні та режиму надходження опадів за період 1946-2020 рр. [16], доповнену нами даними за 2021 рік, узагальненими за даними спостережень <https://meteorpost.com/>. В цілому було проаналізовано 6646776 точок даних по опадах, а також 13293552 точок даних по температурному режиму на території України. Для розрахунку потенційної евапотранспірації використовували методику Хольдріджа (метод біотемператур) в стандартному варіанті [17], а розрахунок індексу аридності виконували за загальноприйнятою методикою в редакції UNEP [18].

Коефіцієнт варіації – статистичний параметр, що свідчить про ступінь дисперсії метеорологічного показника за досліджуваний період. Може виражатися як дробом (від 0 до 1), так і у відсотках. Розрахунок виконували за загально-визнаною методикою [19, 20]: коефіцієнт варіації <10% свідчить про слабку дисперсію та внутрішню мінливість показника, на рівні 10-25% – про середню, >25% – про сильну. Розрахунок виконували за формулою (1):

$$CV = SD / x \quad (1)$$

де: SD – середньоквадратичне відхилення; x – середнє арифметичне для досліджуваної вибірки даних.

Середньоквадратичне відхилення (похибка) є числовим вираженням невизначеності досліджуваного показника та використовується для характеристики розмаху його потенційних максимально можливих верхніх і нижніх лімітів [21], розраховували за формулою (2), запропонованою [22]:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x)^2} \quad (2)$$

де: N – кількість даних у вибірці; x_i – значення показника; x – середнє арифметичне для досліджуваної вибірки даних.

Оцінку достовірності динаміки зміни метеорологічних показників у часі та встановлення напрямку змін виконували розрахунки за методикою Манн-Кендала та Сена при довірчому інтервалі 95% або $p < 0,05$ [23], яку можна описати алгоритмом (3-10):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{var} = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_t f_t(f_t-1)(2f_t+5) \right] \quad (4)$$

$$z = \begin{cases} (S-1)/se & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/se & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Sen's slope} = \text{Median} \left\{ \frac{x_j - x_i}{j - i} : i < j \right\} \quad (6)$$

$$N = C(n, 2) \quad (7)$$

$$K = se \times z_{\text{crit}} \quad (8)$$

$$\text{Lower} = x_{(N-K)/2} \quad (9)$$

$$\text{Upper} = x_{(N+K)/2+1} \quad (10)$$

де: $x_1 \dots x_n$ – часова серія; t – набір пов'язаних ранжирів; f_t – частота ранжиру; se – квадратичний корінь змінюваної величини; N – кількість даних у часовому ряді (x_i, x_j) де $i < j$; se – стандартна похибка тесту.

Модель для побудови прогнозів на основі ауторегресії та ковзного середнього ARMA (p, q) може бути описана наступним чином [24] (11):

$$y_i = \phi_0 + \sum_{j=1}^p \phi_j y_{i-j} + \varepsilon_i + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{i-j} \quad (11)$$

Якщо середнє стохастичного процесу $\phi_0 = 0$, тоді (12 та 13):

$$\phi(L)y_i = \theta(L)\varepsilon_i \quad (12)$$

$$\phi(L)y_i = (1 - \phi_1 L^1 - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p)y_i = \left(1 - \sum_{j=1}^p \phi_j L^j\right)y_i \quad (13)$$

$$\theta(L)\varepsilon_i = (1 + \theta_1 L^1 + \theta_2 L^2 + \dots + \theta_q L^q)\varepsilon_i = \left(1 + \sum_{j=1}^q \theta_j L^j\right)\varepsilon_i$$

В моделі ARIMA (p, d, q) $z_i = y_i - y_{i-d}$. Важливо: параметри (p, d, q) визначатимуть тип моделі та суттєво впливатимуть на якість прогнозу та його точність. Водночас, ARIMA(p, d, q) процес y_i може бути описаний без константи (14):

$$\phi(L)(1-L)^d y_i = \theta(L)\varepsilon_i \quad (14)$$

Величину константи можна за необхідності ввести у модель наступним чином (15):

$$\phi(L)(1-L)^d y_i = c + \theta(L)\varepsilon_i \quad (15)$$

Для правильної оцінки параметрів моделі ARIMA було виконано тестування аутокореляції даних за методиками аутокореляційної функції (ACF) та тесту Дікі-Фулера (ADF) для оцінки наявності стаціонарності у даних [25, 26]. Розрахунки можна представити у вигляді формул (16-17):

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (X_t - X)(X_{t+k} - X)}{\sum_{t=1}^N (X_t - X)^2} \quad (16)$$

де: ρ_k – аутокореляція на лагах k ; N – загальна кількість спостережень; X_t – величина параметра у конкретний час t ; X – середнє значення параметра для усієї часової серії.

$$\Delta X_t = \alpha + \beta t + \gamma X_{t-1} + \sum_{i=1}^p \delta \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (17)$$

де: ΔX_t – перша різниця часової серії; α – константа (плаваючий аргумент); β – коефіцієнт часового тренду; γ – коефіцієнт тесту одиниці; p – кількість лагів; ε_t – похибка.

Корінь середньоквадратичної похибки (RMSE), як параметр оцінки точності прогностичних моделей, розраховували за методикою (18) [27]:

$$RMSE = \sqrt{(MSE)} \quad (18)$$

Середньоквадратичну похибку (MSE), яка вказує на величину відхилення прогностичних величин від реальних, розраховували за формулою (19):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (19)$$

де: n – кількість даних у вхідній вибірці; $Y_i - \hat{Y}_i$ – різниця між реальною і прогнозованою величиною модельованого параметра.

Математичні розрахунки виконано в статистичному пакеті Real Statistics Microsoft Excel 365 для довірчого інтервалу $P < 0,05$.

Результати досліджень. Аналіз надходження опадів на території України засвідчив про середній рівень варіювання цього метеорологічного показника в середньому за період досліджень ($CV = 0,13$ або $13,0\%$). Максимальний рівень дисперсії випадіння опадів спостерігався у жовтні місяці ($54,0\%$), а мінімальний – у червні ($29,0\%$). В цілому за період 1946-2021 рр. мінімальна річна сума опадів зафіксована на рівні $405,04$ мм у 1946 р., а максимальна ($724,05$ мм) – у 1980 р. В середньому за досліджуваний період даний показник складав $558,57$ мм. Результати оцінки тренду засвідчили про відсутність статистично достовірної динаміки у надходженні опадів на теренах України (табл. 1).

Таблиця 1

Оцінка тренду випадіння опадів на території України за період 1946-2021 рр.

Mann-Kendall Test	
alpha	0,05
MK-stat	406
s,e,	222,97
z-stat	1,82
p-value	0,07
trend	no
Sen's Slope	
alpha	0,05
slope	0,78
lower	-0,07
upper	1,57

Стосовно оцінки аутокореляції в масиві метеорологічних даних щодо кількісного надходження опадів, не було виявлено істотної аутокореляції ні за функцією ACF ($ACF = PACF = 0,50$), ні за ADF (встановлено наявність стаціонарності в масиві даних). Таким чином, відсутній статистично значущий сезонний компонент зміни в кількості надходження опадів в Україні за період 1946-2021 рр.

Щодо температурного режиму, оцінку якого було виконано за середньорічними показниками температури повітря, можна зробити висновок про середній рівень варіювання цього метеорологічного показника в середньому за період досліджень ($CV = 0,12$ або $12,0\%$). Максимальний рівень дисперсії температурного режиму спостерігався у березні місяці ($230,0\%$), а мінімальний – у липні та серпні ($7,0\%$). В цілому за період 1946-2021 рр. мінімальна середньорічна температура повітря зафіксована на рівні $6,0^{\circ}C$ у 1987 р., а максимальна ($10,69^{\circ}C$) – у 2020 р. В середньому за досліджуваний період даний показник складав $8,30^{\circ}C$. Результати оцінки тренду засвідчили про наявність статистично значущої динаміки у бік зростання середньорічної температури повітря ($upper > lower$) на теренах України (табл. 2).

Стосовно оцінки аутокореляції в масиві метеорологічних даних щодо середньорічної температури повітря, не було виявлено істотної аутокореляції за

функцією ACF ($ACF = PACF = 0,51$), але за ADF встановлено наявність слабкої аутокореляції в масиві даних за 10 лагами (10-річна сезонність змін). Таким чином, у температурній картині на території України присутній статистично значущий сезонний компонент; зміни в період 1946-2021 рр. відбувалися з 10-річною сезонністю, що варто враховувати при прогнозах розрахунках температури.

Таблиця 2

Оцінка тренду середньорічної температури повітря на території України за період 1946-2021 рр.

Mann-Kendall Test	
alpha	0,05
MK-stat	1295
s.e.	222,97
z-stat	5,80
p-value	$6,50 \times 10^{-9}$
trend	yes
Sen's Slope	
alpha	0,05
slope	0,03
lower	0,02
upper	0,04

Стосовно потенційної евапотранспірації, розрахованої за методикою Хольдріджа, встановлено низьку варіабельність даного агрометеорологічного показника ($CV = 0,08$ або $8,0\%$). Максимальний рівень варіювання зафіксовано в грудні (до $500,0\%$), при цьому мінімальна варіабельність характерна для липня і серпня ($7,0\%$). Максимальна середньорічна потенційна евапотранспірація встановлена у 2019 р. ($635,75$ мм), а мінімальна ($453,86$ мм) – у 2021 р. В середньому за досліджуваний період даний показник складав $532,22$ мм. Результати оцінки тренду засвідчили про наявність статистично достовірної динаміки до наростання агрометеорологічного показника ($upper > lower$) в досліджуваний період (табл. 3).

Таблиця 3

Оцінка тренду середньорічної потенційної евапотранспірації на території України за період 1946-2021 рр.

Mann-Kendall Test	
alpha	0,05
MK-stat	982
s.e.	222,97
z-stat	4,40
p-value	$1,08 \times 10^{-5}$
trend	yes
Sen's Slope	
alpha	0,05
slope	1,01
lower	0,60
upper	1,42

Розрахунок аутокореляції не виявив її всередині масиву даних щодо потенційної евапотранспірації (ACF = PACF = 0,44). Проте, встановлено наявність 10-річної (подібної до такої для середньорічної температури повітря) сезонності змін потенційної евапотранспірації за ADF тестом.

Інтегровану оцінку посушливості здійснено за результатами розрахунку індексу аридності території. Варіювання даного показника за роками досліджень склало 15,8%, при цьому середнє значення за багаторічний період відповідає умовам достатнього зволоження (1,06). Цікавим є факт повної відсутності аутокореляції індексу аридності (ACF=0.39), встановлено стаціонарність даного агрометеорологічного індексу. Таким чином, під час прогнозування подальшого розвитку посушливості на території України варто враховувати відсутність сезонного компонента та внутрішньої диференціації масиву даних. Результати оцінки тренду наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Оцінка тренду індексу аридності на території України за період 1946-2021 рр.

Mann-Kendall Test	
alpha	0,05
MK-stat	-128
s.e.	222,97
z-stat	-0,57
p-value	0,57
trend	no
Sen's Slope	
alpha	0,05
slope	0,00
lower	0,00
upper	0,00

Для прогнозування сценарію розвитку еколого-кліматичних змін на території України було застосовано модель ARIMA (1, 1, 1), яка якнайліпше відповідає особливостям динаміки індексу аридності, встановлених попередніми математико-статистичними тестами. Статистика розробленої моделі наведена в табл. 5, а параметри моделі – в табл. 6.

Таблиця 5

Статистика моделі ARIMA для прогнозування посушливості на території України до 2050 року

SSE	2,027
p	1
q	1
d	1
res mean	-0,010
res SD	0,167
RMSE	0,166
data mean	0,00
data SD	0,218
size	74

Таблиця 6

Параметри моделі ARIMA для прогнозування посушливості на території України до 2050 року

параметри	коефіцієнти	SD	t-stat	P
константа	-0,00108	0,00248	-0,43594	0,66420
ϕ_1	-0,10534	0,12260	-0,85924	0,39310
τ_1	-0,88418	0,05838	-15,14610	$6,2 \times 10^{-24}$

За результатами прогнозування, не дивлячись на попередньо встановлену відсутність статистично достовірного тренду до зниження величини індексу аридності (та відповідного наростання посушливості), відмічено, що до 2050 року загальнодержавний індекс аридності в середньому буде на 0,09 одиниць нижчим (максимальна різниця складає 0,13), і тренд до наростання посушливості клімату (lower > upper) набуде статистично достовірного прояву за $P=0,001$ (або 99,9% вірогідності) (табл. 7).

Таблиця 7

Оцінка тренду індексу аридності на території України за період 1946-2050 рр. (з урахуванням прогнозованих величин індексу)

Mann-Kendall Test	
alpha	0,05
MK-stat	-1203
s.e.	366,30
z-stat	-3,28
p-value	0,001
trend	yes
Sen's Slope	
alpha	0,05
slope	-0,00098
lower	-0,00159
upper	-0,00060

Враховуючи вищевказане, з упевненістю можна констатувати наступне: клімат України зазнає істотних трансформацій, пов'язаних із глобальним потеплінням; відбувається поступова аридизація клімату, оскільки зберезувана кількість опадів неспроможна перекрити зростаючу паралельно підвищенню температури повітря потенційну евапотранспірацію, і таким чином формуються умови посиленого дефіциту природного водного балансу. Ці процеси загрожують природним екосистемам України, оскільки наростання посушливості метеорологічних умов неминуче приведе до погіршення умов існування вологолюбних форм життя (включно флори і фауни). Крім того, під загрозою знаходяться водні об'єкти, які через зростання антропогенного навантаження, пов'язаного із необхідністю задовольнити потреби населення у питній воді та агропромисловий сектор – зрошувальною водою, будуть неспроможні підтримувати природний для них екологічний баланс. Таким чином, закономірно можна прогнозувати істотне погіршення екологічних умов, водночас із наростанням загрози продовольчій безпеці держави, адже виробництво сільськогосподарської продукції, зокрема, рослинницької, знаходиться у тісній залежності від умов

клімату. Вже зараз Степова зона України належить до зони ризикованого богарного землеробства, одержання сталих врожаїв належної якості більшості стратегічних сільськогосподарських культур у південних і центральних регіонах держави є обмежено можливим через нестачу природного зволоження та невідповідність реальних можливостей зрошення необхідному мінімуму. Додатковою загрозою подальшого погіршення ситуації з продовольчою безпекою в державі є тривалі бойові дії, які знищують екосистеми, порушують екологічну рівновагу, підсилюють інтенсивність прояву кліматичних змін, створюють сильний фон забруднення повітря, ґрунтів і водних ресурсів, знижують їх доступність, знищують агропідприємства та унеможливають забезпечення продовольчої безпеки та сталого розвитку агропромислового комплексу України.

Враховуючи високий статистично доведений рівень вірогідності негативного сценарію кліматичних трансформацій в Україні, стратегія повоєнного відновлення держави повинна обов'язково включати такі компоненти як екологічний моніторинг земельних і водних ресурсів, їх аудит, якомога повна прискорена меліорація та рекультивация земель, очищення водойм від забрудників, а також відновлення існуючих і розбудова нових сучасних зрошувальних систем, оскільки саме раціональне науково обґрунтоване зрошення стане запорукою сталого розвитку аграрного виробництва в Україні, враховуючи наростаючі темпи опустелювання клімату та деградації земель. Екологічно відповідальне (насамперед йдеться про збереження родючості та позитивних еколого-меліоративних властивостей ґрунтів) кліматично орієнтоване (насамперед йдеться про мінімізацію негативного впливу галузі на емісію парникових газів і посилення процесів їх накопичення в приземному шарі атмосфери за рахунок ірраціонального удобрення, обробітку ґрунту, використання меліорантів і пестицидів) та ресурсозберігаюче (насамперед, йдеться про водні ресурси) зрошуване землеробство має стати основою повоєнного розвитку галузі рослинництва в Україні.

Висновки. Встановлено статистично достовірний ризик істотного наростання посушливості клімату на території України до 2050 року. Не дивлячись на порівняно стабільну ситуацію з надходженням опадів, стрімке наростання температури повітря та пов'язане з цим супутнє зростання потенційної евапотранспірації зумовлюють високі ризики для опустелювання та деградації природних і сільськогосподарських антропогенних екосистем, зниження продуктивності ріллі та загрозу продовольчій безпеці. Забезпечення еколого-кліматичного моніторингу, аудиту природних ресурсів і раціонального відновлення зрошення як фактору нівелювання дефіциту природної вологи є ключовими передумовами сталого розвитку екологічно безпечного сільського господарства в Україні, а також забезпечення кліматичної нейтральності агропромислового комплексу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Halmaghi E. E., Cîrdei A., Metea I. G. Food security and armed conflicts. *Land Forces Academy Review*. 2023. Vol. 28(4). P. 329–337. DOI: 10.2478/raft-2023-0039
- Janni M., Maestri E., Gulli M., Marmiroli M., Marmiroli N. Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: a critical review. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 14. P. 1297569. DOI: 10.3389/fpls.2023.1297569
- Baraka J. Effect of global warming on agricultural productivity. *International Journal of Agriculture*. 2023. Vol. 8(1). P. 21–30. DOI: 10.47604/ija.1971
- Lykhovyd P. Theoretical bases of crop production on the reclaimed lands in the conditions of climate change. Warsaw : RS Global, 2022. 259 pp. DOI: DOI:10.31435/rsglobal/050
- Заєць С. О., Вольвач О. В., Юзюк С. М. Агрокліматична оцінка впливу змін клімату на теплові ресурси території Північно-Західного Причорномор'я. *Climate-Smart Agriculture: Science and Practice. Scientific Monograph*. ISMA ANNO 1994, 2023. С. 132–151. DOI: 10.30525/978-9934-26-389-7-7
- Осадчий В. І. Кліматична програма України як основа цілісної екологічної політики держави в умовах зміни клімату. *Вісник НАН України*. 2021. Вип. 6. С. 81–84. DOI: 10.15407/vishn2021.06.081
- Lykhovyd P. V., Averchev O. V., Bidnyna I. O., Avercheva N. O., Nikitenko M. Evaluation of different methods for reference evapotranspiration assessment: A case study for Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2024. Vol. 15(3). P. 441–445. DOI: 10.15421/022462
- Бурикiна С. І., Цуркан О. І. Тенденції сучасної зміни агрокліматичної ситуації на території степової чорноземної зони Півдня України. *Таврійський науковий вісник*. 2020. Вип. 111. С. 29–43. DOI: 10.32851/2226-0099.2020.111.4
- Szostek K., Mazur D., Dralus G., Kuszniar J. Analysis of the Effectiveness of ARIMA, SARIMA, and SVR models in time series forecasting: A case study of wind farm energy production. *Energies*. 2024. Vol. 17(19). P. 4803. DOI: 10.3390/en17194803
- Khan M. S., Islam M., Adhikary S., Hossain M. M., Afroja S. Analysis and predictions of seasonal affected weather variables of Bangladesh: SARIMA models vs. Traditional models. *International Journal of Business and Management*. 2018. Vol. 13(11). P. 70–80. DOI: 10.5539/ijbm.v13n12p70
- Пічура В. І., Потравка Л. О., Рутта, О. В. Просторово-часовий аналіз і прогноз кліматичних змін в зоні Степу України. *Екологічні науки*. 2022. Вип. 6(45). С. 110–118. DOI: 10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.18
- Кульбіда М. І., Барабаш М. Б., Єлістратова Л. О. Прогноз змін клімату України на початку XXI століття. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія: Географія*. 2011. Вип. 23. С. 10–17. DOI: 10.1080/10095020.2022.2100287
- Гребенюк Н. П. Характеристика повторюваності сильних злив на території України в умовах сучасних змін клімату. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2014. Вип. 1. С. 96–101.
- Дудник А. В. Багаторічна динаміка популяцій і прогноз масового розмноження найпоширеніших шкідників пшениці озимої в Степу України. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6. С. 37–41.
- Лобода Н. С., Сербова З. Ф., Божок Ю. В. Оцінка впливу змін клімату на водні ресурси України на

- основі моделі» клімат-стік» за сценарієм глобального потепління А2. *Гідрологія, гідрохімія і гідрогеологія*. 2015. Вип. 1(36). С. 8–17.
16. Osadchyi V., Skrynyk O., Palamarchuk L., Skrynyk O., Osypov V., Oshurok D., Sidenko V. Dataset of gridded time series of monthly air temperature (min, max, mean) and atmospheric precipitation for Ukraine covering the period of 1946–2020. *Data in Brief*. 2022. Vol. 44, 108553. DOI: 10.1016/j.dib.2022.108553
 17. Вожегова Р. А., Лиховид П. В., Біляєва І. М., Лавренко С. О., Бойценюк Х. І. Модифікований метод хольдріджа для визначення евапотранспірації. *Аграрні інновації*. 2020. Вип. 3. С. 17–20. DOI: 10.32848/аграр.innov.2020.3.3
 18. Zarei A. R., Mahmoudi M. R. Assessing the influence of PET calculation method on the characteristics of UNEP aridity index under different climatic conditions throughout Iran. *Pure and Applied Geophysics*. 2021. Vol. 178. P. 3179–3205. DOI: 10.1007/s00024-021-02786-z
 19. Abdi H. Coefficient of variation. *Encyclopedia of Research Design*. 2010. Vol. 1. P. 169–171.
 20. Lee D. K., In J., Lee S. Standard deviation and standard error of the mean. *Korean Journal of Anesthesiology*. 2015. Vol. 68(3). P. 220. DOI: 10.4097/kjae.2015.68.3.220
 21. Barde M. P., Barde P. J. What to use to express the variability of data: Standard deviation or standard error of mean?. *Perspectives in Clinical Research*. 2021. Vol. 3(3). P. 113. DOI: 10.4103/2229-3485.100662
 22. Bland J. M., Altman D. G. Statistics notes: measurement error. *Bmj*. 1996. Vol. 312(7047). P. 1654. DOI: 10.1136/bmj.312.7047.1654
 23. Gocic M., Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*. 2013. Vol. 100. P. 172–182. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.014
 24. Chen P., Niu A., Liu D., Jiang W., Ma B. Time series forecasting of temperatures using SARIMA: An example from Nanjing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 394(5). P. 052024. DOI: 10.1088/1757-899X/394/5/052024
 25. Hyndman R. J. Forecasting: principles and practice. OTexts, 2018. 379 pp.
 26. Dickey D. A., Fuller W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*. 1979. Vol. 74(366a). P. 427–431. DOI: 10.1080/01621459.1979.10482531
 27. Willmott C. J., Matsuura K. On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. Vol. 20(1). P. 89–102. DOI: 10.1080/13658810500286976
 3. Baraka, J. (2023). Effect of global warming on agricultural productivity. *International Journal of Agriculture*, 8(1), 21–30. DOI: 10.47604/ija.1971
 4. Lykhovyd, P. (2022). Theoretical bases of crop production on the reclaimed lands in the conditions of climate change. Warsaw : RS Global. 259 pp. DOI: DOI:10.31435/rsglobal/050
 5. Zaiets, S. O., Volvach, O. V., & Yuzyuk, S. M. (2023). Agroklimatechna ocinka vplyvu zmin klimatu na teplovi resursy terytoriyi Pivnichno-Zaxidnogo Prychornomor'ya [Agroclimatic assessment of the impact of climate change on the thermal resources of the Northwestern Black Sea region]. *Climate-Smart Agriculture: Science and Practice. Scientific monograph*. ISMA ANNO 1994, 132–151. DOI: 10.30525/978-9934-26-389-7-7 [In Ukrainian]
 6. Osadchyi, V. I. (2021). Klimatychna prohrama Ukrainy yak osnova tsilisnoi ekolohichnoi polityky derzhavy v umovakh zminy klimatu [Climate program of Ukraine as a basis for comprehensive ecological policy of the country in the conditions of climate change]. *Bulletin of NAS of Ukraine*, 6, 81–84. DOI: 10.15407/vism2021.06.081 [In Ukrainian]
 7. Lykhovyd, P. V., Averchev, O. V., Bidnyna, I. O., Avercheva, N. O., & Nikitenko, M. (2024). Evaluation of different methods for reference evapotranspiration assessment: A case study for Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 15(3), 441–445. DOI: 10.15421/022462
 8. Burykina, S. I., & Tsurkan, O. I. (2020). Tendentsii suchasnoi zminy ahroklimatychnoi sytuatsii na terytorii stepovoi chornozemnoi zony Pivdnia Ukrainy [Trends of modern changes in the agro-climatic situation on the territory of the steppe Chernozem zone of the South of Ukraine]. *Tavrian Scientific Herald*, 111, 29–43. DOI: 10.32851/2226-0099.2020.111.4 [In Ukrainian]
 9. Szostek, K., Mazur, D., Dralus, G., & Kuszniar, J. (2024). Analysis of the Effectiveness of ARIMA, SARIMA, and SVR models in time series forecasting: A case study of wind farm energy production. *Energies*, 17(19), 4803. DOI: 10.3390/en17194803
 10. Khan, M. S., Islam, M., Adhikary, S., Hossain, M. M., & Afroja, S. (2018). Analysis and predictions of seasonal affected weather variables of Bangladesh: SARIMA models vs. Traditional models. *International Journal of Business and Management*, 13(11), 70–80. DOI: 10.5539/ijbm.v13n12p70
 11. Pichura, V., Potravka, L., & Rutta, O. (2022). Prostorovo-chasovyi analiz i prohnoz klimatychnykh zmin v zoni Stepu Ukrainy [Spatial and temporal analysis and prognosis of climatic changes in the Steppe zone of Ukraine]. *Ecological Sciences*, 6(45), 110–118. DOI: 10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.18 [In Ukrainian]
 12. Kulbida, M. I., Barabash, M. B., & Yelistratova, L. O. (2011). Prohnoz zmin klimatu Ukrainy na pochatku XXI stolittia [Forecast of climate change in Ukraine at the beginning of the XXI century]. *Scientific Reports of Vinnytsia State Pedagogical University named after Mykhailo Kotsyubynskyi. Series: Geography*, 23, 10–17. DOI: 10.1080/10095020.2022.2100287 [In Ukrainian]
 13. Grebenyuk, N. P. (2014). Kharakterystyka povtorivnosti sylnykh zlyv na terytorii Ukrainy v umovakh suchasnykh zmin klimatu [Description of repetition of sil'nykh thundershowers on territory of Ukraine in uslovyyakh of

REFERENCES:

1. Halmaghi, E. E., Cîrdei, A., & Metea, I. G. (2023). Food security and armed conflicts. *Land Forces Academy Review*, 28(4), 329–337. DOI: 10.2478/raft-2023-0039
2. Janni, M., Maestri, E., Gulli, M., Marmiroli, M., & Marmiroli, N. (2024). Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: a critical review. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1297569. DOI: 10.3389/fpls.2023.1297569

- modern changes of climate]. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1, 96-101. [In Ukrainian]
14. Dudnik, A. V. (2011). Bahatorichna dynamika populatsii i prohnoz masovoho rozmnozhenia naiposhyrenishykh shkidnykiv pshenytsi ozymoi v Stepu Ukrainy [Long-term outlook population dynamics and the mass reproduction of the main pests of winter wheat the steppes of Ukraine]. *Agrobiology*, 6, 37–41. [In Ukrainian]
 15. Loboda, N. S., Serbova, Z. F., & Bozhok, Yu. V. (2015). Otsinka vplyvu zmin klimatu na vodni resursy Ukrainy na osnovi modeli "klimat-stik" za stsenariiem hlobalnoho poteplynnia A2 [The assessment of the impact of climate change on water resources of Ukraine based on the model "climate- runoff " under global warming scenario A2]. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1(36), 8–17. [In Ukrainian]
 16. Osadchyi, V., Skrynyk, O., Palamarchuk, L., Skrynyk, O., Osypov, V., Oshurok, D., & Sidenko, V. (2022). Dataset of gridded time series of monthly air temperature (min, max, mean) and atmospheric precipitation for Ukraine covering the period of 1946–2020. *Data in Brief*, 44, 108553. DOI: 10.1016/j.dib.2022.108553
 17. Vozhehova, R. A., Lykhovyd, P. V., Biliaieva, I. M., Lavrenko, S. O., & Boitseniuk, K. I. (2020). Modyfikovanyi metod Kholdridzha dlia vyznachennia evapotranspiratsii [Modified Holdridge method for evapotranspiration assessment]. *Аграрні інновації*, 3, 17–20. DOI: 10.32848/agrar.innov.2020.3.3 [In Ukrainian]
 18. Zarei, A. R., & Mahmoudi, M. R. (2021). Assessing the influence of PET calculation method on the characteristics of UNEP aridity index under different climatic conditions throughout Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 3179–3205. DOI: 10.1007/s00024-021-02786-z
 19. Abdi, H. (2010). Coefficient of variation. *Encyclopedia of Research Design*, 1, 169–171. DOI:
 20. Lee, D. K., In, J., & Lee, S. (2015). Standard deviation and standard error of the mean. *Korean Journal of Anesthesiology*, 68(3), 220. DOI: 10.4097/kjae.2015.68.3.220
 21. Barde, M. P., & Barde, P. J. (2012). What to use to express the variability of data: Standard deviation or standard error of mean?. *Perspectives in Clinical Research*, 3(3), 113. DOI: 10.4103/2229-3485.100662
 22. Bland, J. M., & Altman, D. G. (1996). Statistics notes: measurement error. *Bmj*, 312(7047), 1654. DOI: 10.1136/bmj.312.7047.1654
 23. Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172–182. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.014
 24. Chen, P., Niu, A., Liu, D., Jiang, W., & Ma, B. (2018). Time series forecasting of temperatures using SARIMA: An example from Nanjing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394(5), 052024. DOI: 10.1088/1757-899X/394/5/052024
 25. Hyndman, R. J. (2018). Forecasting: principles and practice. OTexts. 379 pp.
 26. Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366a), 427–431. DOI: 10.1080/01621459.1979.10482531
 27. Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2006). On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1), 89–102. DOI: 10.1080/13658810500286976
- Лиховид П.В., Вожегова Р.А., Грановська Л.М., Ушкаренко В.О., Чабан В.О., Кузнєцов С.І., Біднина І.О. Математичне прогнозування еколого-кліматичної ситуації в Україні в контексті глобального потепління**
- Мета.** Здійснити аналіз поточного стану та виконати прогнозне моделювання розвитку еколого-кліматичної ситуації в Україні до 2050 року з урахуванням ретроспективних даних за 1946-2021 рр., визначити можливі сценарії аридизації клімату та запропонувати дієві способи протидії негативному впливу кліматичних змін.
- Методи.** Для оцінки еколого-кліматичної ситуації та прогнозування розвитку посушливості клімату було залучено найбільш повну метеорологічну базу даних по Україні за період 1946-2020 рр., доповнену нами даними за 2021 рік, узагальненими за метеохабом <https://meteoport.com/>. В цілому було проаналізовано 6646776 точок даних по опадах, а також 13293552 точок даних по температурному режиму. Потенційну евапотранспірацію розраховували за Хольдріджем, індекс аридності оцінювали за загальноприйнятою методикою в редакції UNEP. Методами математичного та статистичного аналізу було встановлено розмах дисперсії метеорологічних показників, наявність достовірного тренду, аутокореляції, а також виконано прогнозування посушливості клімату за методикою ауторегресійної моделі з ковзним середнім.
- Результати.** Встановлено достовірні тренди до підвищення потенційної евапотранспірації на території України, що закономірно витікає зі зростання величини середньорічних температур повітря. Не було виявлено статистичного значущого тренду до зміни розподілу а надходження опадів. Щодо індексу аридності, до 2050 року з високою вірогідністю спостерігатиметься поступове його зниження, а отже, посилення процесів аридизації клімату та опустелювання. Найбільш дієвими заходами збереження продуктивності агроєкосистем та забезпечення продовольчої безпеки держави в нових кліматичних реаліях є запровадження науково обґрунтованого екологічно та ресурсоощадного зрошення з урахуванням доступності водних ресурсів, якості поливної води та загального стану природних екосистем.
- Висновки.** Встановлено статистично достовірний ризик істотного наростання посушливості клімату на території України до 2050 року. Не дивлячись на порівняно стабільну ситуацію з надходженням опадів, стрімке наростання температури повітря та пов'язане з цим супутнє зростання потенційної евапотранспірації зумовлюють високі ризики для опустелювання та деградації природних і сільськогосподарських антропогенних екосистем, зниження продуктивності ріллі та загрозу продовольчій безпеці. Забезпечення еколого-кліматичного моніторингу, аудиту природних ресурсів і раціонального відновлення зрошення як фактору нівелювання дефіциту природної вологи є ключовими передумовами сталого розвитку екологічно безпечного сільського господарства в Україні, а також забезпечення кліматичної нейтральності агропромислового комплексу.
- Ключові слова:** екосистема, зрошення, меліорація, моделювання, статистичний аналіз.

Lykhovyd P.V., Vozhehova R.A., Hranovska L.M., Ushkarenko V.O., Kuznietsov S.I., Bidnyna I.O. **Mathematical forecasting ecological and climatic situation in Ukraine in the context of global warming**

Purpose. To perform the analysis of current state and create predictive models of the development of the ecological and climatic situation in Ukraine until 2050, taking into account retrospective data for 1946-2021, to identify possible scenarios of climate aridification and to propose effective ways to mitigate the negative impact of climate change.

Methods. To assess the ecological and climatic situation and forecast the development of climate aridity, the most complete meteorological database for Ukraine for the period 1946-2020 was used, supplemented with data for 2021, summarized by the weather hub <https://meteo-post.com/>. In total, 6646776 precipitation data points were analyzed, as well as 13293552 temperature data points. Potential evapotranspiration was calculated according to Holdridge, the aridity index was estimated according to the generally accepted methodology in the edition of UNEP. The variance in meteorological indicators, the presence of a reliable trend, autocorrelation, and climate aridity forecasting were performed using the method of an autoregressive model with a moving average.

Results. Reliable trends towards an increase in potential evapotranspiration have been established in the territory of Ukraine, which naturally follows from an increase in

the average annual air temperatures. No statistically significant trend towards a change in the distribution of precipitation has been identified. As for the aridity index, by 2050 it will most likely gradually decrease, and therefore, the processes of climate aridification and desertification will intensify. The most effective measures to preserve the productivity of agroecosystems and ensure the food security of the state in new climatic realities are the introduction of scientifically substantiated ecological and resource-saving irrigation, considering the availability of water resources, the quality of irrigation water and the general condition of natural ecosystems.

Conclusions. A statistically significant risk of a significant increase in climate aridity in Ukraine by 2050 has been established. Despite the relatively stable situation with precipitation, the rapid increase in air temperature and the associated increase in potential evapotranspiration cause high risks for desertification and degradation of natural and agricultural anthropogenic ecosystems, a decrease in arable land productivity, and a threat to food security. Ensuring ecological and climatic monitoring, auditing of natural resources, and rational restoration of irrigation as a factor in leveling the deficit of natural moisture are key prerequisites for the sustainable development of environmentally safe agriculture in Ukraine, as well as ensuring climate neutrality of the agro-industrial complex.

Key words: ecosystem, irrigation, land reclamation, modeling, statistical analysis.