

## ПРОГРАМУВАННЯ СУМАРНОГО ВОДОСПОЖИВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО В ЗРОШУВАНИХ УМОВАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ЗАСОБАМИ CROPWAT 8.0

**ЛИХОВИД П.В.** – кандидат сільськогосподарських наук

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

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

**ШАРІЙ В.О.** – молодший науковий співробітник

*orcid.org/0000-0003-1652-3159*

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства

Національної академії аграрних наук України

**Постановка проблеми.** На сучасному етапі розвитку людства інформаційні технології відіграють важливу роль у всіх сферах діяльності людини, упродовження інформаційних технологій в аграрне виробництво перебуває на досить низькому рівні щодо інших галузей, хоча рентабельність виробництва сільськогосподарської продукції здебільшого залежить від своєчасних дій аграріїв, виявлення стану ґрунту, визначення поливної норми та строків поливу, кількості внесених добрив, адаптації технологій вирощування сільськогосподарських культур до погодних умов, тощо. Інтеграція комп'ютерних технологій в аграрний сектор має вагомим актуальним значенням як з наукового, так і з практичного погляду, дає можливість проводити своєчасний моніторинг стану посівів сільськогосподарських культур, виявляти на первинному етапі збудників хвороб і шкідників, визначати кількісні та якісні параметри посівів і рослинницької продукції, забезпечує раціональне витрачання всіх видів ресурсів, найкращі показники економічної ефективності агровиробництва та мінімізацію антропогенного тиску на довкілля [1].

Основні фактори, що визначають продуктивність рослин, можна розділити на три групи: кліматичні – світло, тепло, вода та повітряно-газовий склад; фізичні – структура та хімічний склад ґрунту; біологічні – різноманітні мікроорганізми, рослини та тварини (як корисні, так і шкідливі). За цих умов певні види рослин мають особливі потреби в кожному факторі життя та їх оптимальному поєднанні [2]. Врахування показників продукційних процесів рослинництва має велике значення для підвищення продуктивності аграрного сектору в сільському господарстві та економіці. Враховуючи сучасні зміни клімату та дефіцит природної вологи на півдні України зрошення стає чи не найголовнішим фактором підвищення продуктивності сільськогосподарських культур. Раціональне використання зрошувальної води є конче необхідним для забезпечення сталого розвитку та попередження екологічної кризи [3]. Тому наукове обґрунтування інтенсивних технологій вирощування вітчизняних гібридів кукурудзи на зрошуваних землях південного Степу України з урахуванням гідротермічних факторів та змін клімату є актуальним завданням сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Програмний продукт FAO CROPWAT 8.0 призначений для симуляційного моделювання та програмування

водоспоживання сільськогосподарських культур, вирощуваних у різних агрокліматичних умовах за різних сценаріїв агротехнологічного комплексу та параметрів зрошення. CROPWAT 8.0 дозволяє встановити водопотребу заданої культури за програмованих умов вирощування як по основних фазах вегетації, так і по заданих часових проміжках, визначити величину сумарного водоспоживання та виконувати управління режимом зрошення.

Дана програма широко використовується науковою спільнотою. Так, наприклад, CROPWAT 8.0 було використано для програмування водоспоживання та режиму зрошення рису [4, 5], зернової кукурудзи [6], сорго, арахісу, ряду овочевих культур, тощо [7, 8]. Окремі наукові роботи присвячені вивченню динаміки водопотреби сільськогосподарських культур на тлі поточних кліматичних змін [9].

Вітчизняні науковці також використовують CROPWAT 8.0 для програмування та управління режимом зрошення сільськогосподарських культур. Так, наприклад, даний програмний продукт було застосовано для прогнозування водопотреби сільськогосподарських культур, вирощуваних на дослідних полях Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства, включно із багаторічною культурою люцерни [10, 11]. Втім, у даних дослідженнях не було встановлено відповідність програмованого водоспоживання рослин із реальним. Подальше вивчення питання для таких культур як пшениця озима, кукурудза зернова, соя та сорго засвідчило про невідповідність реальних водопотреб і змодельованих на 17,1% для пшениці, 21,3% для кукурудзи, 20,8% для сої та 13,6% для сорго, відповідно, що є доволі високими похибками, враховуючи загальний рівень сумарного водоспоживання цих культур і зрошувальні норми [12]. Під час подібної оцінки, окремими дослідниками було зафіксовано невідповідність програмованого та реального рівнів водопотреби, що вимагає калібрування розрахунків CROPWAT 8.0 для зрошуваних умов півдня України [13, 14]. Таким чином, проблематика програмування водоспоживання основних сільськогосподарських культур за допомогою програми CROPWAT 8.0 наразі не є вирішеною та потребує подальших досліджень і уточнення.

**Мета.** Оцінити точність програмування сумарного водоспоживання кукурудзи на зерно програмою

CROPWAT 8.0 та запропонувати калібрувальну модель для зрошуваних умов півдня України для поліпшення ефективності програмного засобу.

**Матеріали та методика досліджень.** Дослідження виконувалось на полях Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН (ІКОСГ НААН), раніше Інститут зрошуваного землеробства НААН (ІЗЗ НААН), розташованого на правому березі Дніпра, Дніпровського району м. Херсон в зоні Інгулецької зрошувальної системи упродовж 2019–2021 рр. За аніонним складом зрошувальна вода хлоридно-сульфатна, за ДСТУ 2730-94 відноситься до II класу якості (обмежено придатна для зрошення). Зрошення кукурудзи здійснювалося краплинним способом. Ґрунт дослідних ділянок – темно-каштановий середньо-суглинковий слабосолонцюватий на карбонатному лесі, типовий для зрошуваної зони півдня України. В орному шарі вміст гумусу 2,2%, загального азоту – 0,17%, рухомого фосфору й обмінного калію – відповідно 19,7 мг/кг і 330 мг/кг ґрунту. Біологічний матеріал – рослини кукурудзи зернової – у дослідях було представлено гібридами Степовий (FAO 190) і Тронка (FAO 380).

Моделювання параметрів продукційних процесів кукурудзи на зерно для планування та оперативного управління режимами зрошення проводили з використанням комп'ютерної програми Продовольчої та сільськогосподарської організації (FAO) ООН [15] – CROPWAT 8.0 для Windows. Ця програма може бути використана науковцями й практиками для обчислення складових елементів водного режиму ґрунту, дефіциту водоспоживання та водопотреби культур у зрошенні на основі використання локальних даних про ґрунт, клімат і стан посівів, а також їхнього моделювання для коригування технологічного процесу агровиробництва. Крім того, програма дозволяє формувати графіки режиму зрошення для різних господарсько-економічних умов, розраховувати схеми водоподання залежно від рівнів запланованого врожаю. Для встановлення водопотреби культур використовували розрахункові показники евапотранспірації (середньодобового випаровування) з використанням методу Пенмана-Монтейта. Цей метод враховує як фізіологічні параметри рослин, так і кліматичні особливості певної ґрунтово-кліматичної зони. Для розрахунків у програмі CROPWAT використано метеорологічні дані Херсонської агрометеорологічної станції,

яка знаходиться поблизу дослідженого поля Інституту зрошуваного землеробства НААН.

Сумарне водоспоживання (фактичне) за вегетаційний період, а також за окремі міжфазові періоди культури, було визначено методом водного балансу за методикою Костякова [16]. Порівняння фактичного та програмованого CROPWAT 8.0 водоспоживання рослин кукурудзи виконували методами математичної статистики із оцінкою таких показників як коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) та середня абсолютна похибка у відсотках (MAPE). Статистичні розрахунки виконували за стандартним алгоритмом у Microsoft Excel [16]. Коригування програмованої величини водоспоживання кукурудзи на зерно виконували методами лінійної регресії та штучних нейронних мереж у Tiberius. Штучна нейронна мережа мала один прихований шар нейронів, темп навчання 0,80 у 1000 епох, алгоритм навчання – зворотне поширення помилки [18]. Структура нейронної мережі схематично представлена на Рис. 1.

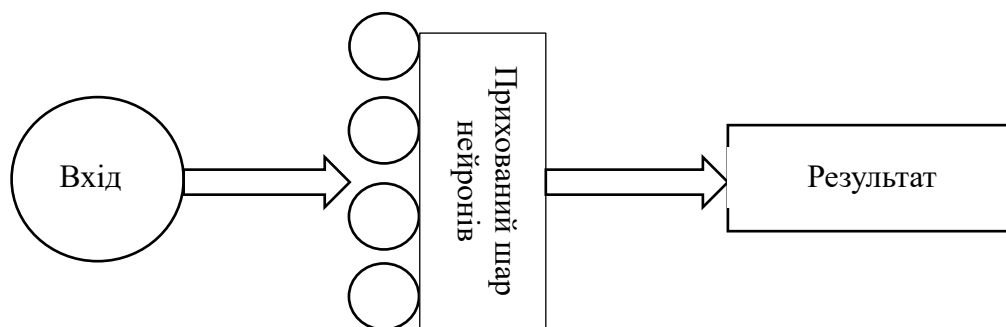
Комбінована регресійна модель (з урахуванням поправочного коефіцієнта нейронної мережі) також була запропонована та оцінена з точки зору адекватності та точності програмування сумарного водоспоживання культури.

**Результати досліджень.** За краплинного способу поливу сумарне водоспоживання (W) для гібридів кукурудзи Степовий та Тронка у 2019 році становило 4021 та 4340 м<sup>3</sup>/га; у 2020 році – 4057 та 4287 м<sup>3</sup>/га; у 2021 році – 4655 та 4940 м<sup>3</sup>/га, відповідно.

У той самий час, програмоване за допомогою CROPWAT 8.0 водоспоживання (W<sub>m</sub>) для зазначених гібридів складало: у 2019 році – 1482 та 5350 м<sup>3</sup>/га; у 2020 році – 4477 та 5626 м<sup>3</sup>/га; у 2021 році – 3624 та 4440 м<sup>3</sup>/га, відповідно.

Очевидно, що програмоване сумарне водоспоживання суттєво відрізняється від фактичного. Характерно, що не встановлено одно типової тенденції до переоцінки, або недооцінки показника, оскільки у різні часові періоди програмний розрахунок надає як занижені, так і завищені результати. Статистична оцінка вказує на низьку адекватність змодельованого сумарного водоспоживання ( $R^2 = 0,07$ ), так само як на низьку прогностичну достовірність моделі CROPWAT 8.0 (MAPE = 26,00%).

Лінійний регресійний аналіз вхідних даних щодо сумарного водоспоживання (W) рослин кукурудзи зер-



**Рис. 1. Архітектура штучної нейронної мережі Tiberius для коригування розрахункової величини сумарного водоспоживання кукурудзи**

нової за період 2019–2021 рр. дозволив встановити можливе коригувальне рівняння (Табл. 1).

Малий набір вхідних даних ( $N = 6$ ) не дозволив використовувати нелінійні методи регресійного аналізу, тому результати регресійної статистики вказують на низьку адекватність та прогностичну точність рівняння. Втім, комбінований розрахунок сумарного водоспоживання рослин кукурудзи зернової засвідчив, що дане коригування виявилось ефективним, оскільки дозволило істотно знизити величину розрахункові похибки до прийнятної ( $MAPE = 6,42\%$ ), хоча поліпшити адекватність вхідному набору фактичних даних сумарного водоспоживання культури не вдалося ( $R^2 = 0,07$ ).

Застосування алгоритму штучних нейронних мереж дозволило максимально знизити похибку розрахунків сумарного водоспоживання у програмі CROPWAT 8.0 ( $MAPE = 5,65\%$ ), при цьому адекватність модельованої величини даного показника також істотно поліпшилася ( $R^2 = 0,25$ ). Застосування моделі, базованої на нейронній мережі, у чистому вигляді є неможливим. Тому методами математичної статистики нами було скориговано вихідну лінійну регресійну модель за допомогою перехідного коефіцієнта, одержаного внаслідок математичного аналізу відповідності результатів розрахунків нейронної мережі та регресійної моделі ( $K = 1,0206$ ). Таким чином, було одержано нове коригувальне рівняння виду  $Wm^2 = 4213,9 + 0,0623 \times Wm$ , але результати статистичного аналізу засвідчили його нижчу прогностичну точність ( $MAPE = 7,11\%$ ). Узагальнені результати математичного уточнення сумарного водоспоживання рослин кукурудзи зернової наведено у Табл. 2.

Результати дослідження свідчать, що програмний комплекс CROPWAT 8.0 може бути застосований до

програмування водоспоживання рослин кукурудзи на півдні України тільки у випадку коригування остаточних розрахунків, що додатково підтверджує попередньо виконані модельні дослідження [13, 14]. Альтернативою введення поправочних коригувальних коефіцієнтів є застосування коригованих коефіцієнтів культури в самій програмі CROPWAT 8.0 на етапі модельних розрахунків, оскільки було доведено, що запропоновані стандартні коефіцієнти культури для кукурудзи в умовах краплинного зрошення не відповідають реальним процесам споживання вологи культурою [19]. Причому дана тенденція невідповідності стосується не тільки рослин кукурудзи зернової, але й інших культур, наприклад, томатів та цукрових буряків, де інколи розбіжність у розрахунковому водоспоживанні в певні періоди росту і розвитку культур сягала 70% із фактичним водоспоживанням, як і у нашому дослідженні, де відхилення становило 420–2539 м<sup>3</sup>/га, або 10,35–63,14% [20, 21].

Графічна апроксимація кривих додатково засвідчує високу невідповідність між «чистим» розрахунком сумарного водоспоживання у програмі CROPWAT 8.0 із фактичним і коригованим розрахунком (Рис. 2). Максимальна невідповідність зафіксована для даних 2019 року, у той час як у 2021 році розбіжність між фактичним і модельованим водоспоживанням культури є мінімальною.

**Висновки.** CROPWAT 8.0 може бути успішно застосований до програмування водоспоживання рослин кукурудзи у випадку коригування остаточних розрахунків. Подальші дослідження з цього напрямку дозволять визначити найбільш оптимальний коригуючий коефіцієнт моделі та забезпечити її практичне впровадження.

Таблиця 1

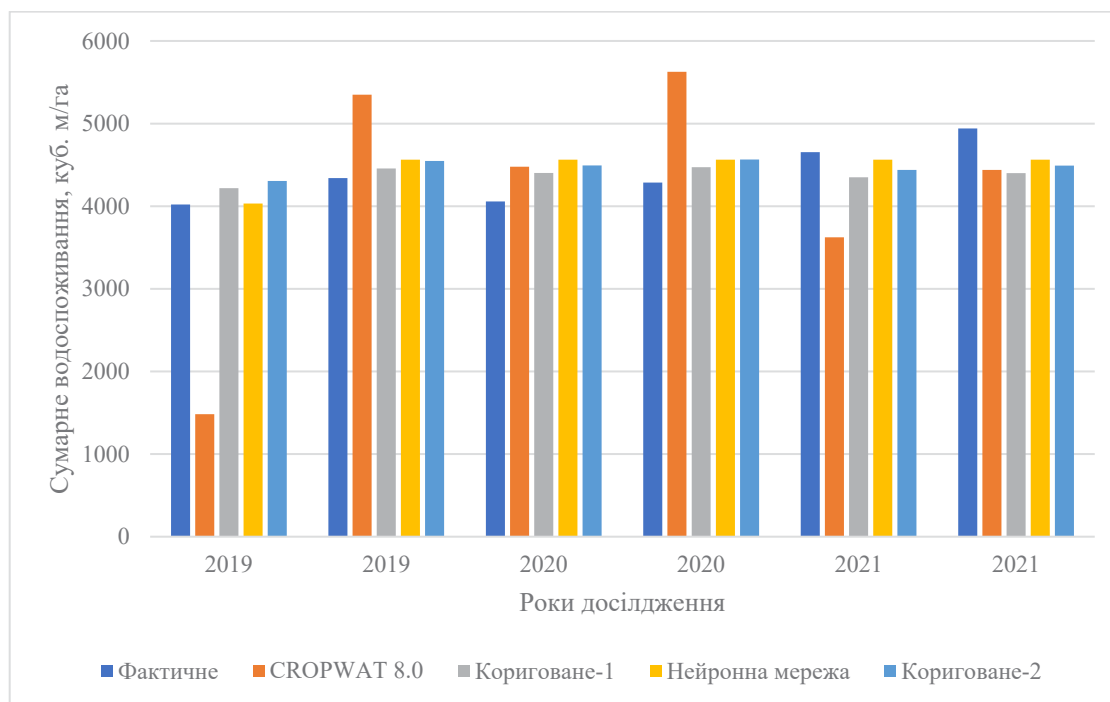
**Результати регресійного аналізу даних щодо модельованого та фактичного сумарного водоспоживання гібридів кукурудзи зернової за період 2019–2021 рр.**

Статистичний показник	Значення
Коефіцієнт кореляції (R)	0,26
Коефіцієнт детермінації (R <sup>2</sup> )	0,07
Коригований коефіцієнт детермінації	0,12
Прогнозний коефіцієнт детермінації	0,21
Похибка (S), м <sup>3</sup> /га	384,32
Похибка абсолютна (MAPE), %	63,19
Константа (α), м <sup>3</sup> /га	4128,8
Коефіцієнт регресії (β)	0,0611
Коригувальне рівняння (Wm <sup>1</sup> )	4128,8 + 0,0611 × Wm

Таблиця 2

**Сумарне водоспоживання гібридів кукурудзи зернової за період 2019–2021 рр. (фактичне, кориговане), м<sup>3</sup>/га**

Фактичне	CROPWAT 8.0	Кориговане-1	Нейронна мережа	Кориговане-2
4021	1482	4219	4032	4306
4340	5350	4456	4564	4547
4057	4477	4402	4564	4493
4287	5626	4472	4564	4565
4655	3624	4350	4563	4440
4940	4440	4400	4564	4491



**Рис. 2. Графічне порівняння фактичного сумарного водоспоживання рослин кукурудзи зернової з програмованим залежно від моделі його оцінки**

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Лазер П.Н., Міхеєв Є.К. *Інструментарій і технології організації інформації в землеробстві*. Херсон: ХДУ. 2006. 368 с.
- Ушкаренко В.О. *Зрошуване землеробство*. Київ: Урожай. 1994. 338 с.
- Лиховид П.В. Аналіз агрокліматичних умов у Херсонській області за 2022 рік із використанням сучасних інформаційних технологій. *Зрошуване землеробство*. 2023. Вип. 79. С. 47–51. DOI: 10.32848/0135-2369.2023.79.6
- Bouraima A.K., Zhang W., Wei C. Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2015. Vol. 8. No. 2. P. 58–64.
- Hossain M.B., Yesmin S., Maniruzzaman M., Biswas J.C. Irrigation scheduling of rice (*Oryza sativa* L.) using CROPWAT model in the western region of Bangladesh. *The Agriculturists*. 2017. Vol. 15. No. 1. P. 19–27.
- Feng Z., Liu D., Zhang Y. Water requirements and irrigation scheduling of spring maize using GIS and CropWat model in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Chinese Geographical Science*. 2007. Vol. 17. P. 56–63. DOI: 10.1007/s11769-007-0056-3
- Babu R.G., Veeranna J., Kumar K.R., Rao I.B. Estimation of water requirement for different crops using CROPWAT model in Anantapur region. *Asian Journal of Environmental Science*. 2014. Vol. 9. No. 2. P. 75–79. DOI: 10.15740/HAS/AJES/9.2/75-79
- Etissa E., Dechassa N., Alemayehu Y. Estimation of yield response (ky) and validation of cropWat for tomato under different irrigation regimes. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 1–6. DOI: 10.4172/2168-9768.1000167
- Yetik A.K., Şen B. Evaluation of the Impacts of Climate Change on Irrigation Requirements of Maize by CROPWAT Model. *Gesunde Pflanzen*. 2023. Vol. 75. No. 4. P. 1297–1305. DOI: 10.1007/s10343-022-00751-x
- Коковіхін С.В., Дробітько А.В. Прогнозування водопотреби сільськогосподарських культур та формування графіків поливів з використанням програми CROPWAT. *Зрошуване землеробство*. 2011. № 55. С. 298–303.
- Вожегова Р.А., Коковіхін С.В., Шепель А.В., Бояркіна Л.В. Застосування інформаційних технологій для здійснення оцінки кліматичних умов та розрахунку водопотреби люцерни. *Таврійський науковий вісник*. 2013. Вип. 86. С. 49–52.
- Коковіхін С.В., Писаренко П.В., Біднина І.О., Шарій В.О., Бойценюк Х.І. Науково-практичні аспекти планування та оперативного управління режимами зрошення сільськогосподарських культур з використанням інформаційних технологій. *Зрошуване землеробство*. 2020. Вип. 73. С. 43–49. DOI: 10.32848/0135-2369.2020.73.8
- Лиховид П.В., Лавренко С.О. Застосування програми CROPWAT для визначення сумарного водоспоживання кукурудзи цукрової. *Зрошуване землеробство*. Вип. 73. С. 50–53. DOI: 10.32848/0135-2369.2020.73.9
- Vozhehova R.A., Lavrynenko Y.O., Kokovikhin S.V., Lykhovyd P.V., Biliaieva I.M., Drobitko A.V., Nesterchuk V.V. Assessment of the CROPWAT 8.0 software reliability for evapotranspiration and crop water requirements calculations. *Journal of water and land development*. 2018. Vol. 39. P. 147–152. DOI: 10.2478/jwld-2018-0070
- CropWat. Land & Water. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. URL: <http://www>

- fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en (дата звернення 06.10.2023)
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*. 1998. 300(9). D05109. Rome. FAO. 56 pp.
  - Carlberg C. *Statistical analysis: Microsoft excel 2013*. Que Publishing. 2014. 490 pp.
  - Puddu P.E., Menotti A. Artificial neural network versus multiple logistic function to predict 25-year coronary heart disease mortality in the Seven Countries Study. *European Journal of Cardiovascular Prevention & Rehabilitation*. 2009. Vol. 16. No. 5. P. 583–591. DOI: 10.1097/HJR.0b013e32832d49e1
  - Ромашенко М., Шатковський А., Журавльов О. Особливості застосування методу «Ренман–Monteith» в умовах краплинного зрошення Степу України (на прикладі зернової кукурудзи). *Вісник аграрної науки*. 2016. Вип. 94. №. 5. С. 55–59. DOI: 10.31073/agrovisnyk201605-11
  - Шатковський А.П., Журавльов О.В. Діагностика поливів буряку цукрового за методом Ренман–Monteith в умовах краплинного зрошення Степу України. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. 2017. №. 1. С. 63–69.
  - Ромашенко М.І., Шатковський А.П., Журавльов О.В., Васюта В.В., Черевичний Ю.О. Адаптація методу Ренман–Monteith на культурі томата розсадного у виробничих умовах за краплинного зрошення. *Меліорація і водне господарство*. 2018. №. 2. С. 12–18. DOI: 10.31073/mivg20180108-146
- REFERENCES:**
- Lazer, P.N., & Mikheyev, Ye.K. (2006). *Instrumentariy i tekhnologii orhanizatsiyi informatsiyi v zemlerobstvi [Tools and technologies for information organization in agriculture]*. Kherson: KSU [In Ukrainian].
  - Ushkarenko, V.O. (1994). *Zroshuvane zemlerobstvo [Irrigated Agriculture]*. Kyiv: Urozhaj [In Ukrainian].
  - Lykhovyd, P.V. (2023). Analiz agroklimatechnykh umov u Khersonskiy oblasti za 2022 rik iz vykorystanniam suchasnykh informatsiynykh tekhnolohiy [Analysis of agroclimatic conditions in Kherson oblast for 2022 using modern information technologies]. *Zroshuvane zemlerobstvo – Irrigated Agriculture*, 79, 47–51 [In Ukrainian]. DOI: 10.32848/0135-2369.2023.79.6
  - Bouraima, A.K., Zhang, W., & Wei, C. (2015). Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(2), 58–64 [In English].
  - Hossain, M.B., Yesmin, S., Maniruzzaman, M., & Biswas, J.C. (2017). Irrigation scheduling of rice (*Oryza sativa* L.) using CROPWAT model in the western region of Bangladesh. *The Agriculturists*, 15(1), 19–27 [In English].
  - Feng, Z., Liu, D., & Zhang, Y. (2007). Water requirements and irrigation scheduling of spring maize using GIS and CropWat model in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Chinese Geographical Science*, 17, 56–63 [In English]. DOI: 10.1007/s11769-007-0056-3
  - Babu, R.G., Veeranna, J., Kumar, K.R., & Rao, I.B. (2014). Estimation of water requirement for different crops using CROPWAT model in Anantapur region. *Asian Journal of Environmental Science*, 9(2), 75–79 [In English]. DOI: 10.15740/HAS/AJES/9.2/75-79
  - Etissa, E., Dechassa, N., & Alemayehu, Y. (2016). Estimation of yield response (ky) and validation of CropWat for tomato under different irrigation regimes. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 5(2), 1–6 [In English]. DOI: 10.4172/2168-9768.1000167
  - Yetik, A.K., & Şen, B. (2023). Evaluation of the Impacts of Climate Change on Irrigation Requirements of Maize by CROPWAT Model. *Gesunde Pflanzen*, 75(4), 1297–1305 [In English]. DOI: 10.1007/s10343-022-00751-x
  - Kokovikhin, S.V., & Drobitko, A.V. (2011). Prohnozuvannya vodopotreby silskohospodarskykh kultur ta formuvannya grafikiv polyviv z vykorystanniam prohramy CROPWAT [Crops water use prediction and irrigation scheduling using CROPWAT software]. *Zroshuvane zemlerobstvo – Irrigated Agriculture*, 55, 298–303 [In Ukrainian].
  - Vozhehova, R.A., Kokovikhin, S.V., Shepel, A.V., & Boiarkina, L.V. (2013). Zastosuvannya informatsiynykh tekhnolohiy dlia zdijsnennia otsinky klimatychnykh umov ta rozrakhunku vodopotreby liutserny [Implementation of information technologies for climate conditions assessment and alfalfa water use]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk – Tavrian Scientific herald*, 86, 49–52 [In Ukrainian].
  - Kokovikhin, S.V., Pisarenko, P.V., Bidnina, I.O., Shariy, V.O., & Boyzenyuk, Kh.I. (2020). Naukovo-praktychni aspekty planuvannya ta operatyvnoho upravlinnia rezhymamy zroshennia silskohospodarskykh kultur z vykorystanniam informatsiynykh tekhnolohiy [Scientific and practical aspects of planning and operational management of crop irrigation regimes using information technologies]. *Zroshuvane zemlerobstvo – Irrigated Agriculture*, 73, 43–49 [In Ukrainian]. DOI: 10.32848/0135-2369.2020.73.8
  - Lykhovyd, P.V., & Lavrenko, S.O. (2020). Zastosuvannya prohramy CROPWAT dlia vyznachenня sumarnoho vodospozhyvannya kukurudzy tsukrovoy [Application of CROPWAT program for assessment of sweet corn water use]. *Zroshuvane zemlerobstvo – Irrigated Agriculture*, 73, 50–53 [In Ukrainian]. DOI: 10.32848/0135-2369.2020.73.9
  - Vozhehova, R.A., Lavrynenko, Y.O., Kokovikhin, S.V., Lykhovyd, P.V., Biliaieva, I.M., Drobitko, A.V., & Nesterchuk, V.V. (2018). Assessment of the CROPWAT 8.0 software reliability for evapotranspiration and crop water requirements calculations. *Journal of Water and Land Development*, 39, 147–152 [In English]. DOI: 10.2478/jwld-2018-0070
  - CropWat. Land & Water. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en> [In English]
  - Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome [In English].
  - Carlberg C. (2014). *Statistical analysis: Microsoft excel 2013*. Que Publishing [In English]
  - Puddu, P.E., & Menotti, A. (2009). Artificial neural network versus multiple logistic function to predict 25-year coronary heart disease mortality in the Seven Countries

- Study. *European Journal of Cardiovascular Prevention & Rehabilitation*, 16(5), 583–591 [In English]. DOI: 10.1097/HJR.0b013e32832d49e1
19. Romashchenko, M.I., Shatkovskiy, A.P., & Zhuravlov, O.V. (2016). Osoblyvosti zastosuvannya metodu «Penman–Monteith» v umovakh kraplynnoho zroshennia Stepu Ukrainy (na prykladi zernovoi kukurudzy) [Peculiar features of application of a method «Penman-Monteith» in conditions of drip irrigation of Steppe of Ukraine (on an instance of grain corn)]. *Visnyk agrarnoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, 94(5), 55–59 [In Ukrainian]. DOI: 10.31073/agroviznyk201605-11
20. Shatkovskiy, A.P., & Zhuravlov, O.V. (2017). Diahnostyka polyviv buriaku tsukrovoho za metodom Penman–Monteith » v umovakh kraplynnoho zroshennia Stepu Ukrainy [Diagnostics of sugar beets irrigation using the method of Penman-Monteith in the conditions of drip irrigation of The Steppe of Ukraine]. *Visnyk Dniprovskoho derzhavnoho agrarno-ekonomichnoho universytetu – Herald of Dnipro State Agrarian and Economic University*, 1, 63–69 [In Ukrainian].
21. Romashchenko, M.I., Shatkovskiy, A.P., Zhuravlov, O.V., Vasiuta, V.V., & Cherevychnyi, Yu.O. (2018). Adaptatsiya metodu Penman-Monteith na kulturi tomata rozsadnoho u vyrobnychkh umovakh za kraplynnoho zroshennia [Adjustment of the Penman-Monteith method for growing tomato seedlings in production conditions when applying drip irrigation]. *Melioratsiya i vodne hospodarstvo – Land Reclamation and Water Management*, 2, 12–18 [In Ukrainian]. DOI: 10.31073/mivg20180108-146

#### Лиховид П.В., Шарій В.О. Програмування сумарного водоспоживання кукурудзи на зерно в зрошуваних умовах Півдня України засобами CROPWAT 8.0

**Мета.** Оцінити точність програмування сумарного водоспоживання кукурудзи на зерно програмою CROPWAT 8.0 та запропонувати калібрувальну модель для зрошуваних умов півдня України для поліпшення ефективності програмного засобу.

**Методи.** Використано дані щодо реального водоспоживання кукурудзи на зерно, вирощуваної у польових дослідах на полях Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН у 2019–2021 рр. в рамках вивчення агротехнологічних прийомів вирощування культури. Реальну величину сумарного водоспоживання встановлено методом водного балансу. Програмовану величину встановлено методом симуляційного моделювання в програмі CROPWAT 8.0 із використанням польових метеоданих. Методами математико-статистичного аналізу було виконано порівняння реальної та програмованої величини сумарного водоспоживання кукурудзи на зерно. Запропоновано калібрування обчислень CROPWAT 8.0 шляхом регресійної моделі та штучної нейронної мережі Tiberius, що використовує алгоритм зворотного поширення помилки (тренування в 1000 епох, темп навчання 0,80).

**Результати.** Встановлено, що чисті розрахунки в програмі CROPWAT 8.0 вимагають калібрування, оскільки середня абсолютна похибка обчислень становила 26,00%. Калібрована модель дозволила істотно

(до 6,42%) знизити похибку розрахунків. Штучна нейронна мережа Tiberius показала дещо ліпший результат (похибка 5,65%). Втім, для практичних цілей регресійна калібрована модель має більше значення. Коригована модель CROPWAT 8.0 забезпечує середню якість підгону кривої (коефіцієнт детермінації 0,66), у той час як штучна нейронна мережа, вірогідно, має недолік надмірного підгону даних (коефіцієнт детермінації 0,99).

**Висновки.** CROPWAT 8.0 може бути успішно застосований до програмування водоспоживання рослин кукурудзи у випадку коригування остаточних розрахунків. Подальші дослідження з цього напрямку дозволять визначити найбільш оптимальний коригуючий коефіцієнт моделі та забезпечити її практичне впровадження.

**Ключові слова:** калібрування, моделювання, нейронні мережі, похибка, регресійний аналіз.

#### Lykhovyd P.V., Sharii V.O. Programming grain corn water use in the irrigated conditions of the South of Ukraine by the means of CROPWAT 8.0

**Purpose.** To evaluate the accuracy of programming the gross water use of grain corn by the means of CROPWAT 8.0 software and to propose a calibration model for irrigated conditions of the South of Ukraine to improve the performance of this software.

**Methods.** We used data on the actual water use of grain corn, established in the field experiments of the Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine in 2019–2021 as a part of the study of agro-technological methods of the crop cultivation. The real volume of total water use was determined by the water balance method. The programmed value was established by the method of simulation modelling in the CROPWAT 8.0 software using in-field meteorological data. Using mathematical and statistical analysis methods, a comparison of the real and programmed volume of gross water use of grain corn was made. Calibration of CROPWAT 8.0 calculations is proposed using the regression model and the Tiberius artificial neural network using the error back-propagation algorithm (training in 1000 epochs, learning rate 0.80) is proposed.

**Results.** Pure calculations in CROPWAT 8.0 were found to require calibration, as the mean absolute percentage error reached 26.00%. The calibrated model made it possible to significantly (up to 6.42%) reduce the calculation error. The artificial neural network Tiberius showed a slightly better result (5.65% error). However, for practical purposes, the regression calibrated model is more important. The adjusted CROPWAT 8.0 model provides an average quality of curve fitting (coefficient of determination is 0.66), while the artificial neural network probably has the disadvantage of overfitting the data (coefficient of determination is 0.99).

**Conclusions.** CROPWAT 8.0 can be successfully applied to water use programming in corn plants, provided that the final calculations are adjusted. Further research in this direction will allow one to determine the most optimal corrective coefficient of the model and ensure its practical implementation.

**Key words:** calibration, modelling, neural networks, error, regression analysis.