

УДК 551.509.313:632.111:633/635

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.150.17>

МЕТОДИКА І ЕМПІРИЧНА ПЕРЕВІРКА МІЖДЖЕРЕЛЬНОЇ УЗГОДЖЕНОСТІ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДАНИХ

Панфілова А.В. – д.с.-г.н., професор,

завідувач кафедри рослинництва та садово-паркового господарства,

Миколаївський національний аграрний університет

orcid.org/0000-0003-0006-4090

Кошкін Д.Л. – к.т.н., доцент,

директор навчально-наукового механіко-технологічного інституту,

Миколаївський національний аграрний університет

orcid.org/0000-0002-6927-8487

Мета дослідження – кількісно оцінити узгодженість трьох поширених продуктів (ERA5-Land, NASA POWER, Open-Meteo) для температури повітря, температури точки роси, опадів і похідних вологісних показників, а також визначити агрономічні наслідки міжджерельних розбіжностей. Емпіричну основу становлять погодинні ряди за 2024–2025 рр. Застосовано синхронізацію часових рядів, попарні статистичні порівняння (Bias, RMSE, rRMSE, R²) та аналіз похибкового каскаду під час переходу від первинних метеозмінних до відносної вологості повітря, абсолютної вологості, дефіциту тиску водяної пари та суми ефективних температур.

Показано наявність стійкої ієрархії міжджерельної узгодженості агрометеорологічних параметрів: найвищі показники узгодженості характерні для температури повітря, проміжні – для температури точки роси, тоді як для опадів встановлено суттєво нижчий рівень узгодженості. В узагальненому вигляді діапазони узгодженості становлять близько 0,93–0,99 для температурних показників і близько 0,33–0,62 для опадів без деталізації за окремими парами джерел. Також підтверджено каскадне підсилення відносної похибки у дефіциту тиску водяної пари порівняно з відотною вологістю повітря, що узгоджується з термодинамічною чутливістю дефіциту тиску водяної пари до температурних змінень. Порівняння вологісних метрик вказує на краю міжджерельну стабільність абсолютних показників вологості відносно відносних, що важливо для прикладних розрахунків водного стресу.

Одержані результати підтверджують робочі гіпотези щодо температурного походження міжджерельних похибок і формують практичну основу для вибору метеорологічного джерела даних залежно від задачі: оперативний моніторинг посушливих умов, оцінка ризиків теплового і водного стресу, а також управління технологіями вирощування сільськогосподарських культур. У цілому встановлено, що міжджерельні температурні відмінності можуть накопичуватися впродовж року та зумовлювати агрономічно значущі зсуви у календарі розвитку культур, які доцільно враховувати для прийняття управлінських рішень.

Ключові слова: агрометеорологічні дані, глобальні метеорологічні продукти, міжджерельна узгодженість.

Panfilova A.V., Koshkin D.L. Methodology and empirical verification of inter-source consistency of agrometeorological data

The study presents an inter-source empirical verification of agroclimatic data for the Southern Steppe of Ukraine using a representative location within the Mykolaiv region. The aim of the research is to quantitatively assess the consistency of three widely used meteorological products (ERA5-Land, NASA POWER, and Open-Meteo) for air temperature, dew point temperature, precipitation, and derived humidity-related parameters, as well as to determine the



© Панфілова А.В., Кошкін Д.Л., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

agronomic implications of inter-source discrepancies. The study was based on hourly datasets for 2024–2025. The analysis included time-series synchronization, pairwise statistical comparisons (Bias, RMSE, rRMSE, and R^2), and evaluation of the error cascade associated with the transition from primary meteorological variables to relative humidity, absolute humidity, vapor pressure deficit (VPD), and growing degree-days (GDD).

A stable hierarchy of inter-source consistency among agroclimatic parameters was identified: the highest agreement was observed for air temperature, intermediate agreement for dew point temperature, and substantially lower agreement for precipitation. In generalized form, consistency levels ranged from approximately 0.93–0.99 for temperature-related variables and 0.33–0.62 for precipitation, without detailed separation by individual source pairs. The study also confirmed a cascade amplification of relative errors in VPD compared with relative humidity, which is consistent with the thermodynamic sensitivity of VPD to temperature biases. Comparisons of humidity-related metrics demonstrated higher inter-source stability for absolute humidity indicators than for relative humidity, which is important for practical assessments of crop water stress.

The obtained results empirically confirm the working hypotheses regarding the temperature-related nature of inter-source discrepancies and provide a practical basis for selecting meteorological data sources depending on the intended application, including operational drought monitoring, assessment of thermal and water stress risks, and management of crop production technologies. Overall, the study demonstrates that inter-source temperature differences may accumulate throughout the year and lead to agronomically significant shifts in crop development timing, which should be considered in agricultural decision-making processes.

Key words: *agroclimatic data, global meteorological products, inter-source consistency.*

Актуальність тематики дослідження. Зростаюча залежність сучасного сільськогосподарства від цифрових агрометеорологічних сервісів зумовлює потребу у надійних джерелах кліматичних даних для оптимізації управління технологіями вирощування сільськогосподарських культур, розподілу ресурсів та зменшення впливу кліматичних ризиків. У сучасних агрокліматичних дослідженнях широко використовуються глобальні метеорологічні продукти ERA5-Land, NASA POWER та Open-Meteo, які відрізняються просторовою роздільністю, методами формування та рівнем узгодженості даних [1, 2, 3]. У попередніх дослідженнях авторів теоретично обґрунтовано каскадне підсилення похибок при переході від температури повітря до дефіциту тиску водяної пари як наслідок нелінійності функції Тетенса, а також кумулятивний механізм накопичення похибок у сумах ефективних температур [4]. Однак ці положення потребують емпіричної перевірки на реальних часових рядах.

Проблема міжджерельної узгодженості є особливо критичною для похідних параметрів, таких як відносна вологість повітря, абсолютна вологість, дефіцит тиску водяної пари та сума ефективних температур. Ці параметри широко використовуються у задачах оцінки водного режиму, стресу та настання фаз росту і розвитку культур [5, 6, 7]. Найбільші розбіжності характерні для вологісних параметрів та опадів. Аналогічні відмінності раніше відзначалися як для глобальних мультиспутникових продуктів опадів, так і для продуктів NASA POWER та ERA5 при їх порівнянні з наземними спостереженнями [8, 9, 10].

Південний Степ України є важливим регіоном для такого дослідження через високу агрокліматичну значущість, різноманітність метеорологічних умов та значну роль в зерновиробництві. Метою дослідження є емпірична верифікація міжджерельної узгодженості продуктів ERA5-Land, NASA POWER та Open-Meteo у похідних агрометеорологічних параметрах для умов Південного Степу України. Завданням дослідження було встановити ієрархію узгодженості між метеорологічними продуктами для первинних параметрів – температури повітря (2 м), температури точки роси та опадів – і перевірити гіпотезу про послідовне зниження

узгодженості у ряду «температура повітря → температура точки роси → опади». Окрему увагу приділено емпіричній верифікації термодинамічної природи розбіжностей між абсолютними та відносними показниками вологості повітря, а також оцінці каскадного підсилення похибок під час переходу від показників вологості до дефіциту тиску водяної пари. Крім того, кількісно оцінено кумулятивний ефект міжджерельних температурних відмінностей у сумах ефективних температур та їх трансляцію у часовий зсув під час визначення фаз росту і розвитку сільськогосподарських культур Південного Степу України.

Матеріалитаметодика. Аналіз виконано для репрезентативної точки «Навчально-науково-практичний центр Миколаївського національного аграрного університету», яка розташована в умовах Південного Степу України (46,9364 пн.ш., 31,6514 сх.д.) за період 01.01.2024 р. – 31.12.2025 р. Масив порівняння склав $n = 17\,544$ погодинних значень для температури повітря і температури точки роси та $n = 731$ добових сум опадів.

Завантаження даних виконано через стандартні API-інтерфейси: Copernicus CDS API (ERA5-Land), NASA POWER API та Open-Meteo Historical Weather API [1, 2, 3]. Для всіх джерел застосовано єдиний часовий стандарт UTC. Гармонізація включала синхронізацію часових міток, уніфікацію одиниць вимірювання та перевірку повноти рядів; після синхронізації пропуски у спільному часовому перетині були відсутні. Для ERA5-Land виконано перехід від температури у К до °C та перетворення накопичених опадів у інкрементні значення. Для NASA POWER використано готові погодинні температурні змінні та добові суми опадів, а для Open-Meteo – погодинні температурні та вологісні ряди з подальшою добовою агрегацією опадів. Додаткове фільтрування аномальних значень не застосовувалось.

Похідні показники відносної вологості (f), абсолютної вологості (ρ_v), дефіциту тиску водяної пари (d) та суми ефективних температур (Σt_{ef}) обчислювалися за уніфікованою схемою з первинних змінних t і t_d . Зокрема, дефіцит тиску водяної пари визначався як

$$d = E(t) - e_a(t_d)$$

де $E(t)$ – тиск насиченої водяної пари за температури повітря t , кПа;

$e_a(t_d)$ – фактичний тиск водяної пари, кПа, відновлений із температури точки роси t_d .

Суми ефективних температур визначалися за класичною однопороговою схемою [11].

$$\Sigma t_{\text{ef}} = \sum_{j=1}^N \max(\bar{t}_j - T_B; 0),$$

де $\bar{t}_j$ – середня добова температура повітря, T_B – базова температура культури, N – кількість діб у періоді розрахунку.

У верифікації використано кілька культурно-специфічних порогів: $T_B = 0^\circ\text{C}$ (пшениця озима), 5°C (ячмінь ярий), 10°C (кукурудза) [7, 12]. Для прикладної агрономічної інтерпретації доцільно обмежити період накопичення Σt_{ef} фактичним вегетаційним періодом культури, однак у межах даного дослідження обрано річний інтервал як універсальну основу для міжджерельного порівняння.

Міжджерельну узгодженість оцінювали за стандартними статистичними показниками: системне зміщення (Bias), середня абсолютна похибка (MAE), середньоквадратична похибка (RMSE), відносна середньоквадратична похибка (rRMSE)

та коефіцієнт детермінації (R^2) для всіх парних комбінацій досліджуваних джерел. Під час аналізу враховували напрямок системного зміщення між джерелами, а rRMSE нормували відносно середнього модульного значення референсного ряду у спільному часовому перетині. Для кожної пари джерел знак Bias інтерпретували як різницю між першим і другим джерелом у парі. Обробку даних та статистичний аналіз виконано в середовищі Python~3.11 із використанням бібліотек pandas, numpy та scikit-learn; графічну візуалізацію реалізовано засобами matplotlib.

Результати досліджень. Аналіз міжджерельної узгодженості показав чітку ієрархію стабільності первинних та похідних агрометеорологічних параметрів. Узагальнені метрики для температури повітря (2 м), температури точки роси, відносної та абсолютної вологості повітря, дефіциту тиску водяної пари й опадів наведено в таблиці 1.

Ієрархія узгодженості $t > t_d \gg P$. За первинними змінними встановлено діапазони R^2 для температури повітря 0,964–0,990 та для температури точки роси 0,929–0,971. Для опадів міжджерельна узгодженість є суттєво нижчою: $R^2 = 0,329–0,621$ при RMSE 2,07–3,31 мм/добу.

Таблиця 1

Зведені метрики міжджерельної узгодженості для t, t_d, f, ρ_v, d (погодинний крок, $n = 17\,544$) та P (добовий крок, $n = 731$)

Параметр	Пара джерел	Bias	MAE	RMSE	R^2	rRMSE (%)
$t, ^\circ\text{C}$	ERA5–OM	–0,18	0,78	1,03	0,990	7,8
	OM–NASA	–0,22	1,70	2,15	0,964	16,6
	NASA–ERA5	+0,40	1,53	1,92	0,973	15,1
$t_d, ^\circ\text{C}$	ERA5–OM	–0,08	0,88	1,21	0,971	19,7
	OM–NASA	–0,18	1,45	1,89	0,929	31,2
	NASA–ERA5	+0,26	1,37	1,77	0,938	30,0
$f, \%$	ERA5–OM	+0,47	4,60	6,32	0,912	9,4
	OM–NASA	+1,28	8,87	11,55	0,761	17,1
	NASA–ERA5	–1,75	8,34	10,8	0,794	15,6
$\rho_v, \text{г/м}^3$	ERA5–OM	–0,002	0,046	0,068	0,957	8,8
	OM–NASA	–0,011	0,076	0,108	0,895	13,9
	NASA–ERA5	+0,014	0,072	0,101	0,908	13,2
$d, \text{кПа}$	ERA5–OM	–0,020	0,110	0,179	0,961	23,4
	OM–NASA	+0,045	0,221	0,347	0,886	46,7
	NASA–ERA5	–0,026	0,200	0,309	0,910	39,1
$P, \text{мм/добу}$	ERA5–OM	+0,14	0,70	2,07	0,621	199,8
	OM–NASA	–0,04	0,85	3,31	0,329	281,7
	NASA–ERA5	–0,10	0,64	2,71	0,508	237,4

Порівняння пар джерел показало, що для температури повітря мінімальне значення RMSE зафіксоване для пари ERA5–OM ($1,03^\circ\text{C}$), тоді як для пар із NASA POWER RMSE підвищується до $1,92–2,15^\circ\text{C}$. Для температури точки роси картина аналогічна: ERA5–OM має найменшу похибку ($1,21^\circ\text{C}$), а комбінації з NASA POWER – вищі значення ($1,77–1,89^\circ\text{C}$). За rRMSE ієрархія також стабільна: 7,8–16,6 % для t проти 19,7–31,2 % для t_d .

Графічне міжджерельне порівняння погодинних значень температури повітря (a–в) та температури точки роси (z–e) для ERA5–Land, NASA POWER та

Open-Meteo наведено на рисунку 1. Аналіз показує високу щільність точок уздовж лінії 1:1 для пар, що включають ERA5-Land та Open-Meteo, тоді як для комбінацій із NASA POWER спостерігається виразніше системне зміщення, що узгоджується з оцінками Bias і RMSE у таблиці 1.

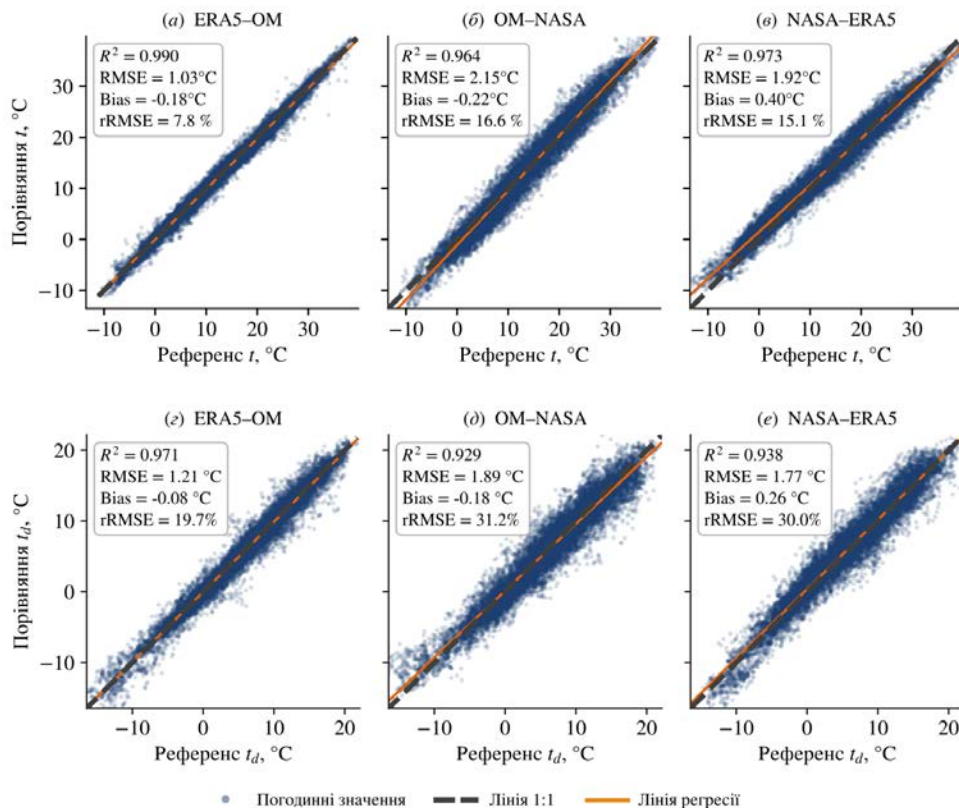


Рис. 1. Діаграми розсіювання погодинних значень температури повітря t (а-в) та температури точки роси t_d (г-е) для парних порівнянь ERA5-Land, Open-Meteo і NASA POWER у дослідній точці, 2024–2025 рр.

Міжджерельну узгодженість опадів оцінювали на добовому масштабі ($\text{мм} \cdot \text{доб}^{-1}$). На відміну від температурних змінних, для опадів характерна нижча синхронізація окремих подій: значення R^2 у межах 0,329–0,621 (табл. 1) вказують на суттєву залежність результатів від вибору джерела навіть за близьких річних сум.

Використання відносних метрик (зокрема rRMSE) для цієї змінної має обмежену інформативність, оскільки через високу частку нульових значень і низькі середні добові суми навіть помірні абсолютні розбіжності можуть призводити до штучного завищення відносних похибок. У зв'язку з цим стандартні метрики узгодженості для опадів доцільно інтерпретувати обережно. Тому, аналіз опадів додатково доповнено кумулятивною оцінкою (накопичені суми) та кореляційним аналізом часових рядів, представлених на рисунку 2. Такий підхід дає змогу окремо оцінити вплив інтенсивності подій та їх часової структури на міжджерельну узгодженість.

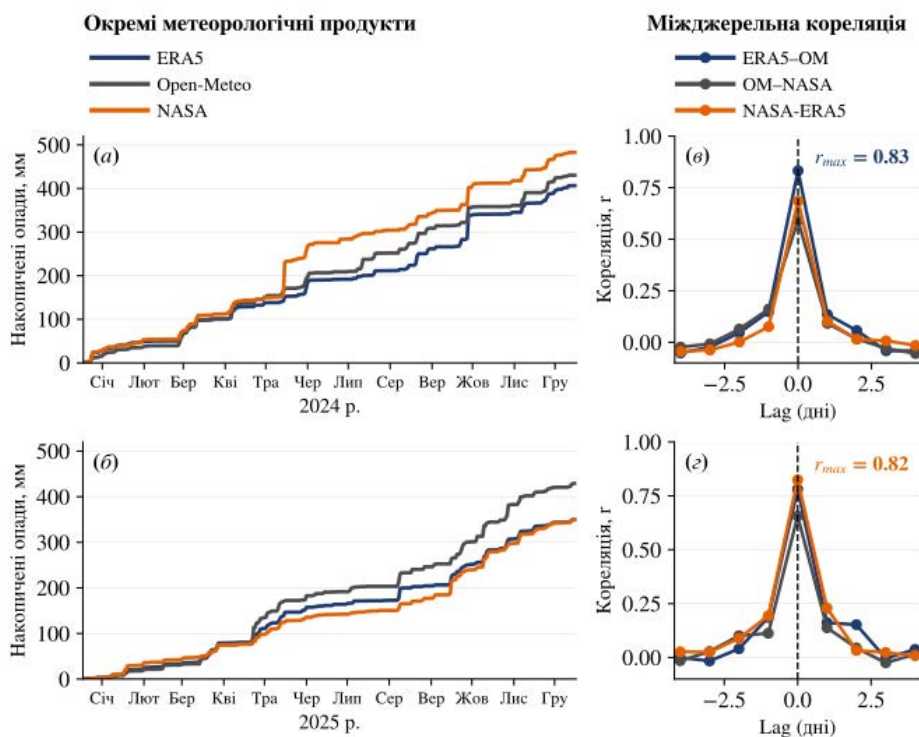


Рис. 2. Кумулятивна оцінка (а, б) та кореляційний аналіз (в, г) часових рядів добових сум опадів джерел ERA5-Land, Open-Meteo і NASA POWER у дослідній точці, 2024–2025 рр.

Аналіз рисунка 2 показує, що всі три продукти загалом відтворюють сезонну структуру опадів, однак амплітуда пікових подій та їх добова локалізація відрізняються між джерелами. Під час інтенсивних епізодів найбільші відмінності спостерігаються між NASA POWER та парою ERA5-Land/Open-Meteo, що узгоджується з нижчими значеннями R^2 для опадів. Отримані результати підтверджують ієрархію узгодженості $t > t_d \gg P$ для всіх проаналізованих пар.

Температурне походження вологісних розбіжностей. Для всіх пар джерел $R^2(\rho_v) > R^2(f)$, а різниця $\Delta R^2 = R^2(\rho_v) - R^2(f)$ становить 0,04–0,13 (табл. 1), що свідчить про вищу узгодженість абсолютної вологості порівняно з відносною та підтверджує визначальний вплив температури на розбіжності f .

Додатково встановлено, що у даних NASA POWER близько 5 % погодинних значень f перевищують 100 %, тоді як для ERA5-Land та Open-Meteo такі випадки практично відсутні (рис. 3, а-в). Ймовірним поясненням є неузгодженість полів t і t_d у продуктах на основі MERRA-2, що може призводити до умов $t_d > t$; це розглядається як робоча гіпотеза, яка потребує окремої верифікації [2]. Значення $f > 100\%$ не обрізалися до фізичної межі, оскільки вони містять діагностично важливу інформацію про якість вхідних даних; відповідно від'ємні значення d інтерпретуються як умови перенасичення. Порівняння погодинних значень d (рис. 3, з-е) демонструє нижчу міжджерельну узгодженість порівняно з t і t_d , що зумовлено нелінійною залежністю d від температури повітря.

Каскад помилки $f \rightarrow d$. Для d отримано $R^2 = 0,886 - 0,961$ при RMSE 0,179–0,347 кПа; найвища узгодженість зафіксована для пари ERA5–OM, тоді як найбільші розбіжності характерні для OM–NASA. Порівняно з f , відносні похибки d є суттєво вищими. Для кількісної оцінки каскадного підсилення використано співвідношення:

$$K_{f \rightarrow d} = \frac{\text{rRMSE}(d)}{\text{rRMSE}(f)}.$$

Отримані значення коефіцієнта підсилення становлять 2,49 (ERA5–OM), 2,73 (OM–NASA) та 2,51 (NASA–ERA5), що формує стабільний інтервал і узгоджується з теоретично визначеним у попередніх дослідженнях авторів діапазоном ($K = 2,22 - 2,86$). Це підтверджує, що навіть помірні міжджерельні відмінності у f призводять до суттєво більшої невизначеності похідного показника d .

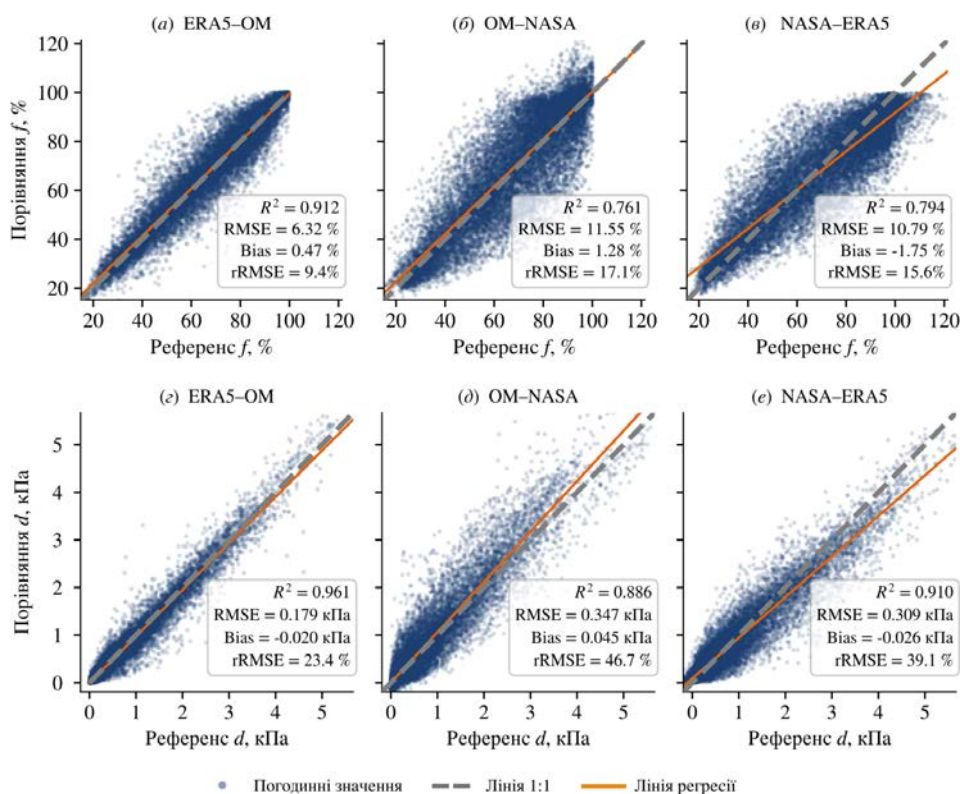


Рис. 3. Діаграми розсіювання погодинних значень відносної вологості f (а–в) та дефіциту тиску водяної пари d (г–е) для парних порівнянь ERA5–Land, Open-Meteo і NASA POWER у дослідній точці, 2024–2025 рр.

Узагальнений аналіз метрик узгодженості показав послідовне зростання міжджерельних розбіжностей у ряду t , t_p , f та d . Найменші значення rRMSE та найвища узгодженість R^2 характерні для температури повітря, тоді як максимальні

розбіжності спостерігаються для d , що підтверджує нелінійне підсилення похибок при переході від первинних до похідних агрометеорологічних параметрів.

Міжджерельні розбіжності у сезонному накопиченні. Розбіжності сум ефективних температур для базових порогів $T_B = 0; 5 \text{ і } 10^\circ\text{C}$ становлять $2,8\text{--}146,9^\circ\text{C}\cdot\text{днів}$ (табл. 1), де наведено повний діапазон значень окремо для 2024 та 2025 років і пар джерел (ERA5–OM, ERA5–NASA, OM–NASA). Величина відхилень суттєво залежить від конкретної комбінації «рік–пара джерел». Найбільше розходження ($146,9^\circ\text{C}\cdot\text{днів}$) зафіксовано для $T_B = 0^\circ\text{C}$ у парі ERA5–NASA у 2024 р., тоді як для $T_B = 10^\circ\text{C}$ максимум ($145,8^\circ\text{C}\cdot\text{днів}$) спостерігається для пари OM–NASA у 2025 р.

Таблиця 2

Міжджерельні розбіжності суми ефективних температур для різних порогів температури, $^\circ\text{C}\cdot\text{днів}$

Культура (T_B)	Рік	ERA5–OM	ERA5–NASA	OM–NASA
Пшениця озима (0°C)	2024	39,8	146,9	107,1
	2025	87,6	60,7	26,9
Ячмінь ярий (5°C)	2024	36,9	53,5	16,6
	2025	87,0	2,8	84,2
Кукурудза (10°C)	2024	41,6	11,7	29,9
	2025	93,2	52,6	145,8

Примітка: наведено модуль розбіжностей $|\Delta\Sigma t_{\text{ef}}|$, оскільки знак залежить від напрямку порівняння джерел.

Для орієнтовного переведення температурних розбіжностей у часовий еквівалент використано лінійне наближення $\Delta\tau = \Delta\Sigma t_{\text{ef}} / T_{\text{ef,сеп}}$, де $T_{\text{ef,сеп}}$ – середньодобова ефективна температура активного вегетаційного періоду. У розрахунках прийнято $T_{\text{ef,сеп}} \approx 20^\circ\text{C}$, як характерне значення для липня–серпня в умовах Південного Степу України. Отриманий діапазон міжджерельних розбіжностей $|\Delta\Sigma t_{\text{ef}}| = 2,8\text{--}146,9^\circ\text{C}\cdot\text{днів}$ відповідає орієнтовному часовому зсуву $0,1\text{--}7,3$ доби. Наведена оцінка має наближений характер, оскільки базується на припущенні про сталу швидкість накопичення Σt_{ef} упродовж року.

Для верифікації аналітичної оцінки визначено дати досягнення контрольного рівня $\Sigma t_{\text{ef}} = 1000^\circ\text{C}\cdot\text{днів}$ (репрезентативного для завершення вегетації ранніх зернових за $T_B = 5^\circ\text{C}$) для трьох джерел даних. Фактичні зсуви між джерелами склали 1–6 днів, що узгоджується з аналітичною оцінкою та підтверджує кумулятивний ефект температурних розбіжностей. Зважаючи на обмежений часовий інтервал дослідження (2024–2025 рр.), отримані значення слід розглядати як попередні кількісні орієнтири, що потребують перевірки на довших рядах спостережень.

Встановлений сезонний діапазон $\Delta\Sigma t_{\text{ef}}$ має безпосередні практичні наслідки для умов Південного Степу України, оскільки трансформується у зсув фенологічних фаз на приблизно 1–6 днів. Такі відхилення є критичними для планування агротехнічних заходів (підживлення, фунгіцидні обробки, міжрядний обробіток, поливи тощо). Навіть зміщення на 1–3 дні може змінювати ефективність технологічного вікна, тоді як відхилення на 4–6 днів створюють ризик передчасного або запізненого виконання операцій [7, 11, 12].

Перспективи подальших досліджень. Подальший розвиток дослідження доцільно спрямувати на чотири взаємодоповнювальні напрями. Насамперед, потрібне просторове розширення вибірки на мережу репрезентативних точок

у різних кліматичних зонах України для оцінки стійкості встановлених міжджерельних співвідношень поза межами умов Південного Степу. Критично важливою є також незалежна верифікація отриманих оцінок за наземними даними автоматичних метеостанцій, що дасть змогу перейти від відносної міжджерельної узгодженості до оцінки абсолютної точності. Окремий прикладний пріоритет пов'язаний із включенням швидкості вітру та сонячної радіації для повного розрахунку ET_0 за FAO-56 Penman–Monteith і кількісного аналізу впливу міжджерельних розбіжностей на оцінку поливної норми. Завершальним напрямом може бути розробка та валідація процедур корекції системного зміщення для NASA POWER на коротких локальних рядах із подальшою перевіркою їх операційної придатності в агрометеорологічних задачах.

Висновки. На погодинних рядах за 2024–2025 рр. ($n=17544$) для репрезентативної точки «Навчально-науково-практичний центр Миколаївського національного аграрного університету», яка розташована в умовах Південного Степу України, підтверджено ієрархію міжджерельної узгодженості: t ($R^2=0,964-0,990$) $>$ t_d ($R^2=0,929-0,971$) $\gg$ P ($R^2=0,329-0,621$ на добовому рівні). Температурне походження вологісних розбіжностей підтверджено стабільно додатною різницею $\Delta R^2=0,04-0,13$, що обґрунтовує доцільність використання абсолютних показників вологості для міжджерельних порівнянь. Каскадне підсилення похибок кількісно зафіксовано на рівні $K=2,5-2,7$ для переходу $f \rightarrow d$. Наявність у NASA POWER значень $f > 100\%$ розглядається як потенційно проблемна ознака, що потребує локальної валідації цього продукту перед оперативним застосуванням у задачах d-стресу. Кумулятивна міжджерельна розбіжність $\Sigma t_{\text{эф}}$ у повному діапазоні даних становить $2,8-146,9$ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{днів/рік}$. Для контрольного порогу 1000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{днів}$ фактичний зсув дат між джерелами становить 1–6 діб, що має практичне значення для планування польових робіт. Для прикладних агротехнологічних задач у межах дослідженої вибірки ERA5-Land є найпридатнішим джерелом для погодинних розрахунків d і $\Sigma t_{\text{эф}}$. Open-Meteo може розглядатися як прийнятна альтернатива для температурно-орієнтованих оцінок, тоді як використання NASA POWER для вологісних параметрів потребує попередньої корекції даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*. 2022. 13 (9). P. 4349–83. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
2. Rodrigues Goncalo C., Ricardo I., Braga P. Evaluation of NASA POWER Reanalysis Products to Estimate Daily Weather Variables in a Hot Summer Mediterranean Climate. *Agronomy*. 2021. 11 (6). P. 1207. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061207>.
3. Open-Meteo Contributors. 2026. *Open-Meteo Weather API*. GitHub repository: <https://github.com/open-meteo/open-meteo>.
4. Панфілова А. В., Кошкін Д. Л. Методологія вибору глобальних метеорологічних продуктів для агрометеорологічного забезпечення рослинництва. Таврійський науковий вісник. 2026. Вип. 148. Ч. 3. С. 28–37.
5. Allen Richard G., Luis S Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage. 1998. Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
6. Novick K.A., Ficklin D.L., Grossiord C., Konings A.G., Martínez-Vilalta J., Sadok W. The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed

ecosystems. *Plant, Cell & Environment*. 2024. 47. 3561–3589. <https://doi.org/10.1111/pce.14846>.

7. Rezaei E.E., Webber H., Asseng S. Climate change impacts on crop yields. *Nat Rev Earth Environ*. 2023. 4. 831–846. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0>.

8. Huffman G. J., Adler R. F., Morrissey M. M. Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations». *Journal of Hydrometeorology*. 2001. 2. 36–50. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0036:GPAODD>2.0.CO](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO).

9. Mutlu A. Comparative evaluation of NASA, ERA5, and observational data for accuracy and reliability. *Theoretical and Applied Climatology*. 2025. 156. 367. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05605-w>.

10. Aboelkhair Mohamed E., Ahmed A. Abd-Elwahed, Mohamed A Abd-Elwahed. Evaluation of NASA POWER reanalysis products for agroclimatic applications in Egypt. *Atmospheric Research*. 2019. 220. 1–12.

11. Makouate Helene Fotouo, Manuela Zude-Sasse. Advances in Growing Degree Days Models for Flowering to Harvest: Optimizing Crop Management with Methods of Precision Horticulture—A Review. *Horticulturae*. 2025. 11 (12). 1415. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11121415>.

12. Siebert Stefan, Frank Ewert, Ehsan Eyshi Rezaei, Henning Kage, Rikard Graß. Impact of heat stress on crop yield—on the importance of considering canopy temperature. *Environmental Research Letters*. 2014. 9 (4). 044012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044012>.

Дата першого надходження статті до видання: 26.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.08.2026