



Агроекологія, радіологія, меліорація

УДК 551.5:631.671

© 2021

ВПЛИВ ЕКОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ТРАНСПІРАЦІЇ РОСЛИН ТОМАТА

О.В. Журавльов¹, А.П. Шатковський²

¹кандидат сільськогосподарських наук,

²доктор сільськогосподарських наук, член-кореспондент НААН

Інститут водних проблем і меліорації НААН, вул. Васильківська, 37, м. Київ, 03022, Україна

e-mail: ¹zhuravlov_olexandr@ukr.net, ²andriy-1804@ukr.net

ORCID: ¹0000-0001-7035-219X, ²0000-0002-4366-0397

Надійшла 05.02.2021

Мета. Вивчити вплив екологічних чинників на інтенсивність транспірації рослин томата та побудувати модель інтенсивності транспірації на основі множинної лінійної регресії (MLR). **Методи.** Загальнонаукові: вегетаційний, лабораторний, вимірювально-розрахунковий та математично-статистичний аналіз. **Результати.** Установлено, що між інтенсивністю транспірації рослин томата сонячною радіацією, відносною вологістю повітря та температурою повітря спостерігається тісний кореляційний зв'язок, коефіцієнти кореляції відповідно дорівнюють 0,99, 0,96 та 0,94. Інтенсивність транспірації збільшується лінійно з підвищенням сонячної радіації і температури повітря та знижується з підвищенням відносної вологості повітря. Максимальних значень інтенсивність транспірації досягала 0,12 та 0,14 год, і відповідно становила 538,1 та 574,1 г/м²-год, а в проміжок між 12 та 14 годиною спостерігалася полуденна депресія транспірації. На основі множинної лінійної регресійної отримали модель інтенсивності транспірації рослин томата протягом доби з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,91$, стандартна похибка $S_{Tr}=27,5$. Проведено комплексний статистичний аналіз отриманої моделі, який підтверджує, що отримана модель є статистично значима з достовірністю 95 % та підтверджує гіпотезу про вплив кліматичних чинників на інтенсивність транспірації рослин томата. Середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE) становить 7,4 %. **Висновки.** На основі проведених досліджень підтверджено добову періодичність інтенсивності транспірації рослин томата і лінійну залежність інтенсивності транспірації від дії сонячної радіації, температури та відносної вологості повітря. На основі множинної лінійної регресійної моделі встановлено вплив екологічних чинників на інтенсивність транспірації. Найбільший вплив на інтенсивність транспірації томата здійснює сонячна радіація, а найменший — температура повітря, стандартизовані коефіцієнти регресії відповідно дорівнюють 1,169 та 0,028. Проведений комплексний статистичний аналіз підтвердив високу точність отриманої моделі: похибка MAPE менше 10 %.

Ключові слова: сонячна радіація, температура повітря, відносна вологість, множинна лінійна регресія, статистичний аналіз, середня абсолютна відсоткова похибка

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202103-08>

Зовнішні умови навколишнього середовища не тільки регулюють ступінь відкриття продихів, а й впливають безпосередньо на процес транспірації. Спостереження за інтенсивністю транспірації має велике значення при розрахунках потреби рослин у воді, зокрема при зрошенні. Знаючи величину площі листової поверхні можна розрахувати необхідну кількість води, яку треба компенсувати. Інтенсивність, з якою відбувається транспірація, відноситься до кількості води, втраченої рослинами за певний період часу. Рослини регулюють швидкість транспірації способом відкриття і закриття продихів [1, 2]. Існує сукупність зовнішніх факторів, які впливають на інтенсивність транспірації, а саме: температура повітря, інтенсивність сонячної радіації, вологість повітря і швидкість вітру [3, 4]. Температура впливає на швидкість транспірації двома способами. *По-перше*, за вищих температур молекули води рухаються швидше, тому швидкість випаровування з продихів прискорюється; *по-друге*, вологоємність теплого повітря — більша, ніж у холодного [1, 3, 4]. За високої інтенсивності сонячної радіації швидкість фотосинтезу зростає. Зі збільшенням фотосинтезу кількість накопиченої глюкози у захисних клітинах збільшується, це знижує водний потенціал листа. Коли водний потенціал зменшується, більше води потрапляє в захисні клітини, зміцнюючи їх, тургорний тиск захисних клітин спричиняє відкриття продихів, що призводить до транспірації [1, 3, 4]. За високої вологості повітря градієнт водного потенціалу між внутрішньою частиною продихів листа і атмосферою є невеликим, і швидкість транспірації буде низькою. Якщо повітря сухе, між вологістю всередині продихів і зовнішнім повітрям буде крутий градієнт концентрації води, тому швидкість транспірації буде високою. Коли вода втрачається з листа, вона утворює тонкий шар на його поверхні. Це зменшує водний потенціал між листом і атмосферою зовні. За наявності

вітру, цей шар здувається, зберігаючи градієнт водного потенціалу через лист [1, 3, 4].

Значну увагу науковці приділяють питанню побудови моделей транспірації тепличних культур. В основі таких моделей — зв'язок сонячної радіації, дефіциту тиску водяних парів, відносною вологості і температури повітря та інші фактори [4–11]. Фактори навколишнього середовища та росту рослин є важливими чинниками, які впливають на інтенсивність транспірації сільськогосподарських культур, але через складну природу взаємозв'язків важко використовувати їх для оцінки інтенсивності транспірації. Із метою встановлення впливу метеорологічних факторів на інтенсивність транспірації рослин застосовують метод множинної лінійної регресії (MLR) та штучних нейронних мереж (ANNs) [6, 7, 10, 12, 13]. Науковцями [6, 7] встановлено, що найбільше з транспірацією рослин корелює сонячна радіація та дефіцит тиску водяних парів. Дослідження [6, 9] виявили, що для тепличних томатів високий рівень вологості повітря та низький рівень світла пригнічують транспірацію і це призводить до втрати врожаю. Інтенсивність транспірації збільшується лінійно з підвищенням сонячної радіації, дефіцит тиску водяних парів, швидкості повітря [6, 7, 9, 11, 14] температура повітря та концентрація вуглекислого газу істотно не впливають [9]. Збільшення сонячної радіації на $1 \text{ МДж м}^{-2}\cdot\text{доб}^{-1}$ призводить до підвищення транспірації молодій рослині томата на $0,09 \text{ мм}\cdot\text{доб}^{-1}$, а підвищення дефіциту тиску водяних парів на $0,1 \text{ кПа}$ — підвищує транспірацію на $0,013 \text{ мм}\cdot\text{доб}^{-1}$ [6, 9].

Як показав аналітичний огляд, питанню впливу екологічних чинників на інтенсивність транспірації рослин у польових умовах приділено мало уваги, а дослідження в умовах Степу України не здійснювалися. Відмінність і новизна проведених нами досліджень полягає у визначенні інтенсивності транспірації рослин томата у польових виробничих умовах.

Мета досліджень полягає у вивченні впливу екологічних чинників на інтенсивність транспірації рослин томата і побудові моделі інтенсивності транспірації на основі множинної лінійної регресії.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили за методикою вегетаційних досліджень Н.К. Киршина [15] протягом 2016–2020 рр. на землях ДП «ДГ «Брилівське» (с. Привітне Олешківського р-ну Херсонської обл., Степ Сухий) ІВПіМ НААН. Для усунення фізичного випаровування з поверхні ґрунту вегетаційні посудини було герметизовано плівкою. Вивчали вплив екологічних чинників на інтенсивність транспірації рослин томата. Для досліді використовували ранньостиглий гібрид томата Н1015F1, на час спостережень вік рослин становив 26 днів від висаджування розсади, а площа листової поверхні 1 рослини — 0,165 м². Транспірацію визначали ваговим методом [4, 6, 11, 12, 14], для зважування використовували лабораторні ваги «Техноваги» ТВЕ-60-1, клас точності II (ДСТУ EN45501). З 5 по 20 год зважування вегетаційних посудин із рослинами проводили кожні 20 хв., вночі зважували 1 раз на год. Площу поверхні листів визначали за методикою А.О. Ничипоровича [16]. Спостереження за метеопараметрами проводили безпосередньо на дослідній ділянці за допомогою метеостанції iMetos,

яка обладнана датчиками температури та відносної вологості повітря, сонячної радіації, швидкості вітру, опадоміром. Інтервал реєстрації метеоданих становив 20 хв.

Інтенсивність транспірації визначали як відношення кількості води, що рослина випаровувала за 1 год до площі листової поверхні в 1 м² [17].

Результати досліджень та їх обговорення. За результатами спостережень встановлено, що протягом доби інтенсивність транспірації томата неоднакова. Так, з 0 до 7 год та з 20 до 24 год інтенсивність транспірації не перевищувала 40 г/м²-год і в середньому за цей період становила 30 г/м²-год. З 7 до 20 год інтенсивність транспірації зростала, порівняно з нічними годинами, і була в межах 126–574 г/м²-год, а середнє її значення збільшувалось у 12 разів. Максимальних значень інтенсивність транспірації досягала о 12 та 14 год, і відповідно становила 538,1 та 574,1 г/м²-год. У проміжок між 12 та 14 год інтенсивність транспірації знижувалась, й о 12⁴⁰ і 13²⁰ відповідно становила 427,8 та 450,0 г/м²-год (рис. 1). Ці спостереження підтверджують, що у полуденні години закривання продихів відбувається у результаті дії механізму гідроактивного регулювання [2].

Між інтенсивністю транспірації рослин томата, сонячною радіацією, відносною вологістю повітря та температурою повітря

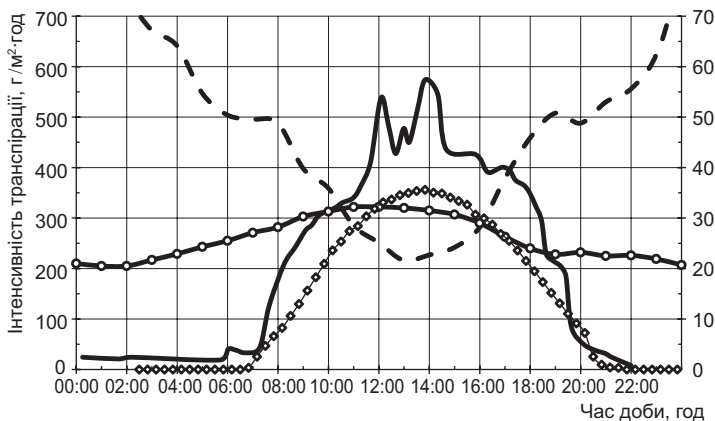


Рис. 1. Динаміка інтенсивності транспірації, температури повітря, відносної вологості повітря та сонячної радіації протягом доби: — — — інтенсивність транспірації, г/м²-год; —◆— сонячна радіація, МДж/м²-год; — — — відносна вологість повітря, %; —○— температура повітря, °С

спостерігається тісний зв'язок, на що вказують попарні коефіцієнти кореляції, які відповідно дорівнюють 0,99, 0,96 та 0,94. Зв'язок інтенсивності транспірації томата з кліматичними параметрами, що досліджувалися апроксимується лінійною функцією (рис. 2–4).

Для визначення сумісного впливу температури повітря, відносної вологості повітря та сонячної радіації на інтенсивність транспірації томата використовували кореляційно-регресійний аналіз на основі рівняння множинної лінійної регресії [6, 7, 10, 12, 13, 18]. Завдяки цьому методу можна не тільки створювати прогностичні та імітаційні моделі, а й виконувати оцінку впливу кожного фактора, який включено до моделі.

За результатами кореляційно-регресійного аналізу даних отримали модель

залежності інтенсивності транспірації рослин томата протягом доби від екологічних чинників:

$$\text{Trate} = 1,364 \cdot \text{Tair} + 3,136 \cdot \text{Rh} + 156,762 \cdot \text{Rs} - 178,186 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год} \quad (1)$$

$$R^2 = 0,91; S_{\text{Tr}} = 27,5,$$

де Trate — інтенсивність транспірації, $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$; Tair — температура повітря, $^{\circ}\text{C}$; Rh — відносна вологість повітря, %; Rs — сонячна радіація, $\text{МДж/м}^2 \cdot \text{год}$; R^2 — коефіцієнт детермінації; S_{Tr} — стандартна похибка.

Перевірка адекватності рівняння регресії (табл. 1) за критерієм Фішера [18] підтверджує, що отримане рівняння є статистично значиме з достовірністю 95% і підтверджує гіпотезу про вплив температури повітря, відносної вологості повітря та сонячної радіації на інтенсивність транспіра-

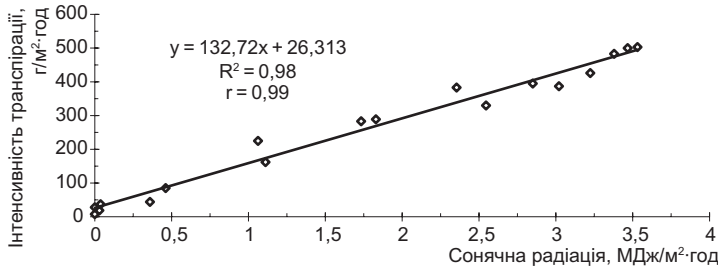


Рис. 2. Залежність інтенсивності транспірації томата від сонячної радіації

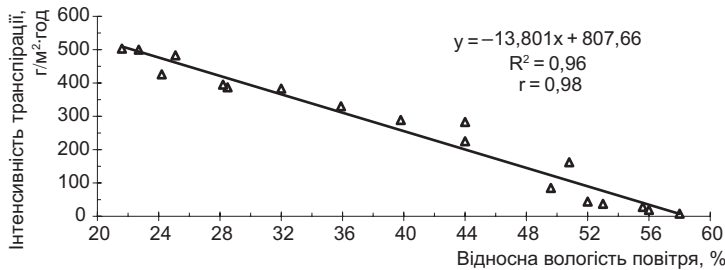


Рис. 3. Залежність інтенсивності транспірації томата від відносної вологості повітря

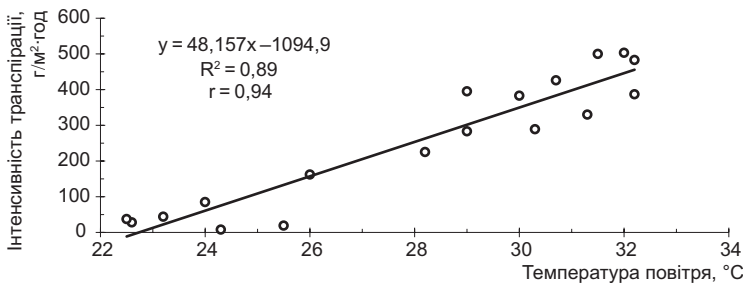


Рис. 4. Залежність інтенсивності транспірації томата від температури повітря

1. Дисперсійний аналіз рівняння

Показник	Ступінь свободи, df	Сума квадратів, SS	Середній квадрат, MS	Критерій Фішера	
				Fфакт	Fтеор
Регресія	3	551812,4	183937,5	242,3	3,2
Залишок	14	10625,6	759,0	—	—
Всього	17	562438,0	—	—	—

2. Дані регресійної статистики

Незалежна перемінна	Коефіцієнти	Стандартна похибка	t-критерій	p-значення (α)
Y-пересічення	-178,186	187,210	-2,159	0,035
Tair	1,364	3,743	2,198	0,008
Rh	3,136	2,418	2,357	0,002
Rs	156,762	19,940	6,535	0,0004

3. Стандартизовані коефіцієнти регресії

Статистичні характеристики	Trate, г/м ² -год	Tair, °C	Rh, %	Rs, МДж/м ² -добу
Стандартне відхилення	181,9	3,7	12,2	1,3
Коефіцієнти регресії	—	1,364	3,136	156,762
Стандартизовані коефіцієнти регресії	—	0,028	0,211	1,169

ції рослин томата. Виконується нерівність $F_{\text{факт}} > F_{\text{теор}}$ ($242,3 > 3,2$).

Перевірка адекватності коефіцієнтів регресії (табл. 2) за критерієм Стьюдента (*t*-критерій) та рівнем достовірності (*p*-значення) [18] вказує, що всі отримані коефіцієнти рівняння є статистично значимі з достовірністю 95%. Розрахований *t*-критерій для всіх коефіцієнтів рівняння — більший за табличне значення ($t_{0,05} = 2,110$ при $n = 17$). Рівень достовірності розрахованих коефіцієнтів — менший за 0,05.

Для виявлення фактора, який найбільше впливає на інтенсивність транспірації томата застосовували метод порівняння стандартизованих коефіцієнтів регресії [18] (табл. 3). За цим методом коефіцієнти регресії перераховуються в умовні одиниці. Чим більший стандартизований коефіцієнт регресії тим більший його вплив на фактор, що аналізується. У досліджуваному випадку найбільший вплив на інтенсивність транспірації томата здійснює сонячна радіація, а найменший — температура повітря;

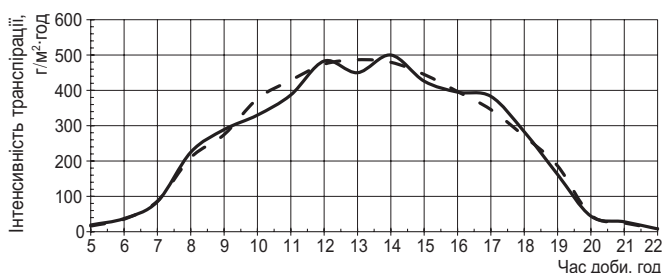


Рис. 5. Експериментальна та розрахована інтенсивність транспірації томата: — — експериментальна; - - - розрахована

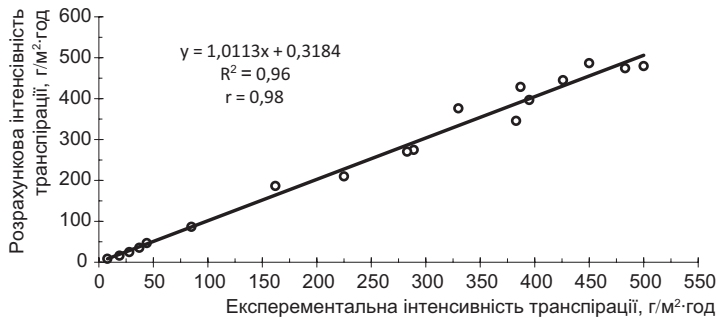


Рис. 6. Зв'язок між експериментальною та розрахунковою інтенсивністю транспірації за допомогою лінійного рівняння

стандартизовані коефіцієнти регресії відповідно дорівнюють 1,169 та 0,028.

Для візуального відображення результатів розрахунку за формулою на рис. 5 наведено експериментальну та теоретичну інтенсивність транспірації томата. Середнє арифметичне значення, стандартне відхилення експериментальних і розрахованих даних за моделлю 1 відповідно становлять 254,8; 181,9 та 255,1; 181,4. Для встановлення точності отриманої моделі було

розраховано середню абсолютну відсоткову похибку (MAPE) [19], яка становить 7,4% та виконано розрахунок точності прогнозу моделі, який становить 92,6%. Похибка MAPE отриманої моделі менше 10%, що відповідає високій точності отриманої залежності.

На рис. 6 наведено зв'язок між експериментальною і теоретичною інтенсивністю транспірації за допомогою лінійного рівняння.

Висновки

На основі проведених досліджень підтверджено добову періодичність інтенсивності транспірації рослин томата та її лінійну залежність від дії сонячної радіації, температури та відносної вологості повітря. На основі множинної лінійної регресійної моделі встановлено вплив екологічних чинників на інтенсивність транспірації. Найбільший

вплив на інтенсивність транспірації томата здійснює сонячна радіація, а найменший — температура повітря, стандартизовані коефіцієнти регресії відповідно дорівнюють 1,169 та 0,028. Проведений комплексний статистичний аналіз підтвердив високу точність отриманої моделі, похибка MAPE — менше 10%.

Zhuravlov O.¹, Shatkovskiy A.²

Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS, 37, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine; e-mail: ¹zhuravlov_olexandr@ukr.net, ²andriy-1804@ukr.net; ORCID: ¹0000-0001-7035-219X, ²0000-0002-4366-0397

Influence of environmental factors on the intensity of tomato plant transpiration

Goal. To study the influence of environmental factors on the transpiration intensity of tomato plants and to build a model of transpiration intensity based on the multiple linear regression (MLR). **Methods.** General scientific: vegetation, laboratory, measurement-calculation, and mathematical-statistical

analysis. **Results.** It was found that there was a close correlation between the intensity of transpiration of tomato plants by solar radiation, relative humidity, and air temperature, the correlation coefficients are 0.99, 0.96, and 0.94, respectively. The intensity of transpiration increases linearly with increasing solar radiation and air temperature and decreases with increasing relative humidity. The maximum values of transpiration intensity were at 12 and 14 h, and reached 538.1 and 574.1 g/m²·h, respectively, and between 12 and 14 h there was a noon depression of transpiration. Based on multiple linear regression, they obtained a model of transpiration intensity of tomato plants during the day with a coefficient of determination R²=0.91, standard error

$S_{tr}=27.5$. A comprehensive statistical analysis of the obtained model was performed, which confirmed that the obtained model was statistically significant with a reliability of 95% and confirmed the hypothesis of the influence of climatic factors on the intensity of transpiration of tomato plants. The average absolute percentage error (AAPE) was 7.4%. **Conclusions.** Based on the conducted researches the daily periodicity of transpiration intensity of tomato plants and linear dependence of transpiration intensity on the action of solar radiation, temperature, and relative humidity of air is confirmed. The influence of ecological factors on the intensity of

transpiration is established based on a multiple linear regression model. The greatest influence on the intensity of tomato transpiration has solar radiation, and the smallest — air temperature, standardized regression coefficients are equal to 1.169 and 0.028, respectively. The conducted comprehensive statistical analysis confirmed the high accuracy of the obtained model: the AAPE error is less than 10%.

Key words: solar radiation, air temperature, relative humidity, multiple linear regression, statistical analysis, average absolute percentage error.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202103-08>

Бібліографія

1. Максимов Н.А. Краткий курс физиологии растений. Изд. 9-е, перераб. и доп. М.; Л.: Сельхозгиз. Ленингр. отд-ние, 1958. 562 с.
2. Макрушин М.М., Макрушина Е.М., Петерсон Н.В., Мельников М.М. Физиология растений: підруч.; за ред. професора М. М. Макрушина. Вінниця: Нова Книга, 2006. 416 с.
3. Серякова Л.П. Метеорологические условия и растения. Л., 1971. 77с.
4. Rony Wallach, Noam Da-Costa, Michael Raviv, Menachem Moshelion Development of synchronized, autonomous, and self-regulated oscillations in transpiration rate of a whole tomato plant under water stress. *Journal of Experimental Botany*. 2010. V. 61 (12). P. 3439–3449. doi.org/10.1093/jxb/erq168
5. Boulard T., Jemaa R. Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Hort.* 1993. № 335. P. 381–388. doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.335.46
6. Halil Kirnak, Ted H. Short, Hansen R.C. Studies on the relationships among moisture tension, microclimate and transpiration rate of container grown *Acer rubrum*. *J. Appl. Hort.* 2002. № 4(2). P.65–69. <http://horticulture-research.net/pdf/Acerubram.pdf>
7. Halil Kirnak, Ted H. Short. Dynamic Transpiration of a Greenhouse Grown Potted New Guinea Impatiens. *Tarim Bilimleri Dergisi*. 2001. №7(3). P. 13–20 doi.org/10.1501/Tarimbil_0000000641
8. Jolliet O. Hortitrans, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1994. V. 57(1). P. 23–37. doi.org/10.1006/jaer.1994.1003
9. Jolliet, O., Bailey B.J. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agr. Forest Meteorol.* 1992. V. 58. P. 43–62. doi.org/10.1016/0168-1923(92)90110-P
10. Katsoulas N., Stanghellini C. Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy*. 2019. № 9(7). P. 392. doi.org/10.3390/agronomy9070392
11. Young Bae Choi, Jong Hwa Shin. Development of a transpiration model for precise irrigation control in tomato cultivation. *Scientia Horticulturae*. 2020. V. 267. №109358. doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109358
12. Du Sung Nam, Taewon Moon, Joon Woo Lee, Jung Eek Son. Estimating transpiration rates of hydroponically-grown paprika via an artificial neural network using aerial and root — zone environments and growth factors in greenhouses. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 2019. № 60. P. 913–923. doi.org/10.1007/s13580-019-00183-z
13. Shirgure P.S. Evaporation modeling with multiple linear regression techniques — a review. *Scientific Journal of Review*. 2012. № 1(6). P.170–182. URL: <https://www.researchgate.net/publication/295502806>
14. Leperen W. Van, Madery H. A new method to measure plant water uptake and transpiration simultaneously. *Journal of Experimental Botany*. 1994. V. 45 (1). P. 51–60. <https://doi.org/10.1093/jxb/45.1.51>
15. Куршин Н.К. Методика эксперимента: Вегетационный метод. Свердловск: УрГУ, 1989. 56 с.
16. Ничипорович А.А., Кузьмин З.Е., Полозова Л.Я. Методические указания по учету и контролю важнейших показателей процессов фотосинтетической деятельности растений. М.: 1969. 93 с.
17. Практикум по физиологии растений; под. ред. Н.Н. Третьякова — 3-е изд. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
18. Бараз В.Р. Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005. 102 с.
19. Shcherbakov M.V., Brebels A., Shcherbakova N.L. and others. A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Sciences Journal*. 2013. № 24. P. 171–176. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.80032