

УДК 551.583.1

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.18>

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ І ПРОГНОЗ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН В ЗОНІ СТЕПУ УКРАЇНИ

Пічура В.І., Потравка Л.О., Рутта О.В.

Херсонський державний аграрно-економічний університет

вул. Стрітенська, 23, 73006, м. Херсон

pichuravitalii@gmail.com

Зміни клімату обумовлюють збільшення частот та інтенсивності небезпечних погодних явищ, які призводять до значного економічного збитку, загрожують стабільності ландшафтних і аквальних екосистем, а також здоров'ю та життю населення. Тому для підвищення рівня ефективності господарювання в аграрній сфері економіки необхідно обґрунтувати природоохоронні заходи щодо відновлення та раціонального використання природних ресурсів, забезпечити реалізацію принципів сталого природокористування з урахуванням просторово-часових закономірностей змін клімату. Із застосуванням методів багатовимірної статистики (метод різницевої інтегральної кривої модульних коефіцієнтів, рівень забезпеченості, метод одномірного аналізу Фур'є, метод ланцюгів Маркова), прогнозування часових рядів (метод Хольта-Уінтерса) та геомодельовання (радіально-базисної функції) встановлені закономірності змін кліматичних умов у зоні Степу України за 1945-2019 рр. та здійснено їх прогноз до 2030 року. Встановлено, що за період досліджень середньорічна температура повітря збільшилася на 3,5°C. Сума річних атмосферних опадів змінювалась в межах 186-778 мм із рівнем варіації 27,2%, в останні 20 років визначено їх зменшення на 40% – до 500-300 мм. Із застосуванням геостатистичних методів встановлені закономірності просторової диференціації кліматичних показників. Доведено, що інерційна ймовірність повторення спекотних років оцінена в 0,58, а можливість повторення вологих років в 0,46. Це вказує на циклічне підвищення середньорічної температури повітря та зниження суми річних опадів у зоні Степу. В результаті прогнозування визначено, що при збереженні тенденції формування кліматичних умов, із ймовірністю в 93%, буде відбуватися стабільне тренд-циклічне підвищення середньорічного значення температури повітря на 0,06°C в рік і може становити до 2030 року $12,9 \pm 0,2^\circ\text{C}$, із ймовірністю 80% прогнозується тренд-циклічне зменшення суми річних опадів на 62,0 мм в рік і може становити до 2030 року 427 ± 50 мм. Одержані результати підтверджують значні кліматичні зміни в зоні Степу України, погіршення умов сільськогосподарського виробництва, зниження урожаю, самовідновлюваної та саморегулюючої функції степових ґрунтів, зміни гідрологічного режиму річок. *Ключові слова:* клімат, температура повітря, атмосферні опади, ретроспективний аналіз, геомодельовання, прогнозування, зона Степу.

Spatial and temporal analysis and prognosis of climatic changes in the Steppe zone of Ukraine. Pichura V., Potravka L., Rutta O.

Climate change causes an increase in the frequency and intensity of dangerous weather events, which lead to significant economic damage, threaten the stability of landscape and aquatic ecosystems, as well as the health and life of the population. Therefore, in order to increase the level of efficiency of management in the agricultural sector of the economy, it is necessary to substantiate environmental measures for the restoration and rational use of natural resources, to ensure the implementation of the principles of sustainable nature management with the calculation of space-time patterns of climate change. Using methods of multidimensional statistics (method of difference integral curves of modular coefficients, level of security, method of one-dimensional Fourier analysis, method of Markov chains), prediction of time series (Holt-Winters method) and geomodeling (radial-basis function), regularities of changes of climatic conditions in the Steppe zone of Ukraine for 1945-2019 years have been established and their forecast to 2030 has been implemented. It was found that during the period of research the average annual air temperature increased by 3.5°C. The sum of annual precipitation has varied in the range of 186-778 mm with the level of variation of 27.2%, in the last 20 years their decrease is determined by 40% – up to 500-300 mm. With the stagnation of geostatistical methods, regularities of spatial differentiation of climatic indicators have been established. It is proved that the inertial probability of repetition of hot years is estimated at 0.58, and the possibility of repetition of wet years is 0.46. This indicated a cyclic increase in the average annual air temperature and a decrease in the amount of annual precipitation in the Steppe zone. As a result of forecasting, it is determined that with continued trends in the formation of climatic conditions, with a probability of 93%, there would be a stable trend-cyclic increase in the average annual air temperature by 0.06°C per year and can be $12.9 \pm 0.2^\circ\text{C}$ by 2030, with a probability of 80% a trend-cyclic decrease in the amount of annual precipitation by 62.0 mm per year and could be 427 ± 50 mm by 2030. The obtained results have confirmed significant climatic changes in the Steppe zone of Ukraine, deterioration of agricultural production conditions, reduction of crop, self-healing and self-regulating function of steppe soils, changes in the hydrological regime of rivers. *Key words:* climate, air temperature, atmosphere precipitation, retrospective analysis, geomodeling, forecasting, Steppe zone.

Постановка проблеми. Зміна клімату є глобальним викликом XXI століття, який охоплює екологічні, економічні і соціальні аспекти сталого розвитку країн світу. Кліматичні зміни проявляються в інтенсивності, частоті кліматичних аномалій і екстремальних погодних явищах на різних рівнях ієрархії в просторі і часі. За останні 30 років значно

збільшилася частота та інтенсивність небезпечних погодних явищ, які призводять до значного економічного збитку, загрожують стабільності ландшафтних і аквальних екосистем, а також здоров'ю та життю населення. Спрогнозовано збереження існуючого напряму тренд-циклічних кліматичних змін [1-3], які викликають суттєві зміни функціонування при-

родних і штучних екосистем, збільшення частоти проявів небезпечних процесів і наслідків, деградації навколишнього середовища. До основних причин глобальної зміни клімату вчені світу відносять: антропогенний фактор [4, 5]; підвищення в кругообігу вуглекислого газу [6]; радіаційний прогрів атмосфери за рахунок поглинання інфрачервоного випромінювання при домінуючому впливі конвективного теплообміну [7]; зміна течій в Північному Льодовитому океані (холодна Лабрадорська течія в районі Гренландії і теплий Гольфстрім), що призводить до періодичних катастрофічних епох стабільного зниження і збільшення температурного режиму в Північній півкулі [8, 9]. Клімат на регіональному рівні формується під впливом трьох найважливіших чинників: циркуляції атмосфери, сонячної інсоляції і рельєфу [10]. Потребують визначення та реалізації попереджувальні заходи, зокрема: широке впровадження басейнових принципів управління навколишнім середовищем, застосування сучасних технологій для зниження кількості викидів в атмосферне повітря вуглекислого газу та поллютантів, зменшення площі ріллі і збільшення природних угідь, застосування альтернативних джерел енергії та технологій енергозабезпечення, впровадження адаптивних технологій і заходів до неконтрольованих кліматичних змін у різні сфери економічної діяльності тощо.

Збільшення антропогенного навантаження знижує рівень стійкості навколишнього природного середовища, що приводить до проявів кліматичних змін. Особливо негативні прояви антропогенно-кліматичних змін фіксуються в зоні Степу [11, 12]. Значно знизився рівень забезпеченості водними ресурсами та їх якість [13, 14], на 60% знищена природна гідромрежа малих та середніх річок [15, 16], зросла частота посух [17, 18] та проявів ерозійних процесів, погіршився стан земельних ресурсів [19–21], що привело до зниження врожаю сільськогосподарських культур [22, 23]. З метою підвищення рівня ефективності господарювання в аграрній сфері економіки необхідно обґрунтувати природоохоронні заходи щодо відновлення та раціонального використання природних ресурсів, забезпечити реалізацію принципів сталого природокористування з урахуванням просторово-часових закономірностей змін клімату та біокліматичного потенціалу території. Зокрема, внутрішня цілісність заключної частини голоцени (субатлантичний період) дозволяє поширити усереднені кліматичні дані інструментального періоду на 2800 років назад [24], що забезпечує можливість здійснити історичну реконструкцію кліматично-обумовлених змін та прогноз умов функціонування екосистем. Аналіз наявних джерел показав, що питання вивчення, ретроспективного аналізу, моделювання та прогнозування багаторічних змін клімату та біокліматичного потенціалу з метою розробки та ведення нових адаптаційних заходів на різних рівнях господарювання залишаються актуальними і недостатньо дослідженими.

Мета дослідження – встановити просторово-часові закономірності змін та здійснити прогноз кліматичних умов у зоні Степу України.

Матеріали і методи досліджень. У дослідженні використані фактичні значення приземної температури повітря (T , °C) та суми атмосферних опадів (P , мм) по даним станції Херсон (широта – $46^{\circ}37'41''$; довгота – $32^{\circ}35'5''$) за 75 років (1945–2019 рр.). Кліматичні норми за період спостережень склали: $\bar{T} = 9,8^{\circ}\text{C}$; $\bar{P} = 415$ мм. Ці параметри характеризують ретроспективно-циклічні зміни кліматичних умов в зоні Степу України.

Для ретроспективного аналізу, визначення часових закономірностей формування кліматичних умов та оцінки різномірності часових періодів, у роботі використано такі методи дослідження: описової статистики, регресійного аналізу та перетворення змінних (метод різницевої інтегральних кривих модульних коефіцієнтів, рівень забезпеченості). З метою визначення циклічних складових та виявлення найбільших значень періодограми формування часових рядів використано метод одномірного аналізу Фур'є. Для оцінки ймовірності інерції клімату використано метод ланцюгів Маркова [25]. Імовірність повторень періодів із відповідними умовами кліматичних змін (Н-жаркий/С-холодний, D-сухий/W-вологий) розраховано методами Габріеля та Ноймана [11, 25]. Аномальні прояви змін кліматичних умов визначені за величиною щорічних середньоквадратичних відхилень від значення середньої багаторічної норми: $T, P \geq \pm 2\sigma$ – сильні аномалії і $T, P \geq \pm 2\sigma$ – дуже сильні аномалії.

Ретроспективне дослідження та прогнозування змін кліматичних умов здійснено із урахуванням основних складових часових процесів за формулою:

$$T_t, P_t = Tr_t + S_t + C_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де T_t, P_t – вхідні дані параметрів кліматичних змін; Tr_t – відгук трендової складової; S_t – відгук сезонної складової; C_t – відгук середньорічної циклічної складової; ε_{t-n} – відгук імовірнісної стохастичної або нерегульованої компоненти зміни кліматичних умов.

Для прогнозування змін кліматичних умов використано адаптивний метод аналізу часових рядів Хольта-Уінтерса (трьохпараметричне експоненціальне згладжування) [26], який враховує закономірності ретроспективних кліматичних змін, в тому числі циклічну та трендову складову:

$$\begin{cases} L_t = \frac{\alpha Y_t}{C_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \\ T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \\ C_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-c} \\ \hat{Y}_{t+p} = (L_t + pT_t)C_{t-c+p} \end{cases} \quad (2)$$

де Y_t – ретроспективні значення параметрів клімату (температури повітря, атмосферні опади); L_t – вплив ретроспективних значень на прогноз $t+n$; T_t – трен-

дова складова; C_t – циклічна складова $t+n$; $\hat{Y}_{t+p}$ – значення прогнозу параметрів клімату (температури повітря, атмосферні опади).

Для просторово-часового аналізу та прогнозування кліматичних умов в зоні Степу України використано робочі модулі Time series and forecasting (TSF) ліцензованого програмного продукту STATISTICA 10.0. та ArcGIS 10.1. Просторові моделі диференціації значень кліматичних визначалися на основі екстраполяції декомпозицій загальнодоступних даних *CliWare* [27] із застосуванням методу радіально-базисної функції та додаткових даних 47 метеостанцій.

Виклад основного матеріалу. Екстенсивне використання земельних ресурсів в зоні Степу призвело до дисбалансу природного стану родючості ґрунтів, значного погіршення їх родючості, порушення екологічної рівноваги навколишнього середовища, зниження ефективності та швидкості природних ґрунтоутворних процесів, збільшення енергетичних витрат на нестабільних урожаї сільськогосподарських культур [19–21, 22, 23]. Зокрема, негативні екологічні процеси підсилюються кліматичними змінами і спричиняють великомасштабні прояви вітрової ерозії, засолення та осолонцювання степових ґрунтів, що підтверджує актуальність детального ретроспективного вивчення змін клімату та його прогнозування як основи для розробки адаптивно-циклічних природоохоронних заходів. Ці заходи повинні враховувати зональні та внутрішньозональні відмінності зміни ландшафтів, які обумовлені різними факторами їх диференціації, зокрема, у північних частинах, де опади перевищують величину випаровуваності, це термічний фактор; у південних – фактор зволоження.

Дослідженнями встановлено, що у зоні Степу України за останні 75 років відбулося значне тренд-циклічне підвищення середньорічної температури повітря, асинхронне зменшення суми річних опадів та значний їх нерівномірний сезонний розподіл. Циклічні складові багаторічного формування кліматичних показників склали: температури повітря – 8 років, сума опадів – 11 років. Останні 20 років (рис. 1:1-а) визначені як найбільш екстремальним періодом за частотою аномальних кліматичних проявів, які збільшилися у 3 рази (з 23% до 70%), що спричинило зростання температурного режиму за циклічно-поліноміальною закономірністю ($R=0,93$, $R^2=0,86$) і призвело до зростання середньорічної температури повітря в період 1945–2019 рр. на $3,5^\circ\text{C}$ із середньою швидкістю зростання $0,047^\circ\text{C}$ на рік. В період 1998–2019 рр. (рис. 1:1-б) фіксується систематичне перевищення багаторічної норми на $0,7$ – $2,5^\circ\text{C}$ і більше. В результаті побудови інтегральної кривої (рис. 1:1-в) визначено два основні періоди формування температурного режиму: перший період (1945–1997 рр.) – циклічно-стабільний температурний режим, без вираженого тренду, варіація середньорічної температури повітря становила

від $7,2^\circ\text{C}$ до $10,9^\circ\text{C}$, за норми $9,0^\circ\text{C}$; другий період (1998–2019 рр.) – стабільне тренд-циклічне підвищення температурного режиму, варіація середньорічної температури повітря становила від $9,6^\circ\text{C}$ до $12,2^\circ\text{C}$, за норми $11,1^\circ\text{C}$. За весь період спостереження рівень варіації температурного режиму склав 12,7%, зокрема, зафіксовано 20% (15 років) аномально жарких років із середньорічною температурою $10,8^\circ\text{C}$ і більше та 16% (12 років) аномально холодних років із середньорічною температурою менше $8,4^\circ\text{C}$.

Зміни температурного режиму фіксується впродовж усіх сезонів, найбільші зміни спостерігаються у літній та осінній періоди. За останні 20 років спостережень середня температура повітря в літній період (VI–VIII місяць) підвищилася від $20,5^\circ\text{C}$ до $24,5^\circ\text{C}$ із незначним рівнем сезонної варіації в 6,0%, в осінній період зафіксовано підвищення температури від $9,5^\circ\text{C}$ до $12,5^\circ\text{C}$ із рівнем варіації 12,7%. Зимовий період характеризується значною варіацією в 25,0% та незначним висхідним трендом у зміні температурного режиму, середнє значення якого підвищилося від $-1,5^\circ\text{C}$ до 0°C . Восени температура повітря за 20 років в середньому підвищилася з $10,0^\circ\text{C}$ до $12,0^\circ\text{C}$ з рівнем варіації 15,6%. Порівняльна характеристика помісячних змін мінімальних і максимальних значень представлено на рисунку 2а – періоди 1945–1997 рр. та рисунку 2б – період 1998–2019 рр. Середньомісячні зміни температурного режиму за два часових зрізи представлено на рисунку 2д.

В результаті просторового моделювання встановлені зональні закономірності кліматичних передумов диференціації функціонування степових ґрунтів. Визначено, що середнє значення температури повітря за 1990–2019 рр. в зоні Степу України змінюється у напрямку з півночі на південь за вегетаційний період від $16,1$ до $19,4^\circ\text{C}$ (рис. 3а), середньорічне значення становить в межах $7,4$ – $11,5^\circ\text{C}$ (рис. 3б). Найбільше значення температури повітря фіксується у південній частині зони Степу.

Зонально-кліматичні зміни функціонування ґрунтів підпорядковується принципу лімітуючого фактору, тобто від речовини, концентрація якої є мінімальною, залежить біопродуктивних потенціал ґрунтів, ріст рослин, величина і сталість їх урожаю. В зоні Степу лімітуючим фактором є зволоження. Зокрема, фонові характеристики зональних змін тепло- і вологозабезпечення обумовлюють специфіку і багаторічну ритмічність умов сільськогосподарського виробництва.

Циклічність змін атмосферних опадів у зоні Степу знаходиться у асинхронній закономірності змін відносно температурного режиму. В період 1945–2019 рр. сума річних атмосферних опадів змінювалась в межах 186 – 778 мм (рис. 1:2-а) із рівнем варіації 27,2%. З 1945 до 1977 року фіксується стабільне тренд-циклічне збільшення суми атмосферних опадів від 186 мм до 600 мм, цей період характери-

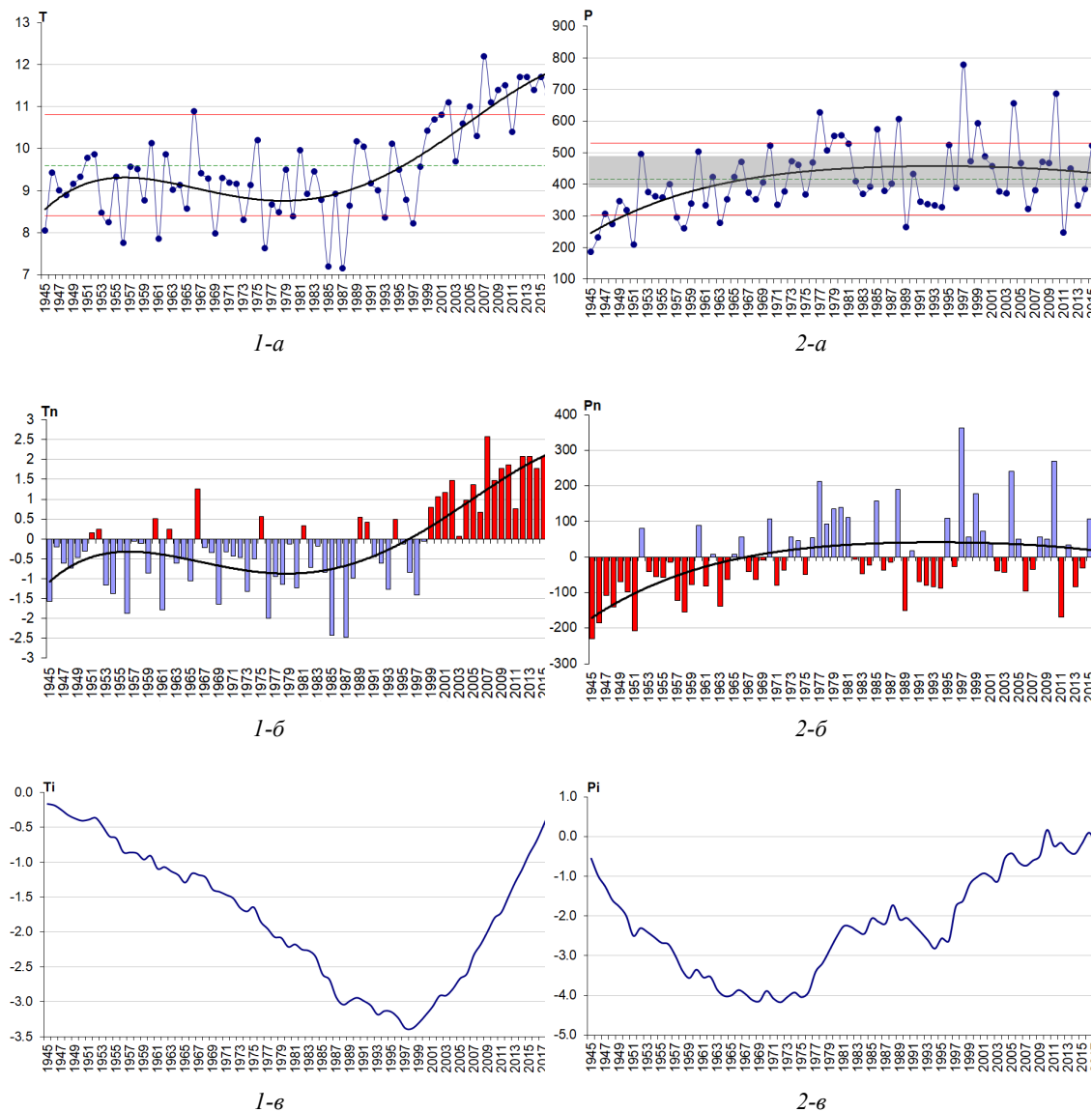


Рис. 1. Характеристика багаторічних змін клімату в зоні Степу України в період 1945–2019 рр.:
 1 – температура повітря (T , °C); 2 – атмосферні опади (P , мм); а – багаторічна динаміка;
 б – відхилення відносно багаторічної норми (T_n , P_n); в – інтегральні криві (T_i , P_i)

зується найбільшою кількістю років (23 роки) із надходженням суми річних опадів менше багаторічної норми (рис. 1:2-б). Далі зафіксований другий період 1978–1996 рр. із зниженням суми річних опадів від 600 мм до 310 мм. Третій період (1997–2019 рр.), характеризується від'ємним трендом та значними стохастичними змінами у варіації природного вологозабезпечення, аномальними проявами зливового характеру та непродуктивними опадами, які призводять до збільшення частоти прояву у зимово-весінній період ерозії ґрунтів та підтоплень територій, у вегетаційний період до дефіциту та нерівномірного розподілу води. Збільшення суми атмосферних опадів на початку третього періоду до 650–780 мм відзначається їх подальшим зменшенням на 40% – до 500–300 мм. Три періоди змін атмосферних опадів

добре зафіксовані на інтегральній кривій (рис. 1:2-в). За період 1945–2019 рр. зафіксовано 38 років (50,7%) із сухими умовами (< 400 мм) природного вологозабезпечення (рис. 1:2-з), 21 рік (28,0%) із середніми (400–500 мм) та 16 років (21,3%) вологими умовами. Зокрема, зафіксовано 12,0% (9 років) аномально сухих років із надходженням атмосферних опадів менше 300 мм на рік та 13,3% (10 років) аномально вологих років із сумою опадів на рік більше 530 мм. В результаті досліджень для зони Степу встановлено міцну зворотню експоненціальну залежність ($r = -0,94$) зміни кількості днів із суховіями від зміни суми атмосферних опадів на рік, функція має вигляд: $y = 1500,2 \exp(-0,009P)$, $r^2 = 0,88$. Також встановлена зворотно-лінійна залежність ($r = -0,76$) збільшення кількості днів з відносною вологістю повітря 30%

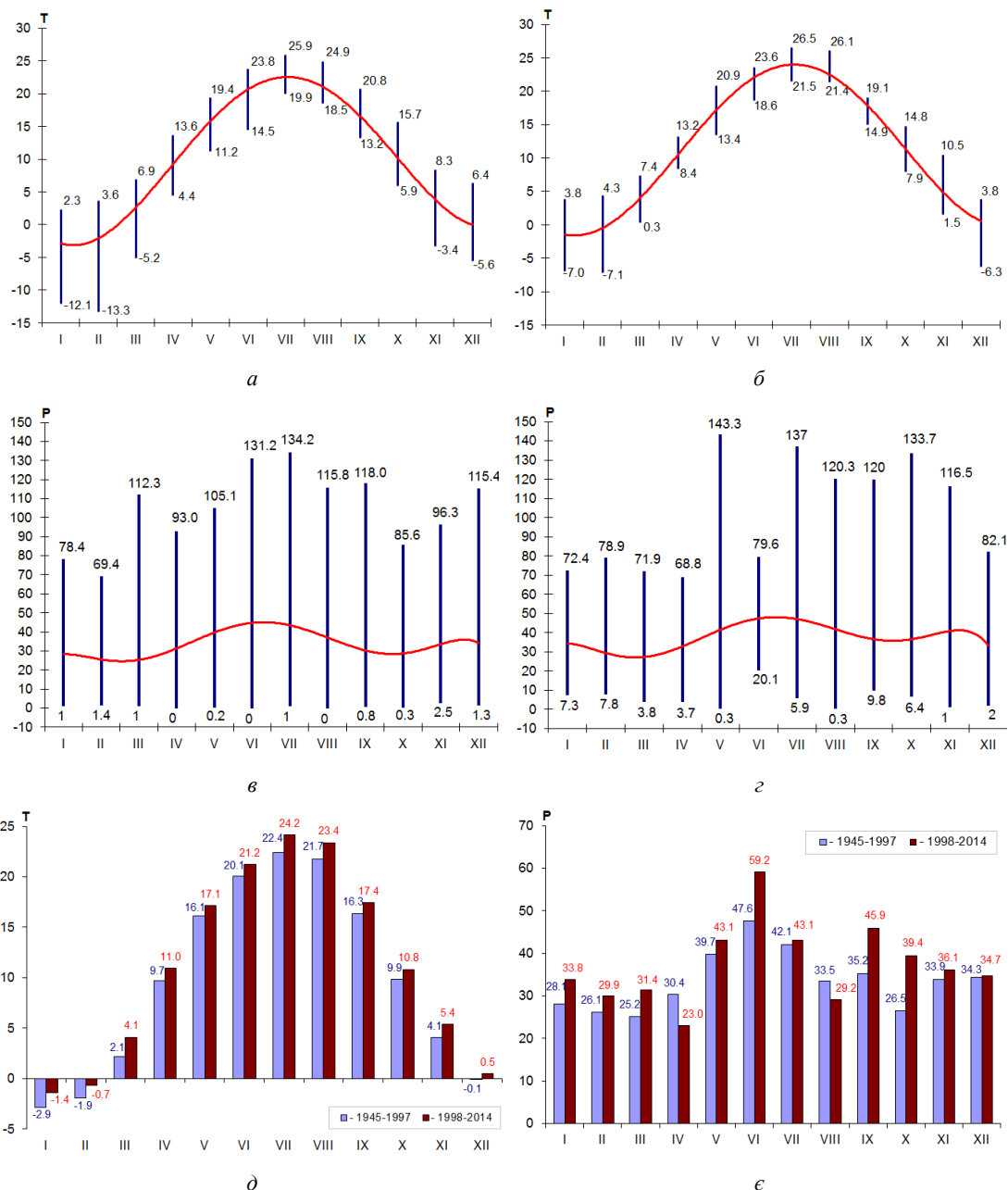


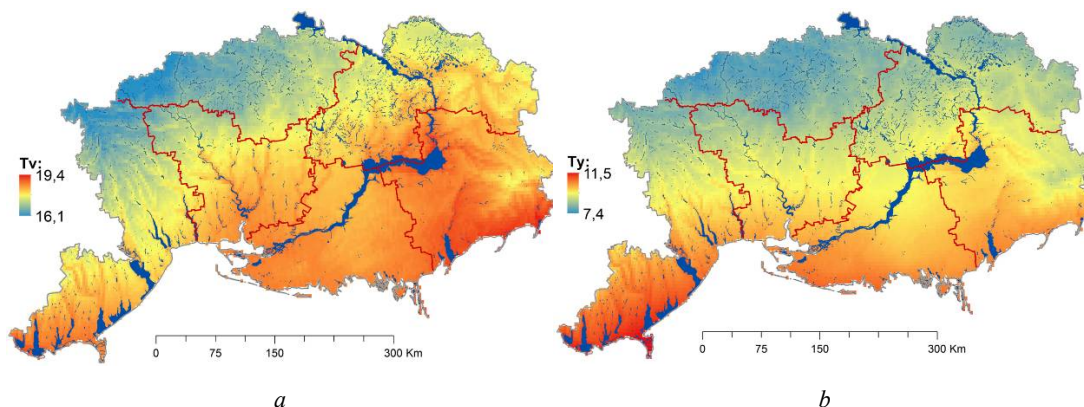
Рис. 2. Порівняльна характеристики сезонних зміни кліматичних умов в зоні Степу України за двома часовими зрізами: варіація зміни температури повітря, T, °C (а – 1945–1997 рр.; б – 1998–2019 рр.); варіація зміни атмосферних опадів, P, мм (в – 1945–1997 рр.; г – 1998–2019 рр.); д – зміна середньомісячної норми температури повітря; е – зміна щомісячних значень атмосферних опадів

від зменшення суми річних атмосферних опадів: $y = -0,1649P + 124,4$, $r^2 = 0,58$.

У порівнянні із першим (1945–1997 рр.) в другому періоді (1998–2019 рр.) спостерігається збільшення середнього значення суми атмосферних опадів майже по всім місяцям (рис. 2е), переважно це обумовлено підвищенням мінімально можливого надходження атмосферних опадів (рис. 2г), збільшення частоти опадів зливового характеру у весняно-літній період від 15% до 30%, що обумовлює значне зниження їх продуктивності, підвищення ґрунтово-ерозійних процесів та збільшення

ризиків змиву із полів посівів сільськогосподарських культур, порушення транспіраційних процесів та підвищення випаровуваності вологи в літньо-осінній період.

Просторова диференціація суми вегетаційних атмосферних опадів на території зони Степу України за 1990–2019 рр. варіювало з південної до північної частини від 182 мм до 382 мм (рис. 4а), за рік сума атмосферних опадів змінюється від 321 мм до 607 мм (рис. 4б). Найбільше значення атмосферних опадів фіксується у північно-західній і північно-східних частинах зони Степу.

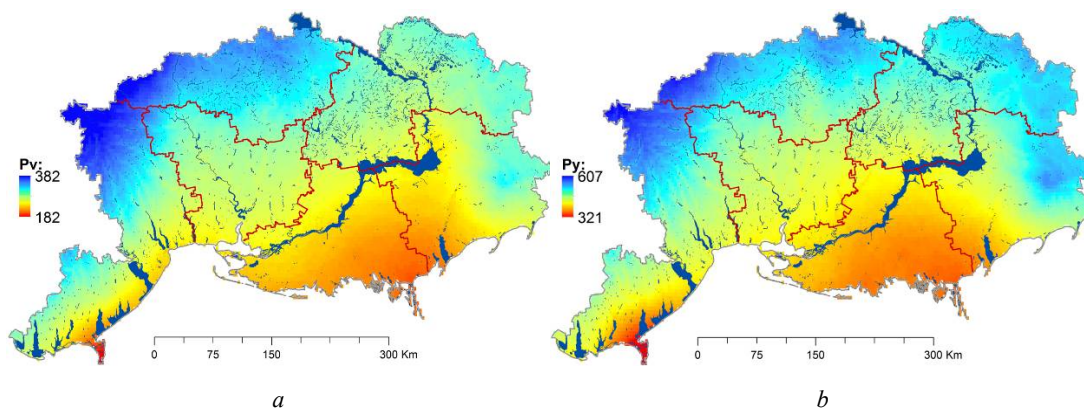


Просторова функція розподілу значень T_v :

$$T_v = -23,271 - 2,904x - 0,036x^2 + 4,215y - 0,091y^2 + 0,115xy, r^2 = 0,79$$
Просторова функція розподілу значень T_y :

$$T_y = 148,909 - 2,604x - 0,021x^2 - 3,215y - 0,006y^2 + 0,086xy, r^2 = 0,91$$
де, x – довгота, десяткові градуси, y – широта, десяткові градуси

Рис. 3. Просторова диференціація температури повітря на території зони Степу України за 1990–2019 рр.: а – середньо вегетаційне значення (T_v , °C); б – середньорічне значення (T_y , °C)



Просторова функція розподілу значень P_v

$$P_v = -4218,089 - 84,729x + 3,475x^2 + 221,238y - 0,875y^2 - 3,219xy, r^2 = 0,78$$
Просторова функція розподілу значень P_y

$$P_y = -7728,96 - 249,927x + 5,848x^2 + 473,386y - 3,429y^2 - 2,985xy, r^2 = 0,85$$
де, x – довгота, десяткові градуси, y – широта, десяткові градуси

Рис. 4. Просторова диференціація опадів (P , мм) на території зони Степу України за 1990–2019 рр.: а – сума вегетаційних опадів (P_v , мм); б – сума річних опадів (P_y , мм)

Використання ланцюгів Маркова дозволяє визначити ймовірність річної інерції кліматичних параметрів на основі даних 1945–2019 рр. Так, ймовірність повторення температури повітря більшої за багаторічну норму склала $P_T = 0,64$, суми атмосферних опадів за рік $P_P = 0,45$. Інерційна ймовірність повторення спекотних (Н) років становить $P_{H1} = 0,58$, спекотних років після холодних $P_{H2} = 0,72$. Таким чином, ймовірність того, що за спекотним роком настане холодний (С) $P_{C1} = 0,48$ і аналогічно ймовірність того, що за одним холодним роком буде холодний рік $P_{C2} = 0,36$. Інерційна можливість повторення вологих (W) років склала $P_{W1} = 0,46$, вологих років після сухих $P_{W2} = 0,43$.

Ймовірність того, що за вологим роком настане сухий (D) $P_{D1} = 0,58$ і аналогічно ймовірність того, що за одним сухим роком буде сухий рік $P_{D2} = 0,62$.

Ймовірність спекотних і дощових періодів у t років дорівнює ймовірності холодних і сухих років відповідно, що повторюються кожні $(t+1)$ років, тобто [25]:

$$P_{S(H;W)} = (1 - p_1)p_1^{t-1} \quad (3)$$

$$P_{S(C;D)} = p_2(1 - p_2)^{t-1}.$$

Отже, ймовірність однорічного ізолюваного спекотного року дорівнює $0,52p_1^{1-1}$, ймовірності трирічного спекотного періоду дорівнює $0,12$,

а п'ятирічного – 0,03. Ймовірність холодних періодів такої самої тривалості дорівнює 0,60, 0,10, 0,02 відповідно. Ймовірність однорічного ізольованого вологого року дорівнює $0,50p_1^{1-1}$, ймовірність трирічного вологого періоду дорівнює 0,12, п'ятирічного – 0,03. Ймовірність сухих періодів такої самої тривалості дорівнює 0,60, 0,13, 0,04 відповідно. Ланцюги Маркова, побудовані на основі метеорологічних даних спостережень, доводять, що спекотні періоди тривалістю в 3-5 років вірогідніші, ніж такі ж холодні періоди, а періоди без дощу тривалістю 3-5 років вірогідніший за періоди з дощем. Це вказує на підвищення середньорічної температури повітря та зниження суми річних опадів у зоні Степу України.

В результаті моделювання динаміки клімату (T – температури повітря, P – атмосферні опади) в зоні Степу (рис. 5) створені прогнозні моделі виду:

$$\hat{T}_{t+n} = \left(\left(\frac{0,15T_t}{S_{t-9}} + 0,85(L_{(t-1)} + Tr_{t-1}) \right) + n(0,1(L_t - L_{t-1}) + 0,9Tr_{t-1}) \right) \cdot \left(0,15 \frac{T_t}{L_t} + 0,85S_{t-9} \right)_{t-9+n} \quad (4)$$

$$\hat{P}_{t+n} = \left(\left(\frac{0,3P_t}{S_{t-11}} + 0,7(L_{(t-1)} + Tr_{t-1}) \right) + n(0,1(L_t - L_{t-1}) + 0,9Tr_{t-1}) \right) \cdot \left(0,1 \frac{P_t}{L_t} + 0,9S_{t-11} \right)_{t-11+n} \quad (5)$$

де L_t – вплив ретроспективних даних формування клімату на прогнозний період $t+n$; Tr_t – відгук трендової складової; S_t – відгук сезонної складової на прогнозний період $t+n$; $n=10$ років.

Похибка моделей для прогнозування кліматичних показників складає: температури повітря – 7%, атмосферні опади – 20%.

Визначено, що при збереженні тенденції формування кліматичних умов, із ймовірністю в 93% буде відбуватися стабільне тренд-циклічне підвищення середньорічного значення температури повітря на $0,06^\circ\text{C}$ в рік і може становити до 2030 року $12,9 \pm 0,2^\circ\text{C}$ (рис. 5а), із ймовірністю 80% прогнозу-

ється тренд-циклічне зменшення суми річних опадів на $62,0\text{мм}$ в рік і до 2030 року може становити $427 \pm 50\text{мм}$ (рис. 5б).

Ретроспективний аналіз та результати прогнозування кліматичних параметрів, підтверджують значні прояви кліматичних змін та асинхронну залежність підвищення температури повітря на зменшення випадань атмосферних опадів. Зокрема, недостатнє зволоження в умовах зони Степу та потреба збільшення врожаїв стимулювали розвиток зрошувального землеробства. Інтенсивне землеробство на зрошуваних землях із використанням застарілої техніки та технології привело до незворотних процесів погіршення їх еколого-меліоративного стану, підтоплення, засолення та осолонцювання, понаднормове зрошення обумовило профільну деградацію ґрунтів, надмірне використання поверхневих водних ресурсів та зміни гідрологічного режиму річок.

Головні висновки. В результаті ретроспективного аналізу та прогнозування встановлені просторово-часові закономірності змін клімату у зоні Степу України. Останні 20 років визначено як найбільш екстремальний період за частотою аномальних кліматичних проявів, які збільшилися у 3 рази (з 23% до 70%). Встановлено, що середньорічна температура повітря в період 1945–2019 рр. збільшилася на $3,5^\circ\text{C}$. Сума річних атмосферних опадів змінювалась в межах 186–778 мм із рівнем варіації 27,2%, в останні 20 років визначено їх зменшення на 40% – до 500–300 мм. З використанням ланцюгів Маркова встановлено ймовірність річної інерції кліматичних параметрів, доведено, що інерційна ймовірність повторення спекотних років оцінена в 0,58, а можливість повторення вологих років в 0,46. Це вказує на циклічне підвищення середньорічної температури повітря та зниження суми річних опадів у зоні Степу

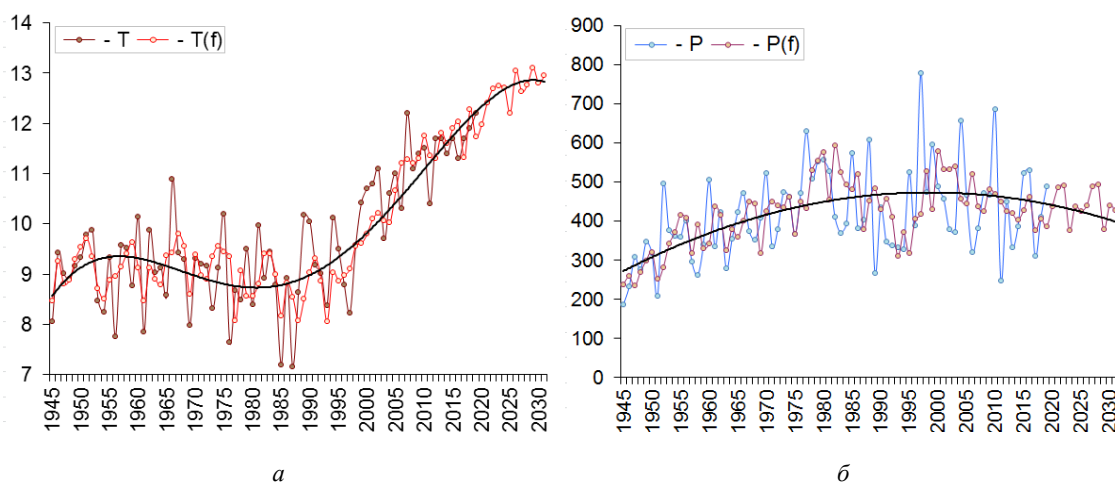


Рис. 5. Динаміка та прогноз кліматичних змін в зоні Степу України до 2030 року:
а – середньорічна температура повітря (фактичні значення, T , $^\circ\text{C}$; розрахункові значення та прогноз, $T(f)$, $^\circ\text{C}$); б – сума річних атмосферних опадів (фактичні значення, P , мм; розрахункові значення та прогноз, $P(f)$, мм)

України. В результаті прогнозування визначено, що при збереженні тенденції формування кліматичних умов, із ймовірністю в 93%, буде відбуватися стабільне тренд-циклічне підвищення середньорічного значення температури повітря на $0,06^{\circ}\text{C}$ в рік і може становити до 2030 року $12,9 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, із ймовірністю 80% прогнозується тренд-циклічне зменшення суми річних опадів на $62,0\text{мм}$ в рік і може становити до 2030 року $427 \pm 50\text{мм}$. Одержані результати під-

тверджують значні кліматичні зміни в зоні Степу України, погіршення умов сільськогосподарського виробництва, зниження урожаю, самовідновлюваної та саморегулюючої функції степових ґрунтів, погіршення гідрологічного режиму ручок. Представлені результати ретроспективного аналізу та прогнозування змін клімату повинні стати основою для розробки та ведення нових адаптивно-кліматичних заходів на різних рівнях господарювання.

Література

1. Wang Q.J., Shao Y., Song Y., Schepen A., Robertson D.E., Ryu D., Pappenberger F. An evaluation of ECMWF SEAS5 seasonal climate forecasts for Australia using a new forecast calibration algorithm. *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 122. 104550. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104550>
2. Felice M.D., Soares M.B., Alessandri A., Troccoli A. Scoping the potential usefulness of seasonal climate forecasts for solar power management. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 142. P. 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.134>
3. Dikshit A., Pradhan B., Alamri A.M. Long lead time drought forecasting using lagged climate variables and a stacked long short-term memory model. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755 (2). 142638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142638>
4. Zhang H., Huo S., Yeager K.M., Li C., Xi B., Zhang J., He Z., Ma C. Apparent relationships between anthropogenic factors and climate change indicators and POPs deposition in a lacustrine system. *Journal of Environmental Sciences*. 2019. Vol. 83. P. 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.024>
5. Christidis N., Stott P.A. The influence of anthropogenic climate change on wet and dry summers in Europe. *Science Bulletin*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.01.020>
6. Paraschiv S., Paraschiv L.S. Trends of carbon dioxide (CO_2) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 237–242. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.116>
7. Sorokhtin O.G., Chilingar G.V., Sorokhtin N.O. Adiabatic Theory of the Greenhouse Effect. *Developments in Earth and Environmental Sciences*. 2011. Vol. 10. P. 469–498. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53757-7.00013-1>
8. Chaudhuri A.H., Gangopadhyay A., Bisagni J.J. Interannual variability of Gulf Stream warm-core rings in response to the North Atlantic Oscillation. *Continental Shelf Research*. 2009. Vol. 29 (7). P. 856–869. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.01.008>
9. Weiser J., Titschack J., Kienast M., McCave I.N., Lochte A.A., Saini J., Stein R., Hebbeln D. Atlantic water inflow to Labrador Sea and its interaction with ice sheet dynamics during the Holocene. *Quaternary Science Reviews*. 2021. Vol. 256. 106833. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106833>
10. Lisetskii F., Chepelev O. Quantitative substantiation of pedogenesis model key components. *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8(4). P. 996–1000.
11. Lisetskii F., Pichura V. Steppe Ecosystem Functioning of East European Plain under Age-Long Climatic Change Influence. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9(18). P. 1–9. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i18/93780
12. Dudiak N.V., Potravka L.A., Stroganov A.A. Soil and climatic bonitation of agricultural lands of the steppe zone of Ukraine. *Indian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 46(3). P. 534–540.
13. Pichura V.I., Malchykova D.S., Ukrainskij P.A., Shakhman I.A., Bystrantseva A.N. Anthropogenic transformation of hydrological regime of the Dnieper river. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45(3). P. 445–453.
14. Pichura V.I., Potravka L.A., Skrypchuk P.M., Strachuk N.V. Anthropogenic and climatic causality of changes in the hydrological regime of the Dnieper river. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21 (4). P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/119521>
15. Oti J.O., Kabo-Bah A.T., Ofosu E. Hydrologic response to climate change in the Densu River Basin in Ghana. *Heliyon*. 2020. Vol. 6(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04722>
16. Lisetskii F. Rivers in the focus of natural-anthropogenic situations at catchments. *Geosciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11(2). P. 1–6.
17. Assan E., Suvedi M., Olabisi L.S., Bansah K.J. Climate change perceptions and challenges to adaptation among smallholder farmers in semi-arid Ghana: A gender analysis. *Journal of Arid Environments*. 2020. Vol. 182. 104247. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104247>
18. Ukrainskiy P., Terekhin E., Gusarov A., Lisetskii F., Zelenskaya E. The influence of relief on the density of light-forest trees within the small-dry-valley network of uplands in the forest-steppe zone of eastern Europe. *Geosciences (Switzerland)*. 2020. Vol. 10(11). P. 1–18.
19. Breus D., Yevtushenko O., Skok S., Rutta O. Retrospective studies of soil fertility change on the example of the Kherson region (Ukraine). International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2019. Vol. 19(5.1). P. 645–652.
20. Dudiak N.V., Pichura V.I., Potravka L.A., Strachuk N.V. Geomodelling of destruction of soils of Ukrainian steppe due to water erosion. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. Vol. 20(8). P. 192–198. <https://doi.org/10.12911/22998993/110789>
21. Dudiak N.V., Pichura V.I., Potravka L.A., Stroganov A.A. Spatial modeling of the effects of deflation destruction of the steppe soils of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21(2). P. 166–177. <https://doi.org/10.12911/22998993/116321>
22. Domaratskiy E.O., Bazaliy V.V., Domaratskiy O.O., Dobrovolskiy A.V., Kyrychenko N.V., Kozlova O.P. Influence of mineral nutrition and combined growth regulating chemical on nutrient status of sunflower. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45(1). P. 126–129.

-
23. Domaratskiy Ye., Bazaliy V., Dobrovol'skiy A., Pichura V., Kozlova O. 2022. Influence of Eco-Safe Growth-Regulating Substances on the Phytosanitary State of Agrocenoses of Wheat Varieties of Various Types of Development in Non-Irrigated Conditions of the Steppe Zone. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23(8). P. 299–308.
 24. Ivanov I.V., Lisetskiy F.N. Correlation of soil formation rhythms with periodicity of solar activity over the last 5000 years. Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. *Earth science sections*. 1996. Vol. 340(1). P. 189–194.
 25. Sumner G. Mathematics of Physical Geographers. Moscow: Progress, 1981. 297 p.
 26. Anderson T. Statistical analysis of time series. Moscow: Nauka, 1976. 343 p.
 27. The system of servicing hydrometeorological information of CliWare. URL: <http://cliware.meteo.ru/meteo/index.html>