

УДК 631.559.2: 633.174: 631.67 (477.72) [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-12](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-12)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТІ СОРГО ЗЕРНОВОГО НА ПІВДНІ УКРАЇНИ ЗАЛЕЖНО ВІД УМОВ ЗВОЛОЖЕННЯ ТА СОРТУ

Федорчук М., д-р. с.-г. наук, проф.,

e-mail: mfedorchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7028-0915>,

Миколаївський національний аграрний університет,

Лиховид П., канд. с.-г. наук, доц.,

e-mail: pavel.likhovid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0314-7644>,

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН,

Федорчук В., канд. с.-г. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0003-0253-9766>

Коваленко О., д-р. с.-г. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-2724-3614>

Гамаюнова В., д-р. с.-г. наук, проф., <https://orcid.org/0000-0002-4151-0299>

Хоненко Л., канд. с.-г. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-5365-8763>

Миколаївський національний аграрний університет

Анотація

У статті викладено результати математичного моделювання продуктивності зернового сорго, що вирощується на півдні України, за різних вхідних параметрів зволоження і тривалості вегетації сорту.

Метою дослідження є встановлення закономірностей формування врожаю сорго зернового за різного впливу досліджуваних факторів і ваги кожного з них у визначенні продуктивності культури.

Матеріали та методи. Математичні розрахунки виконували на основі дослідних даних, одержаних у рамках польових досліджень, виконаних у 2020 р. на базі Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН (колишній Інститут зрошуваного землеробства НААН). Польові дослідження проводили відповідно до вимог загальноприйнятих методик наукової роботи в агрономії. Схема двофакторного дослідження передбачала оцінку продуктивності сорго сортів Генічеський 209, Дніпровський 39, Вінець, Гранд, Ерітрея, Колор, Одеський 205, а також режимів зволоження – без зрошення (природне) та зі зрошенням дощуванням нормою 120 мм. Урожайність сорго зернового встановлювали за стандартною методикою з перерахунком залікової маси на вологість 14%. Статистичні розрахунки за узагальненими результатами польових дослідів, які включали в себе такі процедури, як розгорнутий регресійний аналіз, аналіз мультиколінеарності, похибки апроксимації, якості апроксимації, критерій Фішера; графічна оцінка якості моделі виконана в табличному процесорі Microsoft Excel 2019. Штучна нейронна мережа для оцінки важливості кожного фактора й продуктивності зернового сорго була створена, навчена, валідована та протестована в програмному комплексі JustNN.

Результати. За результатами математичного аналізу даних розроблено модель прогнозу врожайності сорго зернового виду $Y=9,6654-0,05648X_1+0,02029X_2$, де X_1 – тривалість вегетації від сходів до повної стиглості (діб), X_2 – зрошувальна норма (мм), множинний коефіцієнт детермінації – 0,6731, нормований коефіцієнт детермінації – 0,6136, стандартна похибка моделі – 0,989 т/га, похибка апроксимації (середня абсолютна похибка у відсотках) – 13,72%. Оцінка значення вхідних параметрів моделі в штучній нейронній мережі вказує на значно вищу силу впливу тривалості вегетації культури (сортна особливість) порівняно зі зрошенням: 7,7084 проти 2,3774 в абсолютних одиницях сили впливу фактора.

Висновки. Розроблена математична модель із достатньою точністю здатна прогнозувати врожайність зернового сорго на півдні України за параметрами тривалості вегетації культури та рів-

нем подачі штучної вологи, похибка апроксимації моделі становила 13,72 %. Сорт є більш вагомим фактором продуктивності культури порівняно зі зрошенням.

Ключові слова: зрошення, програмування врожаю, регресійний аналіз, сила впливу, штучна нейронна мережа.

Вступ. Сорго зернове (*Sorghum bicolor* L. Moench.) є п'ятою за важливістю зерновою культурою після рису, пшениці, кукурудзи та ячменю. Воно вважається перспективною фуражною та продовольчою культурою в ряді країн Америки, Африки, Австралії. Позитивні перспективи культура має і в Україні, особливо на півдні, де завдяки своїй унікальній стійкості до посухи здатна забезпечувати сталі врожаї зерна навіть у несприятливих за рівнем зволоження роки, коли основні зернові культури істотно знижують свою продуктивність. Окрім того, культура є солестійкою, що є надзвичайно актуальною позитивною рисою в районі дії Інгулецької зрошувальної системи, де ґрунти є слабо засоленими та слабо солонцюватими [Lykhovyd, Lavrenko, 2017; Lykhovyd, Kozlenko, 2018]. Сорго зернове є доволі пластичною культурою при вирощуванні його в умовах дефіциту вологи та високих температур повітря (навіть при тривалій повітряній і ґрунтовій посухах) порівняно з іншими культурами, наприклад, кукурудзою на зерно [Федорчук та ін., 2017; Федорчук, Пташинська, 2018]. Сорго є найбільш посухостійкою культурою порівняно з усіма зерновими, практично не зазнає пошкоджень від високих температур, є доволі теплолюбною культурою, може використовувати вологу й поживні речовини з таких шарів ґрунту, які іншим культурам недоступні, та має чи не найменший транспіраційний коефіцієнт — 300 одиниць [Петриченко, Лиховчвор, 2014]. Усі ці ознаки роблять сорго зернове практично ідеальною культурою для посушливого півдня України, особливо враховуючи універсальність напрямку використання — продовольче, кормове, енергетичне. Недарма ще на початку 80-х років XX століття українські науковці обґрунтували необхідність збільшення посівних площ під зернове сорго у пів-

денних регіонах України. Особливу увагу надано науковій раціоналізації такого шляху розвитку сектора рослинництва професором М. А. Шепелем, який довів, що в південних областях України площі під культурою потрібно збільшити до 1,8 млн га [Федорчук та ін., 2017]. Наразі сорго зернове залишається другорядною культурою, яка не є пріоритетною для агровиробників. Одним із обмежувальних факторів є недостатня вивченість сучасних аспектів агротехнології культури, а також недостатній рівень інформаційно-технологічного та консультативного забезпечення технології вирощування зернового сорго.

Метою роботи було вивчення особливостей формування продуктивності зернового сорго на півдні України залежно від умов зволоження та сортового складу культури та розроблення математичної моделі його врожайності залежно від реалізації досліджуваних факторів.

Методи і матеріали. Польовий дослід з агробіологічної оцінки перспективних сортів зернового сорго вітчизняної селекції за різних умов зволоження півдня України закладено та проведено в 2020 р. на дослідному полі Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН (колишній Інститут зрошуваного землеробства НААН) відповідно до вимог загальноприйнятих методик проведення досліджень в агрономії [Ушкаренко та ін., 2014].

Ґрунт дослідної ділянки — темно-каштановий, залишково солонцюватий, середньосуглинковий. Вміст гумусу в орному шарі ґрунту — 2,2 %, нітратного азоту — 1,2 мг/100 г ґрунту, рухомого фосфору — 3,0 мг/100 г ґрунту, обмінного калію — 40 мг/100 г ґрунту. Повторюваність дослідів — чотириразова, площа облікової ділянки — 40-50 м². Агротехніка у досліді — загальноприйнята для вирощування

зернового сорго в умовах півдня України (окрім досліджуваних факторів: фактор А — умови зволоження; фактор В - сорти). Попередником культури була пшениця озима.

У ході проведення досліду вивчалися перспективні районовані сорти селекції Інституту зернового господарства НААН — Генічеський 209, Дніпровський 39, Вінець, Гранд, Ерітрея, Колор і Селекційно-генетичного інституту НААН — Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення — Одеський 205. Режим зволоження — без зрошення (природне) та дощування нормою 120 мм (три поливи за сезон по 40 мм).

Насамперед сорти оцінювалися за тривалістю вегетаційного періоду (сортівна особливість, покладена в основу математичної моделі), здатністю протистояти негативним абіотичним і біотичним факторам навколишнього середовища, врожайністю та якістю зерна. Насіння висівалося у першій декаді травня після досягнення в 10-см шарі ґрунту температури $+12^{\circ}\text{C}$. У міжфазний період «кущення-викидання волоті» рослини сорго зернового двічі обприскувалися інсектицидом Карате Зеон (норма — 0,2 л/га) від злакової попелиці.

Фенологічні спостереження за культурою виконували згідно з рекомендаціями (Ушкаренко та ін., (2014)). Облік урожаю зерна виконувався суцільним методом способом прямого комбайнування. Залікову масу визначали перерахунком на стандартну вологість зерна 14 %.

Математичну модель продуктивності сорго зернового розроблено методом множинного регресійного аналізу з додатковим розрахунком таких статистичних параметрів, як мультиколінеарність, похибка апроксимації (середня абсолютна похибка у відсотках), якість апроксимації (критерій χ^2 за Фарраром-Глоубером), критерій Фішера згідно з міжнародними методиками математичної статистики [Moksony, Heged, 1990; Chatterjee, Hadi, 2013; De Myttenaere et al., 2016]. Графічна оцінка якості моделі виконана в таб-

личному процесорі Microsoft Excel 2019. Штучна нейронна мережа для оцінки ваги кожного фактора у продуктивності зернового сорго була створена, навчена, валідована та протестована в програмному комплексі JustNN. Нейронна мережа мала такі параметри: 3 шари нейронів, темп навчання (learning rate) — 0,80, імпульс (momentum) — 0,80, цільова похибка (target error) — 0,05. Нейронна мережа працює за алгоритмом зворотного поширення помилки [Vozhehova et al., 2019].

Результати та їхнє обговорення. Згідно з результатами польових досліджень, нами сформовано таблицю вхідних даних для побудови математичної моделі продуктивності сорго зернового в заліковій масі (табл. 1). Фактор сорту, виражений тривалістю періоду від сходів до повної стиглості культури, використаний як вхідний параметр X_1 , а умови зволоження, виражені у зрошувальній нормі в мм, — вхідний параметр X_2 .

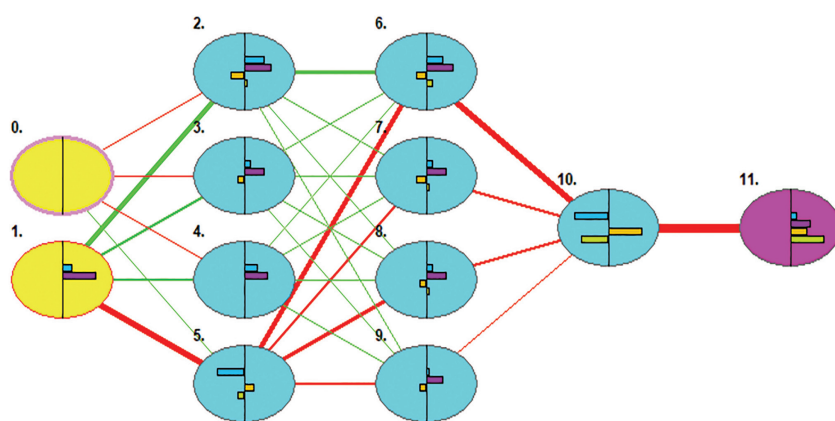
Блок-схема штучної нейронної мережі для оцінки ваги вхідних параметрів у визначенні врожайності культури наведено на рисунку 1. Тут вхідні параметри моделі позначені як 0 (сорт) та 1 (зрошувальна норма). Червоні та зелені лінії різної товщини штриха вказують на інтенсивність позитивного (зелений колір) та негативного (червоний колір) взаємного впливу параметрів вхідних нейронів на наступні шари та вихідний нейрон (позначений як 11). Лінії в межах нейронів мережі вказують на інтенсивність взаємного впливу факторів під час тренувального процесу моделі.

За результатами множинного регресійного аналізу дослідних даних сформовано модель: $Y = 9,6654 - 0,05648X_1 + 0,02029X_2$.

Установлено, що зі збільшенням тривалості вегетації сорту на 1 добу врожайність сорго зернового знижується на 0,05648 т/га, а зі збільшенням зрошувальної норми на 1 мм, урожайність культури відповідно зростає на 0,02029 т/га. Отже, зрошення є фактором росту продуктивності, водночас сорти з подовженим періодом вегетації (пізньостиглі) можуть стати фактором втрати продуктивності.

Таблиця 1 – Вхідні дані для побудови математичної моделі продуктивності сорго зернового залежно від умов зволоження та сорту

Умови зволоження (фактор А, Х2)	Сорт (фактор В, Х1)	Урожайність, т/га	Вологість зерна, %	Урожайність у заліковій масі, т/га	Тривалість вегетації від сходів до повної стиглості, діб
Природне	Дніпровський 39	2,7	12,4	2,74	110
	Одеський 205	3,4	11,2	3,50	110
	Генічеський 209	3,5	11,0	3,61	100
	Вінець	3,7	11,0	3,81	95
	Гранд	3,6	12,0	3,67	110
	Колор	3,9	14,2	3,89	110
	Ерітрея	4,5	11,0	4,64	105
Зрошення	Дніпровський 39	4,2	12,5	4,26	110
	Одеський 205	4,5	12,3	4,58	110
	Генічеський 209	6,2	11,6	6,35	100
	Вінець	6,5	11,5	6,66	95
	Гранд	6,9	13,4	6,94	110
	Колор	6,2	15,0	6,14	110
	Ерітрея	7,8	11,8	7,97	105

**Рисунок 1** – Блок-схема нейронної мережі для визначення ваги факторів зрошення та сорту в продуктивності сорго зернового

Парні коефіцієнти кореляції: R_{yx_1} становить -0,207, а R_{yx_2} склав 0,794. Це свідчить, що кореляційний зв'язок між тривалістю вегетації та продуктивністю сорго зернового є слабким і негативним, водночас як зі зрошенням – сильний і позитивний. Множинний коефіцієнт кореляції для моделі становив 0,82, коефіцієнт детермінації – 0,6731, а нормований коефіцієнт детермінації – 0,6136, що свідчить про достатню якість підгону кривої

моделі. Стандартна похибка розрахунку – 0,989 т/га.

Перевірка змінних на мультиколінеарність за методикою Фаррара-Глоубера за χ^2 свідчить про наявність мультиколінеарності: $\chi^2_{\text{факт}}$ становить $12,86 > \chi^2_{\text{табл}}(3,84)$ згідно з таблицею даних для 95 % рівня достовірності для вибірки з двома змінними та 14 парами даних.

Середня похибка апроксимації моделі становила 13,72 %, що є позитивним результатом, особливо враховуючи незначний обсяг вхідних даних.

Перевірка значущості моделі за критерієм Фішера свідчить, що рівняння регресійної моделі продуктивності сорго є статистично надійним, оскільки $F > F_{\text{кр}}$ ($11,32 > 3,98$), а коефіцієнти регресії та коефіцієнти детермінації є статистично істотними. Графічна апроксимація моделі показана на рисунку 2.

Оцінка значущості вхідних параметрів

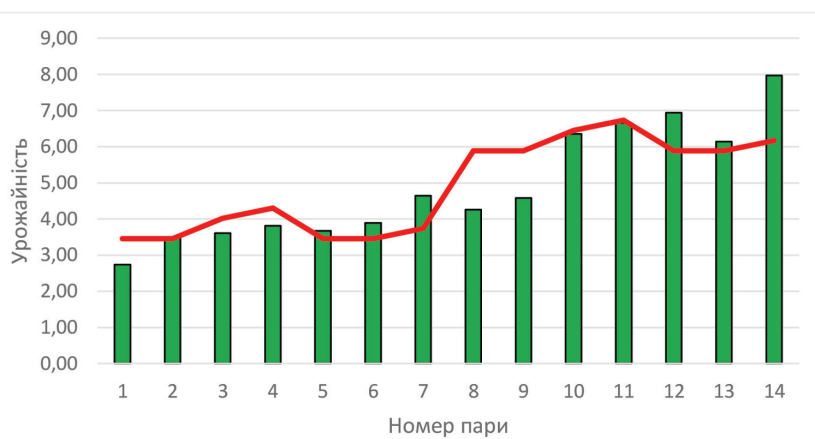
моделі в штучній нейронній мережі свідчить, що більш вагомим фактором формування продуктивності культури є тривалість вегетації сорту (7,7084 абсолютних одиниць), а зрощення має другорядну роль (2,3774 абсолютних одиниць). Отже, головну увагу варто приділяти раціональному підбору сортів культури задля досягнення максимальної продуктивності виробництва зерна сорго на півдні України.

Виконане нами дослідження та моделювання продуктивності сорго є черговим етапом у розширенні теоретичної обізнаності з особливостями продукційних процесів у соргових культур в умовах півдня України, а також є додатковим внеском у ряд уже розроблених і впроваджених у науково-практичний обіг математичних моделей продуктивності сільськогосподарських культур, які базуються на різних підходах до програмування продуктивності, що мають покращити планування виробництва продукції рослинництва на засадах кліматично орієнтованого та точного землеробства [Lykhovyd, 2019; Vozhehova et al., 2019; Vozhehova et al., 2020].

Висновки. Розроблено математичну модель продуктивності сорго зернового на півдні України залежно від сортових особливостей і режиму зволоження. Модель має достатню прогностичну точність, похибки прогнозу врожайності культури склтановлять 0,989 т/га (стандартна похибка) та 13,72 % (похибка апроксимації). У подальшому планується удосконалення математичної моделі розширенням набору вхідних даних і врахуванням додаткових параметрів продуктивності культури.

Перелік літератури

Петриченко, В. М., Лихочвор, В. В. (2014). Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур: навч. посібн. 4-е видання, виправлене. Львів,



Рисуюнок 2 – Графічна апроксимація моделі продуктивності сорго зернового залежно від умов зволоження та сорту

НВФ «Українські технології». 1040 с.

Ушкаренко, В. О., Голобородько, С. П., Вожегова, Р. А., Коковіхін, С. В. (2014). Методика польового дослід (зрощуване землеробство). Херсон, Грінь ДС.

Федорчук, М. І., Пташинська, О. В. (2018). Продуктивність сорго цукрового в умовах півдня України. Збірник тез наук. інтер. конф. «Інноваційні технології в рослинництві» (15 травня 2018 р.), Кам'янець Подільський, 194-197.

Федорчук, М. І., Коковіхін, С. В., Каленська, С. М. (2017). Науково-теоретичні засади та практичні аспекти формування еколого-безпечних технологій вирощування та переробки сорго в степовій зоні України: монографія. Херсон, ФОП Бояркін Д. М. 160 с.

Chatterjee, S., Hadi, A. S. (2013). Regression analysis by example. John Wiley & Sons.

De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. Neurocomputing, 192, 38-48.

Lykhovyd P. V., Kozlenko, Ye. V. (2018). Assessment and forecast of water quality in the River Ingulets irrigation system. Ukrainian Journal of Ecology, 8(1), 350-355.

Lykhovyd, P. V. (2019). A life factor approach to yield prediction: a comparison with a technological approach in reliability and accuracy. Journal of Ecological Engineering, 20(6), 177-183.

Lykhovyd, P. V., Lavrenko, S. O. (2017). Influence of tillage and mineral fertilizers on

soil biological activity under sweet corn crops. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(4), 18-24.

Moksony, F., Heged, R. (1990). Small is beautiful. The use and interpretation of R² in social research. *Szociolygiai Szemle*, Special issue, 130-138.

Vozhehova, R. A., Lykhovydyd, P. V., Kokovikhin, S. V., Biliaieva, I. M., Markovska, O. Ye., Lavrenko, S. O., Rudik, O. L. (2019a). Artificial neural networks and their implementation in agricultural science and practice. Warsaw, Diamond trading tour. 108 pp.

Vozhehova, R., Fedorchuk, M., Kokovikhin, S., Lykhovydyd, P., Nesterchuk, V., Mrynskii, I., Markovska, O. (2019). Modeling safflower seed productivity in dependence on cultivation technology by the means of multiple linear regression model. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 8-13.

Vozhehova, R., Maliarchuk, M., Biliaieva, I., Lykhovydyd, P., Maliarchuk, A., Tomnytskyi, A. (2020). Spring row crops productivity prediction using normalized difference vegetation index. *Journal of Ecological Engineering*, 21(6), 176-182.

References

Chatterjee, S., Hadi, A. S. (2013). Regression analysis by example. John Wiley & Sons.

De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing*, 192, 38-48.

Fedorchuk, M. I., Ptashynska, O. V. (2018). Sugary sorghum productivity in the conditions of the South of Ukraine. Proceedings of the conference «Innovative technologies in crop production» (May 15, 2018), Kamianets Podilsky, 194-197.

Fedorchuk, M. I., Kokovikhin, S. V., Kalenska, S. M. (2017). Scientific, theoretical bases and practical aspects of environmentally friendly cultivation technologies for sorghum processing in the Steppe zone of Ukraine: monograph. Kherson, FOP Boyarkin D. M. 160 pp.

Lykhovydyd P. V., Kozlenko, Ye. V. (2018). Assessment and forecast of water quality in the

River Ingulets irrigation system. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 350-355.

Lykhovydyd, P. V. (2019). A life factor approach to yield prediction: a comparison with a technological approach in reliability and accuracy. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6), 177-183.

Lykhovydyd, P. V., Lavrenko, S. O. (2017). Influence of tillage and mineral fertilizers on soil biological activity under sweet corn crops. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(4), 18-24.

Moksony, F., Heged, R. (1990). Small is beautiful. The use and interpretation of R² in social research. *Szociolygiai Szemle*, Special issue, 130-138.

Petrychenko, V. M., Lykhochvor, V. V. (2014). Plant science. Crops cultivation technologies: textbook. 4th edition, revised. Lviv, NVF «Ukrainski tekhnolohii». 1040 pp.

Ushkarenko, V. O., Holoborodko, S. P., Vozhehova, R. A., Kokovikhin, S. V. (2014). Field experiment methodology (irrigated agriculture). Kherson, Grin DS.

Vozhehova, R. A., Lykhovydyd, P. V., Kokovikhin, S. V., Biliaieva, I. M., Markovska, O. Ye., Lavrenko, S. O., Rudik, O. L. (2019a). Artificial neural networks and their implementation in agricultural science and practice. Warsaw, Diamond trading tour. 108 pp.

Vozhehova, R., Fedorchuk, M., Kokovikhin, S., Lykhovydyd, P., Nesterchuk, V., Mrynskii, I., Markovska, O. (2019). Modeling safflower seed productivity in dependence on cultivation technology by the means of multiple linear regression model. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 8-13.

Vozhehova, R., Maliarchuk, M., Biliaieva, I., Lykhovydyd, P., Maliarchuk, A., Tomnytskyi, A. (2020). Spring row crops productivity prediction using normalized difference vegetation index. *Journal of Ecological Engineering*, 21(6), 176-182.

UDC 631.559.2: 633.174: 631.67 (477.72)

MATHEMATICAL MODEL OF GRAIN SORGHUM YIELD DEPENDING ON WETTING CONDITIONS AND VARIETY IN THE SOUTH OF UKRAINE

Fedorchuk M., D-r Agr. Scs, prof.,

e-mail: mfedorchyk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7028-0915>,

Mykolaiv National Agrarian University

Lykhovyd P., Ph.D., Associate Prof.,

e-mail: pavel.likhovid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0314-7644>,

Institute of Climate Smart Agriculture of NAAS

Fedorchuk V., Ph.D., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0003-0253-9766>

Kovalenko O., Doctor, Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0002-2724-3614>

Gamayunova V., D-r Agr. Scs, Prof., <https://orcid.org/0000-0002-4151-0299>

Khonenko L., Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5365-8763>

Mykolaiv National Agrarian University

Summary

The article contains the results of mathematical modeling of grain sorghum yield in the South of Ukraine under different input parameters of wetting and growing season duration.

The purpose of the study is to establish the regulations of grain sorghum yield formation under the influence of the studied factors, and to determine the weight of each factor in the yield of this crop.

Materials and methods. Mathematical calculations were performed on the basis of experimental data, collected within the framework of the field trials conducted in 2020 at the Institute of Climate Smart Agriculture of NAAS (former Institute of Irrigated Agriculture of NAAS). The field trials were carried out with accordance to current standards of scientific work in agronomy. The scheme of two-factor trial embraced evaluation of sorghum varieties Genicheskyi 209, Dniprovskyi 39, Vinets, Grand, Eritreya, Kolor, Odeskyi 205, and wetting conditions – no irrigation (natural wetting) and overhead irrigation with the total volume of water about 120 mm. Grain sorghum yield was determined by the standard methodology with further recalculation of the grain weight to 14% moisture content. Statistical calculations based on the generalized data of the field trials included the procedure of advanced regression analysis, analysis of multicollinearity, calculation of approximation error, approximation quality, Fischer's criterion estimation, and visual assessment of the model quality, conducted using the tools of spreadsheet processor Microsoft Excel 2019. Artificial neural network for assessment of the weight of each studied factor in grain sorghum yield was created, trained, validated, and tested in JustNN software.

Results. As a result of mathematical data analysis, the following model of grain sorghum yield was developed $Y=9.6654-0.05648X_1+0.02029X_2$, where X_1 – growing season duration from emergence to maturity (days), X_2 – irrigation rate (mm), multiple determination coefficient – 0.6731, normed determination coefficient – 0.6136, standard deviation of the model – 0.989 t/ha, approximation error (mean absolute percentage error) – 13.72%. Weight assessment of the model inputs using the artificial neural network certifies about significant superiority of the crop growing season duration (varietal property) over irrigation: 7.7084 versus 2.3774 of absolute points.

Conclusions. The developed mathematical model is capable to provide reasonable grain sorghum yield prediction in the South of Ukraine using the parameters of growing season duration and irrigation rates, approximation error averaged to 13.72%. Variety is more influential factor in the crop productivity in comparison to irrigation.

Key words: irrigation, yield programming, regression analysis, influence power, artificial neural network.