

УДК 551.509.313:632.111:633/635

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.3.4>

## МЕТОДОЛОГІЯ ВИБОРУ ГЛОБАЛЬНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПРОДУКТІВ ДЛЯ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОСЛИННИЦТВА

**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](https://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](https://orcid.org/0000-0002-6927-8487)

У статті досліджено проблему вибору та використання глобальних метеорологічних продуктів у системі агрометеорологічного забезпечення рослинництва в умовах обмеженої доступності наземних спостережень і зростання ролі відкритих джерел даних. Запропоновано методологічну рамку, що забезпечує фізично узгоджений підхід до використання метеорологічної інформації та включає систематизацію джерел, формалізацію каскаду поширення похибок і алгоритм вибору джерела для конкретних задач.

Виконано систематизацію 15 джерел метеорологічних даних за функціональним призначенням і дев'ятьма аналітичними критеріями з виділенням п'яти типів: наземні спостереження, глобальні реаналізи, агрокліматичні сервіси, супутникові продукти та API-агрегатори. Для коректного міжджерельного порівняння використано єдину систему термодинамічних співвідношень (FAO-56, формула Тетенса), що описує перехід від температури повітря і температури точки роси до похідних показників – відносної вологості, дефіциту тиску водяної пари та суми ефективних температур. На основі аналітичної лінеаризації досліджено каскад поширення похибок від первинних змінних до похідних показників. Отримано вираз для коефіцієнта підсилення відносної похибки для пари «температура – дефіцит тиску водяної пари». За типових літніх умов Південного Степу України значення коефіцієнта 2,22–2,86 свідчить про високу чутливість похідного параметра до температурних змін. Показано, що навіть незначні систематичні відхилення температури можуть призводити до агрономічно значущих змін суми ефективних температур і, відповідно, зміщення прогнозованих строків настання фаз росту і розвитку культур. Доведено, що жодне джерело метеорологічних даних не є універсально оптимальним, що зумовлює задачо-орієнтований підхід до його вибору. Розроблено алгоритм вибору метеорологічного продукту, ключовою особливістю якого є обов'язковий перерахунок похідних параметрів із первинних змінних.

**Ключові слова:** агрометеорологічне забезпечення, глобальні метеорологічні продукти, дефіцит тиску водяної пари, сума ефективних температур, каскад похибок.

### **Panfilova A.V., Koshkin D.L. Methodology for the Selection of Global Meteorological Products in Agrometeorological Support of Crop Production**

This study addresses the problem of selecting and applying global meteorological datasets for agro-meteorological support of crop production under conditions of limited availability of ground-based observations and the increasing reliance on open-access data. A methodological framework is proposed to ensure a physically consistent use of meteorological data, including the classification of data sources, formalization of error propagation, and a decision-support algorithm for dataset selection tailored to specific agro-meteorological applications.

A total of 15 meteorological datasets were classified according to their functional



© Панфілова А.В., Кошкін Д.Л., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

*characteristics and nine analytical criteria, resulting in five categories: in situ observations, global reanalysis products, agroclimatic services, satellite-based products, and API-based aggregators. To ensure consistency in inter-dataset comparison, a unified thermodynamic framework (FAO-56 and the Tetens equation) was applied to derive key agroclimatic variables from primary inputs (air temperature and dew point temperature), including relative humidity, vapor pressure deficit (VPD), and growing degree days (GDD). The propagation of uncertainties from primary variables to derived indicators was analyzed using analytical linearization, and an explicit expression for the error amplification factor for the “temperature–VPD” relationship was obtained. The amplification factor ranges from 2.22 to 2.86 under typical summer conditions of the Southern Steppe zone of Ukraine, indicating a strong sensitivity of VPD to temperature biases. It is shown that even small systematic temperature errors can result in agronomically significant deviations in GDD and, consequently, shifts in the predicted timing of crop phenological stages. The results demonstrate that no single dataset is universally optimal across all evaluation criteria, supporting a task-specific approach to dataset selection. An algorithm for selecting a meteorological product has been developed, the key feature of which is the mandatory recalculation of derived parameters from the primary variables.*

**Key words:** agrometeorological support, global meteorological products, vapor pressure deficit (VPD), growing degree days (GDD), error propagation.

**Актуальність теми дослідження.** Агrometeorологічне забезпечення рослинництва в Україні традиційно базується на мережі метеорологічних станцій Українського гідрометеорологічного центру. Наземні спостереження, які координуються Укргідрометцентром, залишаються еталонним джерелом. Водночас щільність мережі є нерівномірною, а з 2022 року частина станцій зазнала руйнувань або функціонує з перебоями, внаслідок чого глобальні продукти дедалі частіше стають основним, а не допоміжним джерелом метеоданих для наукових установ та агровиробників.

Останнє десятиліття характеризується стрімким зростанням доступності глобальних метеорологічних продуктів – реаналізів (ERA5-Land, MERRA-2), спеціалізованих сервісів (NASA POWER), API-агрегаторів (Open-Meteo) та супутникових даних (CHIRPS, MODIS LST) [1, 2, 3, 4, 5]. Ці джерела суттєво відрізняються за фізичною природою, просторовою роздільністю та доступністю. Глобальні реаналізи ERA5-Land (~9 км, ECMWF) [1, 2] та MERRA-2 (~0,5°, NASA) забезпечують фізично узгоджені часові ряди температури, вологості, опадів і радіації [10]. На їх основі створено спеціалізовані агрокліматичні сервіси – зокрема NASA POWER [4], а також API-агрегатори (Open-Meteo) [3], що надають програмний доступ до метеорологічних даних різного походження. Окрему групу становлять супутникові продукти оцінки опадів (CHIRPS) [11] та температури поверхні (MODIS LST). У цьому дослідженні акцент зроблено на відкритих і безкоштовно доступних наборах даних, які забезпечують відтворюваність результатів і практичну застосовність, хоча комерційні продукти можуть пропонувати вищу просторово-часову роздільну здатність і деталізацію.

Попри розмаїття доступних джерел, їхнє використання в агrometeorологічній практиці залишається переважно несистематизованим. Валідація глобальних продуктів засвідчила високу узгодженість температурних полів ERA5-Land із наземними спостереженнями [12], тоді як для опадів фіксуються систематичні зміщення. Порівняння ERA5 і NASA POWER показало неоднорідну точність залежно від кліматичних умов [13, 14]. Водночас у науковій літературі обмежено представлені дослідження, присвячені API-агрегаторам (зокрема Open-Meteo). Більшість робіт зосереджена на порівнянні первинних параметрів (температура повітря  $t$ , температура точки роси  $t_d$ ), тоді як поширення похибок при розрахунку похідних агрокліматичних індикаторів, таких як відносна вологість повітря  $f$ , дефіцит тиску

водяної пари  $d$ , сума ефективних температур  $\sum t_{\text{еф}}$ , евапотранспірація  $ET_0$ , для умов Південного Степу України залишається недослідженим. Це обмежує можливість коректної інтерпретації міжджерельних відмінностей у прикладних агрометеорологічних розрахунках.

**Постановка проблеми.** Попри широке використання глобальних метеорологічних продуктів у системах агрометеорологічного забезпечення рослинництва, відсутні чітко визначені підходи до їх вибору та узгодженого використання, що ускладнює забезпечення надійності розрахунків у практичних застосуваннях. Сучасні джерела метеоданих істотно відрізняються за фізичною природою (in situ спостереження, реаналізи, супутникові продукти, модельні прогнози), просторово-часовою роздільністю, алгоритмами обробки та набором доступних параметрів, що ускладнює їх коректне порівняння та інтеграцію в агрономічні моделі. На практиці вибір джерела даних часто здійснюється за критерієм доступності або зручності використання, тоді як об'єктивні показники придатності – точність відтворення ключових метеорологічних змінних, термодинамічна узгодженість, відповідність просторового масштабу задачі – залишаються поза системним аналізом.

Додатковою проблемою є некоректне зіставлення похідних агрокліматичних параметрів, отриманих безпосередньо з різних джерел. Таке порівняння зміщує реальні міжджерельні розбіжності з методичними похибками, зумовленими відмінностями внутрішніх алгоритмів розрахунку – різними апроксимаціями насиченого тиску пари, психрометричними константами та схемами часової агрегації [6, 7].

Нелінійна залежність насиченого тиску водяної пари від температури повітря зумовлює посилення навіть незначних температурних розбіжностей у дефіциті тиску водяної пари, тоді як сума ефективних температур, як інтегральний показник, акумулює систематичні зміщення температури упродовж вегетаційного періоду. У сукупності ці механізми формують каскадну трансформацію температурних розбіжностей у похідних агрокліматичних індикаторах, що може призводити до агрономічно значущих відхилень у визначенні строків настання фаз росту і розвитку сільськогосподарських культур [8, 9]. Водночас кількісна оцінка таких ланцюгів трансформації температурних похибок у дефіцит тиску водяної пари ( $t \rightarrow E \rightarrow d$ ) та суму ефективних температур ( $t \rightarrow \sum t_{\text{еф}}$ ) для умов Південного Степу України в науковій літературі залишається обмеженою.

Отже, вибір метеорологічного продукту впливає не лише на абсолютні значення агрокліматичних показників, а й на агрономічні рішення, що на них ґрунтуються. Зазначені прогалини зумовлюють потребу в розробці методичної рамки, яка забезпечить фізично узгоджене використання метеорологічної інформації та підвищить достовірність агрометеорологічних розрахунків і прийняття агрономічних рішень.

**Методика досліджень.** Вибір метеорологічного продукту для агрометеорологічного забезпечення рослинництва є нетривіальним завданням внаслідок неоднорідності доступних джерел за походженням, просторово-часовими характеристиками та набором параметрів. За основний критерій систематизації прийнято функціональне призначення джерела, тобто його здатність забезпечити фізично коректне відтворення агрометеорологічних параметрів (температура повітря та ґрунту, вологість ґрунту, сума ефективних температур, евапотранспірація, опади) [15] з просторово-часовою роздільністю, що відповідає масштабу агрономічної задачі (поле – господарство – регіон).

На основі аналізу 15 джерел агрометеорологічних даних за критерієм функціонального призначення виділено п'ять функціональних типів:

Тип I. Первинні наземні спостереження – станції Укргідрометцентру та автоматичні метеостанції (АМС). Забезпечують точкові *in situ* вимірювання з частотою до 5 хв, слугують еталоном верифікації та є незамінними для локального агрометеорологічного спостереження [14].

Тип II. Глобальні реаналізи – ERA5-Land (ECMWF), MERRA-2 (NASA GMAO), GLDAS (NASA/NOAA), CFSv2 (NCEP/NOAA). Метеорологічні дані формуються за допомогою ретроспективного моделювання атмосфери з використанням асиміляції різнорідних спостережень. Дані джерела характеризуються глобальною термодинамічною узгодженістю, безперервними часовими рядами, починаючи з 1950 р., та є основою для кліматичного аналізу і ретроспективного агрокліматичного моделювання.

Тип III. Спеціалізовані агрокліматичні продукти – NASA POWER, AgERA5 (ECMWF). Дані формуються з урахуванням специфіки аграрної сфери на основі реаналізу, зокрема проводиться добова агрегація параметрів, обчислення суми ефективних температур і виконується корекція з урахуванням рельєфу місцевості. Такі дані є оптимальними для використання у моделюванні урожайності сільськогосподарських культур та плануванні зрошення.

Тип IV. Супутникові продукти – CHIRPS, MODIS LST, SMAP, IMERG/GPM, Sentinel-1 (ESA). Супутникові дані забезпечують просторову деталізацію від метрів до кількох кілометрів (до ~ 9 км) для визначення вологості ґрунту, температури земної поверхні та вегетаційних індексів.

Тип V. API-агрегатори (Open-Meteo, Tomorrow.io) надають багатомодельні продукти з мінімальною затримкою для оперативного управління агровиробництвом.

Для забезпечення коректного міжджерельного порівняння всі похідні агрокліматичні показники – відносна вологість повітря  $f$ , дефіцит тиску водяної пари  $d$ , сума ефективних температур  $\sum t_{\text{ef}}$  – було перераховано за єдиними формулами (1-3) незалежно від джерела агрометеорологічних даних. При цьому як базові змінні використовували температуру повітря  $t$  та температуру точки роси  $t_d$ . Такий підхід забезпечує уніфікованість обчислень і дає змогу інтерпретувати міжджерельні розбіжності у похідних параметрах виключно як наслідок відмінностей у відтворенні температури  $t$  та  $t_d$ .

Відносну вологість повітря визначали за формулою:

$$RH = \frac{e}{e_s(T)} \cdot 100\% = \frac{e}{E} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $E$  – тиск насиченої водяної пари, кПа,  $e$  – парціальний (фактичний) тиск водяної пари, кПа.

Дефіцит тиску водяної пари:

$$d = E - e. \quad (2)$$

Сума ефективних температур:

$$t_{\text{ef}} = \sum_{i=1}^n \max(t_{\text{сеп},i} - |B|, 0), \quad (3)$$

де  $t_{\text{сеп},i}$  – середньодобова температура  $i$ -ї доби, °C;  $B$  – біологічний мінімум культури, °C;  $n$  – тривалість вегетаційного періоду (діб).

Для оцінки підсилення температурних похибок у дефіциті тиску водяної пари використано лінеаризацію за малим збуренням  $\Delta t$  за умови фіксованого фактичного тиску водяної пари ( $e = \text{const}$ ). У цьому випадку відносні похибки похідних показників визначаються їх температурною чутливістю, а коефіцієнт підсилення відносної похибки дефіциту тиску водяної пари  $d$  порівняно з відносною похибкою відносної вологості  $f$  набуває вигляду:

$$K(f) = \frac{\Delta d / d}{\Delta f / f} = \frac{1}{1 - f / 100}. \quad (4)$$

Для суми ефективних температур за наявності систематичного зміщення  $\Delta t$  протягом сезону тривалістю  $n$  діб:

$$\Delta \sum t_{\text{еф}} \approx n \cdot \Delta t. \quad (5)$$

**Результати досліджень.** Для операційного вибору метеорологічного продукту нами запропоновано матрицю систематизації джерел агрометеорологічних даних за дев'ятьма критеріями (табл. 1), що охоплюють технічні, фізичні та прикладні характеристики: просторову роздільність, часову дискретність, глибину архіву, фізичну природу даних, термодинамічну узгодженість, наявність програмного інтерфейсу (API), деталізацію мікроклімату, затримку отримання даних та наявність специфічних агрометеорологічних параметрів.

Первинні наземні спостереження (Тип I). Мережа Укргідрометцентру (~200 агрометеостанцій) та АМС приватних операторів забезпечують вимірювання з часовою роздільністю 5–60 хв і є незамінним еталоном верифікації для всіх інших продуктів. Принциповою обмеженістю використання наземних спостережень є їх точковий характер та нерівномірне просторове покриття, особливо на зрошуваних територіях півдня України. Первинні наземні спостереження є обов'язковим компонентом для локальних агрометеорологічних та польових досліджень.

Глобальні реаналізи (Тип II). ERA5-Land є одним із базових стандартів для ретроспективного агрокліматичного моделювання завдяки глобальній фізичній узгодженості та широкому охопленню параметрів, зокрема вологості на чотирьох рівнях ґрунтового профілю. MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) використовується для аналізу атмосферних процесів, прогнозування клімату та дослідження якості атмосферного повітря. MERRA-2 є більш точним, ніж ERA5-Land, у відтворенні аерозолів і радіаційного балансу, що має важливе значення для розрахунків радіаційного балансу і, опосередковано, температурного режиму та дефіциту тиску водяної пари під час пилових бур. GLDAS є найбільш спеціалізованим реаналізом для гідрологічних агрозастосувань, що інтегрує різноманітні джерела спостережень, зокрема дані про опади, температуру повітря, радіацію та супутникові вимірювання, і використовує моделі поверхні суші для формування узгоджених глобальних наборів гідрологічних змінних. CFSv2 вирізняється тим, що поєднує погодинний реаналіз з 1979 р. та сезонний прогноз, що надає можливість агрокліматичної ретроспективи і сценарного планування в рамках єдиного продукту.

Спеціалізовані агрокліматичні продукти (Тип III). NASA POWER і AgERA5 – це продукти, похідні від реаналізів, які мають додаткову агрометеорологічну обробку. NASA POWER надає понад 300 агрокліматичних показників, зокрема сонячну радіацію та суму ефективних температур, через зручний інтерфейс без необхідності реєстрації. AgERA5 вирізняється формуванням щоденних агрегованих даних, узгоджених із місцевим астрономічним днем, що дозволяє уникнути часових зміщень між UTC-добою та агрономічною добою.

Таблиця 1

**Матриця систематизації джерел агрометеорологічних даних  
за функціональними типами та аналітичними критеріями**

№ п/п	Критерій	Первинні наземні спостереження	Глобальні реаналізи	Спеціалізовані агрокліматичні продукти	Супутникові продукти	API агрегатори
1	Просторова роздільність	Точкова ( $\leq 1$ км)	$\sim 9 - 50$ км	$\sim 9 - 50$ км (агрегат)	$\sim 10$ м – $9$ км	$\sim 1 - 11$ км
2	Часова дискретність	$5 - 60$ хв	$1$ год – $1$ доба	добово	$30$ хв – $16$ діб	$1$ хв – $1$ год
3	Глибина архіву	$1900$ р. – дотепер	$1950/1979$ рр. – дотепер	$1981$ р. – дотепер	$2000/2015$ рр. – дотепер	$1 - 5$ років
4	Фізична природа даних	Натурні вимірювання ( <i>in situ</i> )	Моделювання з асиміляцією	Базується на реаналізах (ERA5, MERRA-2)	Дистанційне зондування	Моделльні прогнози
5	Термодинамічна узгодженість	Висока (локально)	Висока (глобально узгоджена)	Визначається базовим реаналізом	Залежить від продукту	Неоднорідна
6	Наявність API	Обмежена	Так (CDS, GEE)	Так (POWER, AgERA5)	Так (GEE, Copernicus)	Так (нативні API)
7	Деталізація мікроклімату	Висока	Низька	Низька	Середня – висока (Sentinel)	Середня
8	Затримка даних (latency)	Реальний час – $1$ год	$5 - 7$ діб	$24 - 48$ год	$1 - 2$ доби	Реальний час
9	Агрометеопараметри	$t, f, P$ , вітер	$ET_0, W, LST, t, P$	$\sum t_{\text{эф}}, ET_0, W$ , радіація	$NDVI, LST, W$	$t, f, P$ , індекси

Примітка:  $t$  – температура повітря;  $f$  – відносна вологість повітря;  $W$  – вологість ґрунту;  $ET_0$  – евапотранспірація;  $LST$  – температура земної поверхні;  $\sum t_{\text{эф}}$  – сума ефективних температур;  $P$  – опади;  $NDVI$  – нормалізований вегетаційний індекс.

Супутникові продукти (Тип IV). SMAP (просторова роздільність  $\sim 3$  км) є еталонним продуктом для глобального вимірювання вологості ґрунту та стану замерзання або відтавання поверхні Землі з глобальним покриттям кожні 2–3 дні. Супутник Sentinel-1 (просторова роздільність  $\sim 5$  м), оснащений радаром із синтетичною апертурою (SAR), забезпечує внутрішньопольову деталізацію для моніторингу вологості ґрунту та фенологічних фаз рослин, проте потребує радіометричної корекції й формування часових рядів зворотного розсіювання (backscatter) за поляризаціями VV і VH. MODIS LST (просторова роздільність  $\sim 1$  км) є стандартним продуктом для теплового картування поверхні – ґрунту, рослинного покриву, піщаних масивів, асфальтованих покриттів – і відображає температуру земної поверхні, а не температуру повітря. CHIRPS (просторова роздільність  $\sim 5$  км) та IMERG/GPM ( $\sim 10$  км) є взаємодоповнюваними супутниковими продуктами для оцінки кількості атмосферних опадів. CHIRPS вирізняється тривалим кліматичним рядом спостережень і вищою часовою стабільністю, що робить його

придатнішим для аналізу посушливих періодів, тоді як IMERG доцільніше застосовувати для моніторингу інтенсивних і екстремальних опадів.

Агрегаційні сервіси з API (Тип V). Open-Meteo (некомерційний) та Tomorrow.io (комерційний) належать до окремого функціонального класу метеорологічних продуктів. Вони не є первинними джерелами спостережень, а забезпечують агрегований доступ до вихідних даних чисельних моделей та реаналізів через уніфікований програмний інтерфейс (API). Для наукових агрометеорологічних досліджень їхня цінність визначається можливістю оперативного доступу до ансамблевих прогнозів атмосферного стану, однак використання цих джерел потребує обов'язкового зазначення базових моделей чисельного прогнозування та верифікації відносно еталонних наземних спостережень.

Як зазначено в методиці, всі похідні параметри було обчислено з первинних змінних, що дозволило виключити методичні розбіжності між джерелами, адже внутрішні алгоритми агрегації глобальних агрокліматичних продуктів можуть вносити систематичні відмінності, не пов'язані з якістю відтворення атмосферних полів.

Проведений нами аналіз залежності  $\Delta d$  від температури повітря при фіксованому зміщенні  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  представлено на рисунку 1. На відміну від рівняння (4) для коефіцієнта  $K(f)$ , де фіксовано фактичний тиск водяної пари ( $e = \text{const}$ ), графіки побудовано за умови фіксованої відносної вологості повітря для трьох рівнів  $f$  (40%, 60% та 80%), що дозволяє одночасно візуалізувати вплив температурного рівня та ступеня зволоження атмосфери на абсолютну величину похибки дефіциту тиску водяної пари.

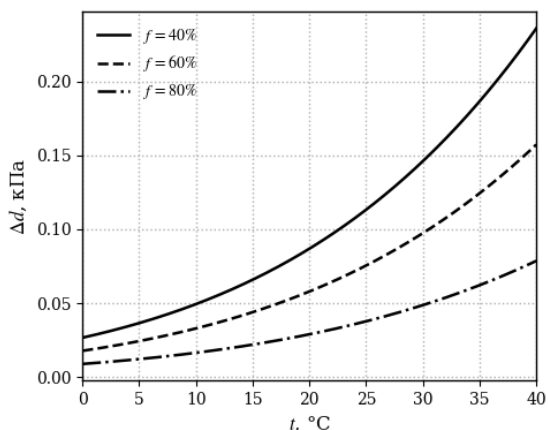


Рис. 1. Аналітична залежність  $\Delta d$  від температури повітря  $t$  при  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  для відносної вологості повітря  $f = 40, 60$  та  $80\%$

Нелінійний (експоненційний) характер кривих безпосередньо відображає вплив функції Тетенса: при підвищенні температури від  $+10$  до  $+35^\circ\text{C}$  абсолютна похибка  $\Delta d$  зростає у 2,5 – 3,0 рази для всіх рівнів відносної вологості повітря  $f$ . Коефіцієнт підсилення залежить від відносної вологості повітря, яка для типових літніх умов Південного Степу України складає 55 – 65%, і становить:

$$K(55\%) = 2,22; K(60\%) = 2,50; K(65\%) = 2,86.$$

Отже, навіть помірна температурна похибка трансформується у суттєво більшу відносну похибку  $d$ . Це означає, що  $d$  є більш чутливим індикатором температурних зміщень, ніж відносна вологість повітря, що принципово важливо при

міжджерельному порівнянні глобальних метеорологічних продуктів.

Таким чином, проблема підсилення похибок є найгострішою саме в літні місяці вегетаційного періоду сільськогосподарських культур – критичний період для рослинництва Південного Степу України, коли температура повітря регулярно перевищує позначку  $+25\dots+30^{\circ}\text{C}$ , а останні роки (2024 – 2025 рр.) перевищує позначку в  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Для суми ефективних температур встановлено, що систематична похибка  $\Delta t = 0,5^{\circ}\text{C}$  за  $n = 150$  вегетаційних діб спричиняє  $\Delta \sum t_{\text{еф}} \approx 75^{\circ}\text{C} \cdot \text{доба}$ . Зважаючи, що типовий добовий приріст ефективних температур у літній період на Півдні України складає  $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$ , зазначене відхилення ( $75^{\circ}\text{C} \cdot \text{доба}$ ) еквівалентно зміщенню настання розрахункової фази на 3–5 діб, що є агрономічно значущою величиною при плануванні агротехнічних заходів.

На основі систематизації джерел агрометеорологічних даних та аналізу каскадної трансформації температурних розбіжностей сформовано узагальнену критеріальну рамку вибору джерел. Вона враховує тип джерела, просторовий і часовий масштаб та чутливість похідних агрокліматичних показників до температурних відхилень. Показано, що допустимий рівень похибки температури визначається характером залежності відповідних індикаторів: для нелінійних (дефіцит тиску водяної пари) та кумулятивних показників (суми ефективних температур) вимоги до точності є суттєво жорсткішими.

ERA5-Land може розглядатися як базове джерело для більшості агрокліматичних задач завдяки фізичній узгодженості та високій якості відтворення температурного режиму. Водночас для задач, чутливих до екстремумів вологості або інтенсивних опадів, доцільним є поєднання реаналізних і супутникових продуктів або використання локальних вимірювань.

На основі запропонованої критеріальної рамки розроблено алгоритм вибору джерела метеорологічних даних (рис. 2).

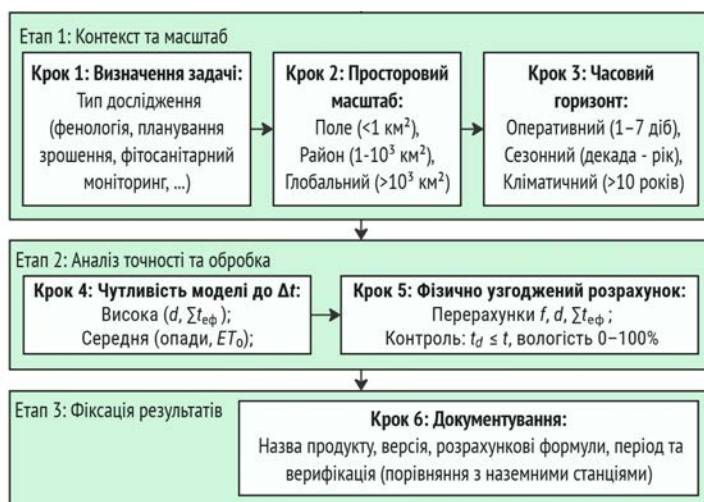


Рис. 2. Алгоритм вибору джерела метеорологічних даних для агрометеорологічного забезпечення рослинництва

Алгоритм структурований за принципом послідовного звуження простору рішень: перші чотири кроки визначають оптимальне джерело, п'ятий – забезпечує фізичну коректність розрахунку похідних параметрів, шостий – відтворюваність дослідження.

Крок 1 (визначення задачі) і Крок 2 (просторовий масштаб) разом визначають просторові вимоги: задачі рівня поля однозначно вказують на наземні спостереження та АМС або супутникові продукти з роздільною здатністю  $\leq 100$  м (Sentinel-1), тоді як регіональні задачі допускають реаналіз.

Крок 3 (часовий горизонт) визначає тип архіву: оперативні задачі – Open-Meteo або Tomorrow.io, кліматичні – ERA5-Land або NASA POWER.

Крок 4 (чутливість моделі до зміни температури) є нетривіальним і ключовим: він вимагає врахування коефіцієнта підсилення при виборі між джерелами з різною точністю відтворення температури повітря. Якщо задача чутлива до дефіциту тиску водяної пари або суми ефективних температур, джерело з систематичним зміщенням  $\Delta t > 0,5^\circ\text{C}$  є неприйнятним, навіть якщо воно задовольняє всі інші критерії.

Крок 5 (фізично узгоджений розрахунок) є концептуальною новизною алгоритму. На відміну від традиційного підходу, де відносна вологість повітря та дефіцит тиску водяної пари використовуються безпосередньо з джерела, застосування єдиної схеми розрахунку похідних параметрів забезпечує фізичну узгодженість результатів. Це перетворює вибір джерела з суто технічної процедури на формалізований і відтворюваний етап моделювання.

Крок 6 (документування) є умовою відтворюваності: фіксація джерела агрометеорологічних даних, його версії, формульної бази та результатів верифікації відносно наземних спостережень.

Запропонована критеріальна рамка є переважно концептуальною і потребує емпіричної верифікації для конкретних природно-кліматичних зон України. Аналіз каскаду похибок виконано для умов Південного Степу України, що обмежує пряме просторове узагальнення, хоча встановлені механізми підсилення мають фізичну, а не географічну природу і є справедливими для будь-якого регіону з відносною вологістю повітря 55–65% у літні місяці. При цьому окремої адаптації потребують специфічні застосування джерел агрометеорологічних даних – прогноз якості врожаю, застосування елементів технології вирощування сільськогосподарських культур та ін. Оцінки коефіцієнта підсилення отримано в рамках лінеаризованої моделі, за значних зміщень значень температури повітря ( $> 1,5^\circ\text{C}$ ) необхідний нелінійний розрахунок.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Запропонована матриця систематизації за п'ятьма функціональними типами та дев'ятьма аналітичними критеріями дозволяє однозначно позиціонувати кожне джерело метеорологічних даних у контексті конкретної агрометеорологічної задачі. Для ретроспективного моделювання урожайності сільськогосподарських культур (1981–2025) краще використовувати ERA5-Land або AgERA5, як фізично узгоджені продукти з підтвердженою якістю відтворення температурного режиму та запасу вологи у ґрунті Південного Степу України. Верифікацію даних обов'язково необхідно проводити відносно наземних спостережень АМС або Укргідрометцентру. Для оперативного агрометеорологічного супроводу упродовж вегетаційного періоду доцільно поєднувати інформацію декількох джерел, наприклад SMAP (вологість ґрунту), IMERG (опади) та Open-Meteo (короткостроковий прогноз) з верифікацією на АМС господарств.

Уніфікований розрахунок похідних параметрів (відносної вологості, дефіциту тиску водяної пари та суми ефективних температур) є необхідною умовою коректного міжджерельного порівняння – внутрішні алгоритми агрегації продуктів можуть вносити систематичні відмінності, не пов'язані з якістю відтворення атмосферних полів. Дефіцит тиску водяної пари є більш чутливим індикатором температурних відхилень порівняно з відносною вологістю повітря: коефіцієнт підсилення похибки становить 2,22 – 2,86 для типових літніх умов вегетаційного періоду Південного Степу України

і є чисто математичним наслідком нелінійності функції Тетенса. Систематичне зміщення температури повітря навіть у межах  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  через кумулятивний механізм призводить до фенологічно значущого відхилення суми ефективних температур ( $75^\circ\text{C}\cdot\text{доба}$  за 150 діб), що необхідно враховувати при калібруванні агрономічних моделей за різними джерелами метеоданих.

Перспективи подальших досліджень включають розширення просторового та часового масштабу аналізу з урахуванням різних агрокліматичних зон і багаторічних періодів, а також інтегрування отриманих результатів у моделі росту сільськогосподарських культур.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ<sup>^</sup>

1. The ERA5 global reanalysis / Hersbach H. et al. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
2. ERA5-Land : a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / Muñoz-Sabater J. et al. *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13. P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
3. Free Open-Source Weather API. *Open-Meteo* : веб-сайт. URL: <https://open-meteo.com> (дата звернення: 08.03.2026).
4. 12 years of NASA POWER : project evolution, improvements, and validation efforts / Stackhouse P. W. Jr. et al. NASA Technical Report, 2018. URL: <https://power.larc.nasa.gov> (дата звернення: 08.02.2026).
5. Мартинюк М. П. Оцінка впливу змін клімату на рослинництво в Україні : механізми адаптації для пом'якшення наслідків. *Scientific Horizons*. 2023. Т. 26, № 11. С. 145–154. DOI: 10.48077/scihor11.2023.145.
6. Alduchov O. A., Eskridge R. E. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*. 1996. Vol. 35. P. 601–609.
7. Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements / Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. Rome : FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper ; №. 56).
8. Hatfield J. L., Prueger J. H. Temperature extremes : effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*. 2015. Vol. 10. P. 4–10. DOI: 10.1016/j.wace.2015.08.001.
9. McMaster G. S., Wilhelm W. W. Growing degree-days : one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1997. Vol. 87. P. 291–300.
10. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) / Gelaro R. et al. *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
11. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations – a new environmental record for monitoring extremes / Funk C. et al. *Scientific Data*. 2015. Vol. 2. Art. 150066.
12. Yilmaz M. Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 856. Art. 159182.
13. Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes / Tan M. L. et al. *Journal of Hydrology*. 2023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129940.
14. Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy / Vanella D. et al. *Journal of Hydrology : Regional Studies*. 2022. Vol. 42. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101182.
15. ДСТУ 3513:2021. Метеорологія. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2021-11-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.
16. Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8) / World Meteorological Organization. Geneva: WMO, 2021–2025. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/41650>.

Дата першого надходження статті до видання: 06.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026