

## МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ХОЛЬДРІДЖА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕВАПОТРАНСPIРАЦІЇ

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

Національної академії аграрних наук України

*orcid.org/0000-0002-3895-5633*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України

**ЛИХОВИД П.В.** – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник

*orcid.org/0000-0002-0314-7644*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України

**БІЛЯЄВА І.М.** – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник

*orcid.org/0000-0003-0688-4209*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України

**ЛАВРЕНКО С.О.** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент

*orcid.org/0000-0003-3491-1438*

Херсонський державний аграрно-економічний університет

**БОЙЦЕНЮК Х.І.** – аспірант

*orcid.org/0000-0002-6572-7003*

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України

**Постановка проблеми.** Важливим етапом розроблення режимів зрошення сільськогосподарських культур є первинна оцінка дефіциту вологозабезпечення, яка насамперед здійснюється шляхом вивчення водного балансу зони. Одним із найбільш простих методів оцінки дефіциту вологозабезпечення є пряме порівняння приходу природної вологи з опадами, ґрунтовими водами тощо із прямими витратами вологи із земної поверхні, вираженими за допомогою евапотранспірації (випаровуваність). Натепер еталонним методом розрахунку евапотранспірації згідно з ФАО, інтегрованим у низку програмних продуктів для симуляції витрат вологи та продуктивності сільськогосподарських культур залежно від водного режиму, як-от CROPWAT 8.0, AquaCrop, EVAPO тощо, є рівняння Пенмана – Монтейта [1–3]. Даний метод є практично незамінним для визначення добової евапотранспірації, утім, під час оцінки річних показників у кліматології досить привабливим виглядає метод Хольдріджа, який не потребує великого об'єму вхідних метеорологічних даних для проведення розрахунків, показник евапотранспірації встановлюється лише за показниками температурного режиму за розрахунковою величиною біотемператури [4]. Незважаючи на простоту та доступність методики, її відносно тривалий час використання (з 50-х рр. ХХ ст.), даний метод практично не висвітлений та мало імплементується у вітчизняній практиці встановлення евапотранспірації. Найбільш поширений метод Хольдріджа у кліматології, де за ним виконано розподіл природних рослинних угруповань за зонами та класами [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методика розрахунку евапотранспірації за Хольдріджем, в основу якої покладено просте рівняння виду  $58,93 \times \text{БТ}$  (БТ – біотемпература, тобто сума температур за річний період вище 0 °С, водночас температури нижче 0 °С приймаються за нуль), є досить поширеною у працях не тільки кліматологів, але й дослідників сільськогосподарського профілю. Незважаючи на те, що рівняння Хольдріджа в основному має використовуватися у кліматології для

оцінки посушливості клімату, оскільки воно розраховує потенційну, а не референсну евапотранспірацію, як рівняння Пенмана – Монтейта, та потребує коригування для прямого впровадження в агрономічну практику, було проведено низку наукових пошуків щодо можливості взаємозаміни двох вищезазначених методик [6; 7]. Той факт, що метод Хольдріджа відрізняється високою простотою та зрозумілістю, потребує ретельного вивчення можливості його застосування в реаліях аграрної практики. Утім, аналіз наукових джерел показав практичну відсутність наукових праць у цьому напрямі.

**Мета статті.** Оцінити можливості та доцільність застосування методу Хольдріджа для визначення річної потенційної евапотранспірації для визначення вологодефіциту та коригування режимів зрошення на прикладі Херсонської області шляхом порівняння результатів оцінки агрометеорологічного показника з еталонними розрахунками у програмі ФАО ET<sub>0</sub> Calculator, що використовує алгоритм Пенмана – Монтейта (референсна евапотранспірація), а також запропонувати можливий варіант перерахунку потенційної евапотранспірації в референсну.

**Матеріали та методика досліджень.** Для проведення досліджень було використано архівні метеодані Херсонської гідрометеорологічної станції за період із 1973 по 2019 рр. (за винятком 1990 р. як такого, що не мав повних даних, необхідних для виконання розрахунків). Визначення потенційної евапотранспірації виконували за методом Хольдріджа [4], визначення референсної евапотранспірації виконували за допомогою програми ET<sub>0</sub> Calculator за скороченим рівнянням Пенмана – Монтейта (з використанням даних щодо максимальної, середньої та мінімальної температури повітря, відносної вологості повітря, швидкості вітру тощо) [8]. Порівняння отриманих розрахункових величин евапотранспірації виконували у програмі Microsoft Excel 365 шляхом розрахунку абсолютної похибки у відсотках [9]. Лінійні тренди та прогнози динаміки евапотранспірації було здійснено за допомогою функції лінійного

прогнозу Microsoft Excel 365. Регресійний аналіз даних виконували у програмному комплексі BioStat v7. Усі статистичні розрахунки здійснювали для рівня достовірності 95%.

**Результати досліджень.** За результатами розрахунків було встановлено, що потенційна евапотранспірація, калькульована за методом Хольдріджа, виявилася нижчою за величину референсної евапотранспірації за Пенманом – Монтейтом у всі роки (1973–2019 рр.). У середньому похибка розрахунків становила 37,03%. Найбільш помітна різниця в період від 2010 р., саме той час, коли глобальні кліматичні зміни почали проявлятися найбільш яскраво, що могло вплинути на точність розрахунків за методикою Хольдріджа, яка розроблялася в часи, коли стрімких змін клімату в бік потепління ще не було. Крім того, помітно, що загальний тренд щодо динаміки евапотранспірації за роками дослідження має однаковий ухил до зростання, але різну крутизну (рис. 1).

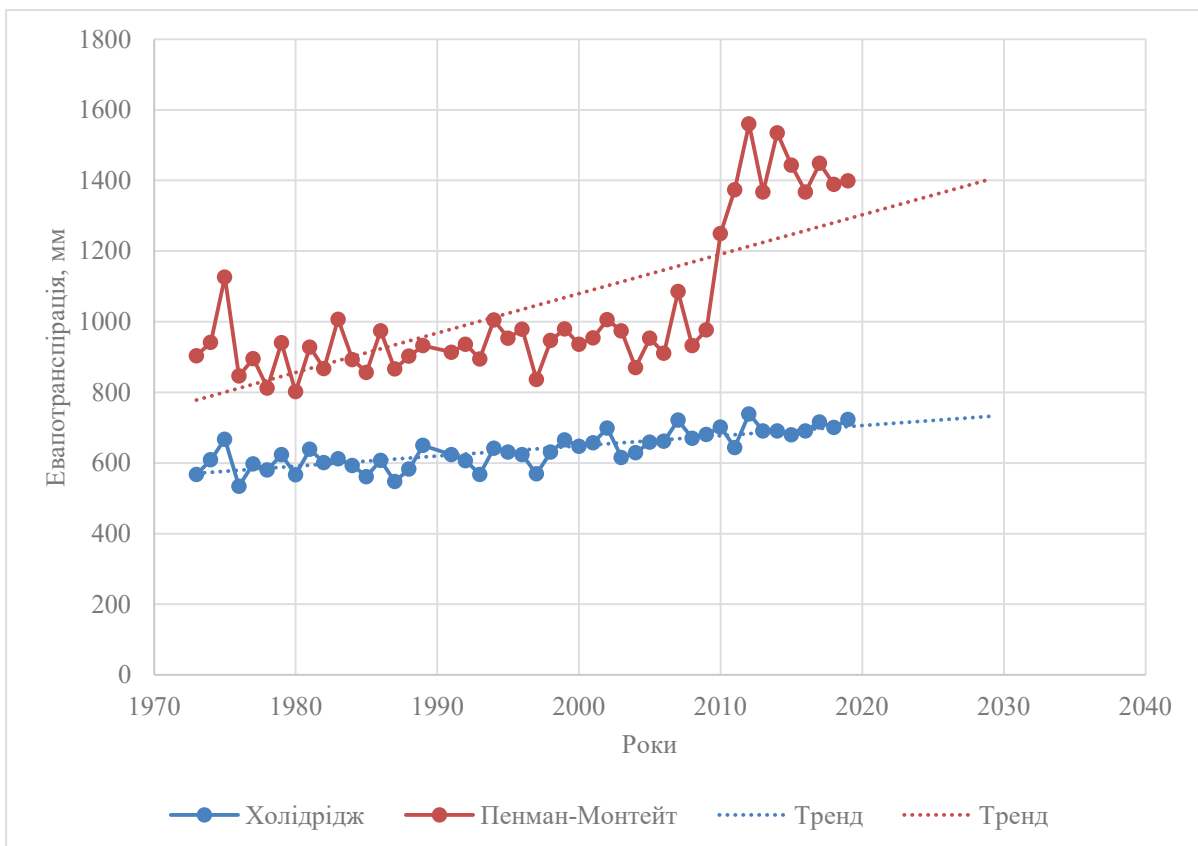
Проте за результатами регресійного аналізу розрахункових даних встановлено, що можна вивести з досить високою точністю (похибка 11,41%) величину референсної евапотранспірації з величини потенційної, розрахованої за Хольдріджем (табл. 1).

Нижче наведено графік апроксимації референсної евапотранспірації, розрахованої за запропонованою

формулою, з еталоном розрахунком за рівнянням Пенмана – Монтейта (рис. 2).

За графіком апроксимації помітне істотне поліпшення якості розрахунку за Хольдріджем, що надає потенційну можливість застосування методики в аграрному секторі.

**Висновки.** Метод Хольдріджа є простим у використанні, але не надає можливості оцінити з високою точністю референсну евапотранспірацію, занижує її річну величину по Херсонській області на 37,03%. Особливо це простежується в останні роки (із 2010 р.), з початком різких кліматичних змін, напевно, тому що рівняння Хольдріджа було розроблено в період значно стабільнішого кліматичного статусу у світі. Загалом, динаміка зміни евапотранспірації за роками та тенденція до її зростання відображена в моделі Хольдріджа коректно, як і в моделі Пенмана – Монтейта, проте лінія тренду є менш крутою. Отже, застосування методу Хольдріджа в чистому вигляді доцільне у кліматології, але має обмеження для сільськогосподарського використання. Модифіковане нами в результаті регресійного аналізу даних рівняння Хольдріджа можна рекомендувати для швидкої оцінки річної референсної евапотранспірації в аграрному секторі, оскільки похибка в цьому разі становила 11,41%, тобто знизилася майже втричі.



**Рис. 1. Річна евапотранспірація, розрахована за методами Хольдріджа та Пенмана – Монтейта (період 1973–2019 рр., Херсонська область)**

Таблиця 1 – Результати регресійного аналізу розрахункових даних евапотранспірації за період 1973-2019 рр., Херсонська область

Критерій	Значення критерію
Коефіцієнт кореляції (R)	0,9888
Коефіцієнти детермінації (R <sup>2</sup> ):	
– простий;	0,9778
– коригований;	0,9778
– прогнозований.	0,9767
Середня абсолютна похибка, %	11,41
Коефіцієнт регресійної моделі (b)	1,6355
Формула розрахунку референсної евапотранспірації за Хольдріджем	$ET_0 = 96,38 \times БТ$

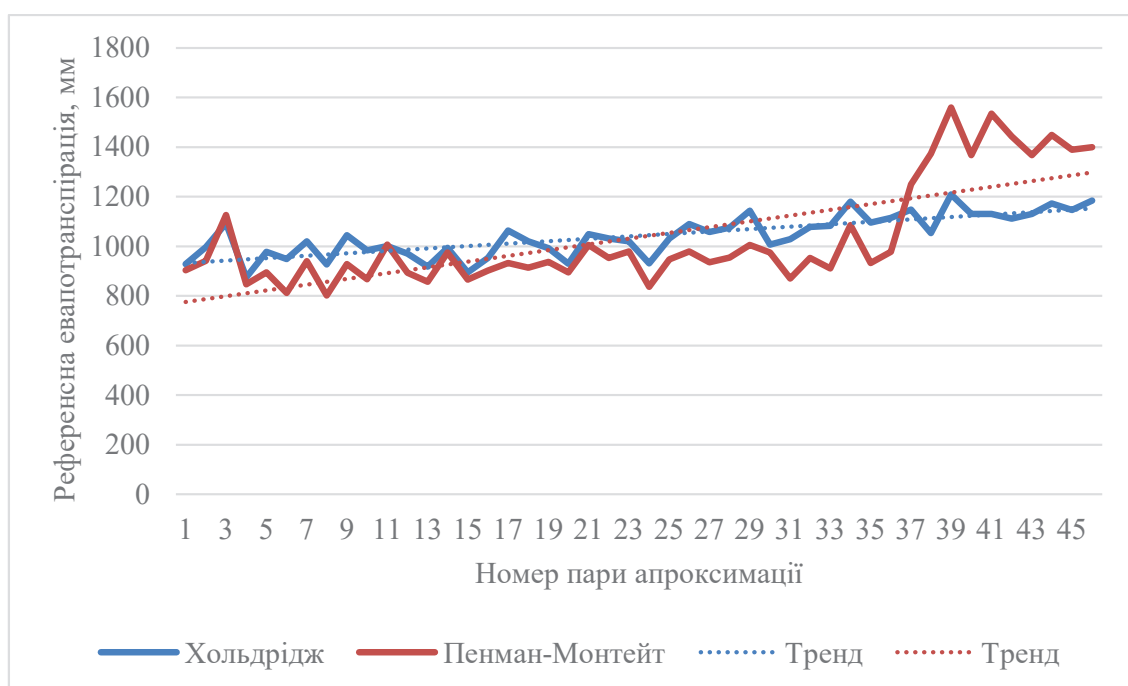


Рис. 2. Річна референсна евапотранспірація, розрахована за модифікованим методом Хольдріджа та Пенмана – Монтейта

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Лиховид П.В., Лавренко С.О. Застосування програми CROPWAT для визначення сумарного водоспоживання кукурудзи цукрової. *Зрошуване землеробство*. 2020. Вип. 73. С. 50–53.
2. Aqua Crop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles / P. Steduto et al. *Agronomy Journal*. 2009. Vol. 101. № 3. P. 426–437.
3. Júnior W.M., Valeriano T.T.B., de Souza Rolim G. EVAPO: A smartphone application to estimate potential evapotranspiration using cloud gridded meteorological data from NASA-POWER system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 156. P. 187–192.
4. Holdridge L.R. Simple method for determining potential evapotranspiration from temperature data. *Science*. 1959. Vol. 130. № 3375. P. 572–572.
5. Holdridge L.R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*. 1947. Vol. 105. P. 367–368.
6. Reference evapotranspiration estimated with simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil / A. Tanaka et al. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2016. P. 91–104.
7. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review / K. Xiang et al. *Agricultural Water Management*. 2020. Vol. 232. P. 106043.
8. Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method) / L. Zotarelli et al. *Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida*. 2020.
9. Mean absolute percentage error for regression models / A. De Myttenaere et al. *Neurocomputing*. 2016. Vol. 192. P. 38–48.

## REFERENCES:

1. Lykhovyd, P.V., & Lavrenko, S.O. (2020). Zastosuvannya prohramy CROPWAT dlia vyznachennia sumarnoho vodospozhyvannia kukurudzy tsukrovoi [Application of CROPWAT program for assessment of sweet corn water use]. *Irrigated Agriculture*, 73, 50–53. [in Ukrainian].
2. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101 (3), 426–437. [in English].
3. Júnior, W.M., Valeriano, T.T.B., & de Souza Rolim, G. (2019). EVAPO: A smartphone application to estimate potential evapotranspiration using cloud gridded meteorological data from NASA-POWER system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 187–192. [in English].
4. Holdridge, L.R. (1959). Simple method for determining potential evapotranspiration from temperature data. *Science*, 130 (3375), 572–572. [in English].
5. Holdridge, L.R. (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 105, 367–368. [in English].
6. Tanaka, A.A., Souza, A.P.D., Klar, A.E., Silva, A.C.D., & Almeida Gomes, A.W. (2016). Reference evapotranspiration estimated with simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 91–104. [in English].
7. Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. *Agricultural Water Management*, 232, 106043. [in English].
8. Zotarelli, L., Dukes, M.D., Romero, C.C., Migliaccio, K.W., & Morgan, K.T. (2020). Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). *Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida*. [in English].
9. De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., & Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing*, 192, 38–48. [in English].

**Вожегова Р.А., Лиховид П.В., Біляєва І.М., Лавренко С.О., Бойценюк Х.І. Модифікований метод Хольдріджа для визначення евапотранспірації**

**Мета.** Оцінити можливості та доцільність застосування методу Хольдріджа для визначення річної потенційної евапотранспірації для з'ясування вологодефіциту та коригування режимів зрошення на прикладі Херсонської області шляхом порівняння результатів оцінки агрометеорологічного показника з еталонними розрахунками у програмі FAO ET<sub>0</sub> Calculator, що використовує алгоритм Пенмана – Монтейта (референсна евапотранспірація), а також запропонувати можливий варіант перерахунку потенційної евапотранспірації в референсну. **Методи.** Розрахунковий метод оцінки евапотранспірації в Херсонській області за річний період 1973–2019 років (методи Хольдріджа за біотемпературою та Пенмана – Монтейта); статистичний аналіз точності розрахунків; метод лінійної регресії для побудови трендів і лінійного прогнозу; регресійний аналіз для розро-

блення модифікованої формули розрахунку евапотранспірації за біотемпературою. **Результати.** Встановлено, що метод Хольдріджа в чистому вигляді дає похибку 37,03% під час оцінювання евапотранспірації порівняно з методом Пенмана – Монтейта. Тренд і лінійний прогноз за обох методик оцінки евапотранспірації ідентичний, відрізняється лише крутизною. Модифіковане рівняння Хольдріджа дозволяє зменшити похибку розрахунку референсної евапотранспірації до 11,41%, що дозволяє рекомендувати його для використання в аграрній науці та практиці. **Висновки.** Застосування методу Хольдріджа в чистому вигляді доцільне у кліматології, але має обмеження для сільськогосподарського використання. Модифіковане нами в результаті регресійного аналізу даних рівняння Хольдріджа можна рекомендувати для швидкої оцінки річної референсної евапотранспірації в аграрному секторі.

**Ключові слова:** випаровуваність, клімат, Пенман – Монтейт, регресія, тренд.

**Vozhehova R.A., Lykhovyd P.V., Biliaieva I.M., Lavrenko S.O., Boitseniuk K.I. Modified Holdridge method for evapotranspiration assessment**

**Purpose.** To assess the possibility and feasibility of using the Holdridge method to determine the annual potential evapotranspiration for determination of moisture deficit and adjustment of irrigation regimes using as the sample Kherson region by comparing the results of the assessment of the agrometeorological index with reference calculations in the FAO ET<sub>0</sub> Calculator software by the Penman-Monteith algorithm (reference evapotranspiration), and suggest a possible option for recalculating potential evapotranspiration into a reference one. **Methods.** Calculation method for assessing evapotranspiration in the Kherson region for the annual period of 1973–2019 (by Holdridge using biotemperature and by Penman-Monteith methods); statistical analysis of the accuracy of calculations; linear regression method for trend building and linear forecasting; regression analysis for the development of a modified formula for calculating evapotranspiration from biotemperature. **Results.** It was found that the Holdridge method “as it is” results in the error of 37,03% in the estimation of evapotranspiration in comparison with the Penman-Monteith method. The trend and linear forecast for both methods of estimating evapotranspiration are identical, differing only in the curve steepness. The modified Holdridge equation reduces the error in calculating the reference evapotranspiration to 11,41%, which makes it possible to recommend it for the use in agricultural science and practice. **Conclusions.** Application of the Holdridge method “as it is” is advisable in climatology only but has limitations for agricultural use. The Holdridge equation, modified by the result of regression analysis of the data, can be recommended for a rough assessment of the annual reference evapotranspiration in the agricultural sector.

**Key words:** evaporation, climate, Penman – Monteith, regression, trend.