



Агроекологія, радіологія, меліорація

УДК 631.671:635.64

© 2023

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОЇ ЕВАПОТРАНСПІРАЦІЇ ТОМАТІВ РОЗРАХУНКОВИМИ МЕТОДАМИ

І.О. Коваленко¹, О.В. Журавльов²

²доктор сільськогосподарських наук

Інститут водних проблем і меліорації НААН

вул. Васильківська, 37, м. Київ, 03022, Україна

e-mail: ¹igorok333@ukr.net, ²zhuravlov.olexandr@gmail.com

ORCID: ¹0000-0003-1548-3992, ²0000-0001-7035-219X

Надійшла 26.06.2023

Мета. Визначити фактичну евапотранспірацію томатів розсадних розрахунковими методами і на підставі отриманих результатів запропонувати оптимальний водний режим ґрунту залежно від фаз розвитку рослин. **Методи.** Короткотермінові польові дослідження проводили в Херсонській обл. (підзона Степу Сухого) протягом 2019–2021 рр. Метрологічні показники визначали за допомогою метеостанції iMetos IMT 300. Використовували аналітичні та математичні (розділи прикладної математики) методи обробки експериментальних даних: комбінований метод Пенмана–Монтейта, методи Д.Л. Монтейта, Будико та Пенмана–Монтейта. **Результати.** Розрахунки фактичної евапотранспірації томатів (ET_{ϕ}) різними методами підтвердили, що процес протікає переважно з 7 по 20 год і за цей час випаровується 95–96% добової кількості вологи. Максимальні значення фактичної й еталонної (ET_0) евапотранспірації – 1,44–1,97 мм/год та 0,94 мм/год – фіксували з 12 по 15 год, а мінімальні – після заходу сонця. Прослідковується реакція рослин на зміну факторів навколишнього середовища. Так, за дефіциту тиску парів повітря 5,2 мб швидкість сокоруху по ксилемі становила 0,9 від. од., а ET_{ϕ} залежно від використовуваного методу – 4,4–6,6 мм/доб. За дефіциту тиску парів повітря 16,2 мб швидкість сокоруху по ксилемі зменшувалася до 0,5 від. од., а ET_{ϕ} залежно від використовуваного методу підвищувалася до 9,6–14,2 мм/доб. Коефіцієнт кореляції між швидкістю сокоруху по ксилемі та ET_{ϕ} становив 0,68–0,71. За середніх метеорологічних умов і використання методів Пенмана–Монтейта, Монтейта та Будико похибка MAPE становила 8%, 19 та 28% відповідно. У разі несприятливих метеорологічних умов і застосування методів Пенмана–Монтейта та Монтейта вона підвищувалася до 48–49%, а за методу Будико майже не змінювалася і становила 27%. Аналіз добової динаміки евапотранспірації томатів показує, що всі вибрані методи однаково реагують на зміну кліматичних показників. Розраховано похибки MAPE та RMSE визначення ET_{ϕ} за фазами розвитку томатів. У середньому за вегетаційний період використані методи дали похибку MAPE 16,2–19,7% (добра точність визначен-

ня ET), а $RMSE$ — 2,0–2,3 мм. Найменші похибки спостерігали за використання методу Пенмана–Монтейта, а найбільші — методу Монтейта. Із застосуванням зазначених розрахункових методів також обчислили коефіцієнти культури томата K_c . У середньому за вегетаційний період похибка $MAPE$ при цьому залежно від методу становила 13,3–17,4%, а похибка $RMSE$ — 0,29–0,30. **Висновки.** На підставі результатів досліджень підтверджено можливість використання комбінованого методу Пенмана–Монтейта, методів Монтейта та Будико для визначення фактичної евапотранспірації томатів розсадних без застосування додаткових коефіцієнтів. Установлено, що за несприятливих метеорологічних умов розрахункові методи не враховують захисної дії рослини, а тому завищують фактичне значення ET_{ϕ} на 30–60%. Комплексний статистичний аналіз підтвердив добру точність визначення ET_{ϕ} та K_c обраними методами: похибка $MAPE$ за вегетаційний період перебувала в межах 10–20%, а похибка $RMSE$ — 2,0–2,3 мм та 0,29–0,30 відповідно.

Ключові слова: коефіцієнт культури, ксилема, дефіцит тиску парів повітря, методи Пенмана-Монтейта, Монтейта, Будико.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202308-07>

Томати (*Solanum lycopersicom* L.) — розповсюджена овочева культура, близько 75% плодів якої споживають у свіжому вигляді, а решту відправляють на переробку. За даними FAO, у світі томати займають перше місце серед овочевих культур за площею вирощування — вона сягає близько 4 млн га [1]. В Україні томати культивують на площі близько 80 тис. га, що становить 20% усіх земель під овочевими [2]. На Півдні України це найпоширеніша овочева культура. Томати належать до сільськогосподарських культур з високим — 5–5,5 тис. м³/га рівнем сумарного водоспоживання [3]; вони також вимогливі до водного режиму ґрунту, особливо в період масового плодоутворення. При вирощуванні томатів вологість ґрунту слід підтримувати на рівні не нижче 80% НВ. Нестача вологи, як і перезволоження, негативно впливають на ріст і розвиток рослин та значно знижують врожайність [4].

Для визначення режимів поливів застосовують досить багато методів [5]. Для управління водним режимом ґрунту широко використовують розрахункові методи, що враховують різноманітні метеорологічні фактори [6]. Теоретичною основою для застосування розрахункових методів є те, що евапотранспірація сільськогосподарських культур за достатньої вологості ґрунту залежить від біологічних особливостей рослини

та впливу фізичних факторів випаровування [7, 8]. Застосування сучасного обладнання для виміру метеорологічних факторів [9] та фізіологічних параметрів рослин [10] з інтервалом в годину та менше дає змогу використовувати комплексні розрахункові методи, що враховують значну кількість метеорологічних елементів та біологічні особливості рослин [7, 11, 12]. Найбільшого розповсюдження набули методи, за допомогою яких спочатку визначається потенційна евапотранспірація, а потім, із застосуванням різноманітних коефіцієнтів, — фактична. Точність таких методів залежить від вибраних коефіцієнтів. Також існують розрахункові методи, що дають можливість визначити фактичну евапотранспірацію сільськогосподарських культур без використання додаткових коефіцієнтів [13–18].

Мета досліджень — визначити фактичну евапотранспірацію томатів розсадних розрахунковими методами і на підставі отриманих даних сформувавши оптимальний водний режим ґрунту залежно від фаз росту культури.

Матеріали та методи досліджень. Польові експериментальні дослідження проводили впродовж 2019–2021 рр. у виробничих умовах на землях ПП «Органік Системс», що входить до групи компаній Agrofusion (с. Балтазарівка Чаплинського р-ну

Херсонської обл., підзона Сухого Степу, 46°40' пн. ш., 33°35' сх. д.).

Ґрунт дослідно-виробничої ділянки — темно-каштановий, малогумусний (1,7–1,9%), НВ для шару ґрунту 0–50 см становить 25,8% від абсолютно сухого ґрунту, щільність складання — 1,35 г/см³. Забір води для зрошення здійснювали з Чаплинського каналу (Чаплинська зрошувальна система, живлення з Північно-Кримського каналу, вода р. Дніпро). Для проведення дослідів використовували ранньостиглий гібрид томата Melman F1 Organic для комбайнового збирання, який вирощували в системі органічного землеробства. Схема посадки — 1,50 × 0,25 м. Для поливу застосовували підґрунтове краплинне зрошення, глибина закладання поливних трубопроводів становила 0,25 м. Для спостереження за метеорологічними параметрами під час проведення досліджень використовували розташовану безпосередньо на дослідній ділянці автоматичну інтернет-метеорологічну станцію iMetos IMT 300 [19] від компанії Pessl Instruments [10]. Метеостанція обладнана датчиками температури повітря, вологості повітря, сонячної радіації, швидкості вітру, опадоміром. Температуру рослин томата вимірювали датчиком LT-1z, відносну швидкість сокоруху по ксилемі — датчиком SF-4z; обидва прилади підключали до фітомонітору PM-11z від компанії Bio-Instrument S.R.L. [10].

Досліджували точність визначення фактичної евапотранспірації томатів чотирма методами, що належать до розділу прикладної математики, підрозділ фізична математика.

1. Із застосуванням комбінованого методу Пенмана—Монтейта, за допомогою якого можна розраховувати фактичну евапотранспірацію будь-якої культури за специфічного поверхневого та аеродинамічного опорів [7]:

$$ET = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_{ar} \cdot C_p \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot \left[1 + \frac{r_c}{r_a} \right]} \quad (\text{мм/год}), \quad (1)$$

де Δ — градієнт кривої тиску пари, кПа/°С; R_n — чиста радіація на поверхні рослин, МДж/м²·год; G — щільність теплового

поток ґрунту, МДж/м²·год; ρ_{ar} — щільність повітря за постійного тиску, кг/м³; C_p — питома теплоємність повітря за постійного тиску, $C_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$ МДж/кг·°С; e_s — тиск насиченої пари повітря, кПа; e_a — фактичний тиск пари повітря, кПа; γ — психометрична константа, кПа/°С; r_a — аеродинамічний опір, /м; r_c — опір сумарної поверхні рослини, $r_c = 45$ с/м [8]; λ — прихована теплота випаровування, $\lambda = 2,45$ МДж/кг.

2. За допомогою методу Д.Л. Монтейта, виведеного з енергетичного балансу рослинного покриву [8]:

$$ET = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\rho_{ar} \cdot C_p \cdot (e_c^* - e_A)}{\gamma \cdot (r_a + r_c)} \quad (\text{мм/год}), \quad (2)$$

де ρ_{ar} — щільність повітря за постійного тиску, кг/м³; C_p — питома теплоємність повітря за постійного тиску, $C_p = 1013$ Дж/кг·°С; e_c^* — тиск насиченої пари повітря за температури рослини, Па; e_A — фактичний тиск пари повітря, Па; γ — психометрична константа, Па/°С; r_a — аеродинамічний опір, с/м; r_c — опір сумарної поверхні рослини, $r_c = 45$ с/м [8]; λ — прихована теплота випаровування, $\lambda = 680,55$ Вт/кг.

3. Із використанням методу теплового балансу М.І. Будико для оптимально зволоженої поверхні [11]:

$$ET = \rho_{ar} \cdot D \cdot (e_s - e_a) \cdot 60 \quad (\text{мм/год}), \quad (3)$$

де ρ_{ar} — щільність повітря за постійного тиску, г/см³; D — коефіцієнт зовнішньої дифузії, $D = 0,60$ см/с; e_s — тиск насиченої пари повітря за температури поверхні, що випаровує, мб; e_a — фактичний тиск пари повітря, мб; 60 — перевідний коефіцієнт із хвилин у години.

4. За допомогою методу Пенмана—Монтейта для еталонної поверхні [12] $ET_c = ET_0 \cdot K_c$, мм:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e_s(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (\text{мм/год}), \quad (4)$$

де R_n — чиста радіація на поверхні рослин, МДж/м²·год; G — щільність теплового поток ґрунту, МДж/м²·год; T_{hr} — погодинна температура повітря на висоті 2 м, °С; u_2 — швидкість вітру на висоті 2 м, м/с; $e_s(T_{hr})$ — тиск насиченої пари повітря за температури повітря, кПа; e_a — фактичний тиск пари повітря, кПа;

Δ — градієнт кривої тиску пари, $\text{кПа}/^\circ\text{C}$; γ — психометрична константа, $\text{кПа}/^\circ\text{C}$; K_c — коефіцієнт культури томата [20].

Аеродинамічний опір (r_a) розраховували за формулою [21]:

$$r_a = \frac{4,72 \left(\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right)^2}{1 + 0,54u}, \quad (5)$$

де z — висота виміру вітру, м; d — висота зміщення нульової площини, м; $d \approx 0,63h$; z_0 — довжина шорсткості, м; $z_0 \approx 0,13h$; u — швидкість вітру, м; h — висота рослини, м.

Інші параметри, що входять до формул (1)–(4), розраховували згідно з методикою FAO Irrigation and Drainage Paper No 56 [12].

Для оцінки точності розрахунків фактичної величини евапотранспірації визначали середню абсолютну відсоткову помилку MAPE (Mean Absolute Percent Error) та середньоквадратичну похибку RMSE (Root Mean Square Error) [22]:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{ET}_c - \text{ET}}{\text{ET}_c} \right|, \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{ET}_c - \text{ET})^2}, \quad (7)$$

де ET_c — евапотранспірація томата, розрахована за методом Пенмана–Монтейта для еталонної поверхні (прийнята нами за стандарт); ET — евапотранспірація, розрахована із використанням рівнянь (1)–(3).

Результати досліджень. Обрані розрахункові методи дають можливість обчислювати ET_ϕ з кроком в 1 год і завдяки цьому досить детально досліджувати вплив різних метеорологічних чинників на ET_ϕ томата. У свою чергу, моніторинг температури листка та швидкості сокоруху по ксилемі дає змогу відслідковувати реакцію рослини на зміну факторів навколишнього середовища протягом вегетаційного періоду 2019 р. Розрахунки ET_ϕ обраними методами підтверджують результати попередніх досліджень учених Інституту водних проблем і меліорації НААН [23] про добову динаміку водоспоживання томатів, зокрема того, що на 95–96% добове водоспоживання відбувається з 7 по 20 год. Максимальне значення ET_ϕ фіксується у період з 12 по 15 год, а мінімальне — після заходу сонця. Так, 8 червня 2019 р. максимальне значення ET_ϕ томата спостерігалось о 13 год і залежно від використовуваного методу становило 0,63–0,78 мм/год, а вночі

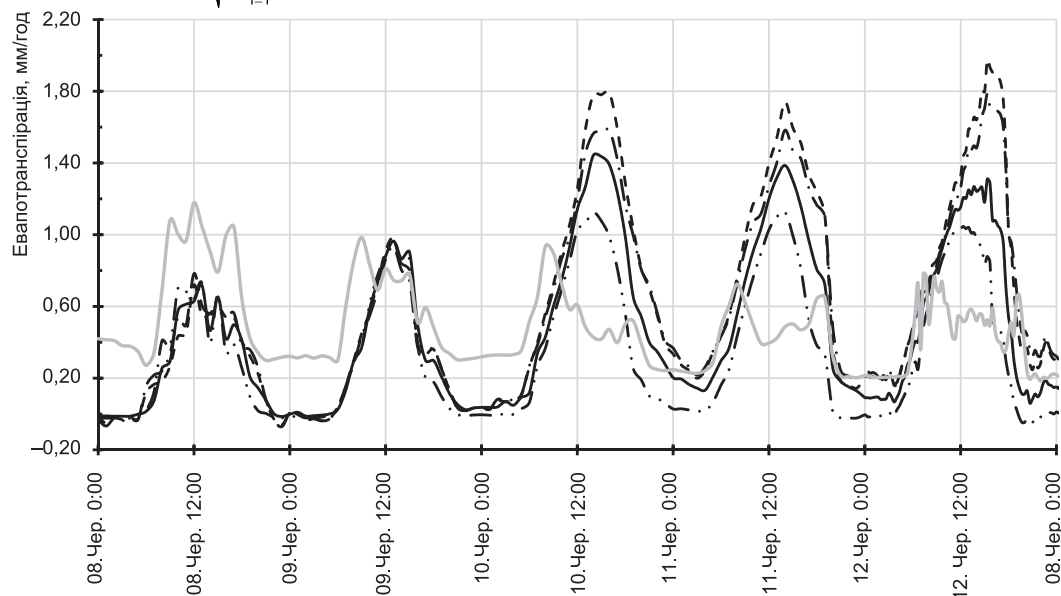


Рис. 1. Годинна динаміка евапотранспірації томата, мм/год, визначена у 2019 р. за використання різних методів: — — Пенмана–Монтейта; - - - - Монтейта; - - - - Будико; — · · · — Пенмана–Монтейта для еталонної поверхні; (— — — — — Сокорух по ксилемі, відн. од.)

1. Метеорологічні показники, що використовувалися для розрахунку фактичної евапотранспірації томатів (2019 р.)

Дата	Температура повітря, °С		Температура рослини, °С		Дефіцит тиску водяних парів, мб		Сокоорух по ксилемі, від. од.	Інтенсивність сонячної радіації, МДж/м ² ·доб	ET ₀ , мм
	середня	максимальна	середня	максимальна	середня	максимальна			
8, 9 червня	22,5	28,5	22,6	29,0	5,2	22,8	0,9	27,1	5,1
10–12 червня	25,4	33,4	25,0	33,0	16,2	42,6	0,5	32,6	8,0
26–28 червня	24,1	31,5	23,8	31,1	16,7	34,6	0,6	32,1	7,0
8 липня	20,9	27,2	20,7	26,7	2,7	12,8	0,7	9,7	1,5

цей процес майже припинявся. 12 червня максимальне значення E томата спостерігалось о 15 год і залежно від методу дослідження становило 1,94–1,29 мм/год, а мінімальні значення вночі не перевищували 0,01–0,23 мм/год. Максимальне значення ET₀ в ці дні відповідно становило 0,53 та 0,84 мм/год (рис. 1).

Для середніх метеорологічних умов червня, які спостерігали 8–9 числа (табл. 1), ET_ф томата залежно від методу розрахунку перебувала в межах 4,4–6,6 мм/доб. У цей період швидкість сокооруху по ксилемі становила 0,9 від. од., а середній дефіцит тиску парів повітря та ET₀ — 5,2 мб і 5,1 мм відповідно. Із підвищенням метеорологічних показників 10–12 червня ET томата збільшувалася до 9,6–14,2 мм/доб залежно від використовуваного методу дослідження. Середній дефіцит тиску парів повітря та ET₀ відповідно збільшувались у 3,1 та 1,6 раза, а швидкість сокооруху по ксилемі за таких метеорологічних умов зменшувалася до 0,5 від. од. Прослідковується реакція рослин на зміну факторів навколишнього середовища: за середньодобового дефіциту тиску парів повітря 5,2 мб транспірація рослин томата не змінювалася, що підтверджується швидкістю сокооруху по ксилемі на рівні 1 та відсутністю полуденної депресії продохів. Середньодобова температура рослини перебувала на рівні температури повітря, а максимальна температура на 0,5 °С перевищувала температуру повітря. За середньодобового дефіциту тиску парів повітря 16,2 мб починає діяти захисний механізм збереження вологи рослинами, транспірація зменшується [8], що підтверджується зменшенням швидкості сокооруху по ксилемі до 0,5 від. од. та наявністю полуденної

депресії продохів (рис. 1). Середньодобова та максимальна температури рослини у цей період були на 0,4 °С нижчими від температури повітря.

Коефіцієнти кореляції між використаним методом (Пенмана–Монтейта, Монтейта чи Будико) та швидкістю сокооруху по ксилемі відповідно становили 0,68; 0,71 та 0,69. За середніх метеорологічних умов, які спостерігалися 8 й 9 червня, похибка MAPE в разі застосування методів Пенмана–Монтейта, Монтейта та Будико відповідно становила 8%, 19 та 28%. А за несприятливих метеорологічних умов 10–12 червня похибка MAPE за застосування методів Пенмана–Монтейта та Монтейта підвищувалася до 48 та 49%. У разі методу Будико похибка MAPE майже не змінювалася і становила 27%. Отримані результати вказують, що за несприятливих метеорологічних умов розрахункові методи не враховують захисної дії рослини, а тому завищують фактичну ET на 30–60%. Цю особливість слід враховувати, визначаючи режими поливу розрахунковими методами.

Аналіз добової динаміки евапотранспірації томата свідчить про те, що вибрані методи майже однаково реагують на зміну кліматичних показників. Так, за період спостережень найбільша ET_ф відзначалася 26–28 червня 2019 р. і становила за використання методу Пенмана–Монтейта 12,1 мм/доб, методу Монтейта — 16,4, методу Будико — 16,4, а еталонного методу Пенмана–Монтейта — 14,2 мм/доб. Під час прохолодної та дощової погоди, яку спостерігали 8 липня, ET_ф за використання всіх методів зменшувалася до мінімальних значень і становила в разі методу

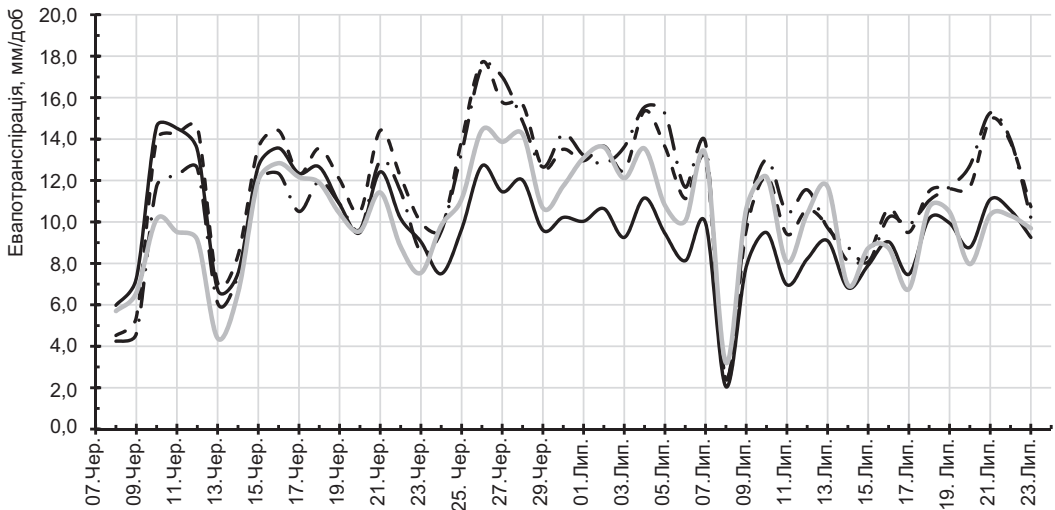


Рис. 2. Добова динаміка евапотранспірації томата, 2019 р., визначена у 2019 р. за використання різних методів, мм/доб: — Пенмана – Монтейта; - - - Монтейта; - · - - Будико; — — — Пенмана – Монтейта для еталонної поверхні

Пенмана–Монтейта 2,1 мм/доб, методу Монтейта — 2,5, методу Будико — 2,4, а еталонного методу Пенмана–Монтейта — 3,2 мм/доб (рис. 2).

Результати аналізу погрішностей визначення евапотранспірації томата за фазами розвитку засвідчили, що похибка MAPE за використання комбінованого методу Пенмана–Монтейта у фазах розвитку «цвітіння — початок плодоутворення» та «початок плодоутворення — налив плодів» становила 18,5 та 19,5% (це відповідає добрій точності визначення ET_{ϕ}), а похибка RMSE у зазначених фазах розвитку томата відповідно становила 2,2 та 2,3 мм. У фазі «налив плодів — технічна стиглість» похибка MAPE знижувалася до 6% (це відповідає високій точності визначення ET_{ϕ}), а RMSE дорівнювала 0,6 мм. У разі визначення ET_{ϕ} методом Монтейта похибка MAPE у фазах «цвітіння — початок плодоутворення» та «налив плодів — технічна стиглість» становила 27,4 та 23,7% (що відповідає незадовільній точності визначення ET_{ϕ}), а похибка RMSE у цих фазах розвитку томата становила 2,7 та 2,5 мм. У фазі «початок плодоутворення — налив плодів» похибки MAPE та RMSE у разі застосування методу Монтейта зменшувались і відповідно становили 11,5% (задовільна точність визначення) та 1,6 мм. За

визначення ET_{ϕ} методом Будико похибка MAPE у фазах «цвітіння — початок плодоутворення» та «початок плодоутворення — налив плодів» становила 16,9 та 15,0% (задовільна точність), а похибка RMSE у цих фазах розвитку томата — 1,7 та 2,0 мм. У фазі «налив плодів — технічна стиглість» похибки MAPE та RMSE за використання методу Будико підвищувались і відповідно становили 25,9% (задовільна точність визначення) та 2,8 мм. У середньому за вегетаційний період похибки MAPE для всіх вибраних методів перебували на рівні 16,2–19,7% (добра точність визначення ET_{ϕ}), а RMSE — 2,0–2,3 мм. Найменші похибки спостерігалися у разі застосування методу Пенмана–Монтейта, а найбільші — методу Монтейта (табл. 2).

Аналіз добової динаміки евапотранспірації томата та похибок підтверджують можливість застосовувати вибрані розрахункові методи для визначення фактичної евапотранспірації томата без використання додаткових коефіцієнтів культури. Для підвищення точності визначення ET_{ϕ} вибраними методами в подальших дослідженнях слід уточнити значення опору сумарної поверхні рослин томата (r_s) у разі застосування комбінованого рівняння Пенмана–Монтейта та рівняння Монтейта, а також коефіцієнт зовнішньої дифузії (D) у разі застосування рівняння Будико.

2. Погрішності визначення евапотранспірації за різних розрахункових методів (2019 р.)

Фаза розвитку томата	Показник	Метод			ETc = ET ₀ · K _c
		Пенмана–Монтейта	Монтейта	Будико	
«Цвітіння — початок плодоутворення»	ET, мм	173,3	181,1	159,1	148,6
	MAPE, %	18,5	27,4	16,9	—
	RMSE, мм	2,2	2,7	1,7	—
«Початок плодоутворення — налив плодів»	ET, мм	185,4	245,2	252,4	228,5
	MAPE, %	19,5	11,5	15,0	—
	RMSE, мм	2,3	1,6	2,0	—
«Налив плодів — технічна стиглість»	ET, мм	91,0	110,9	111,8	90,7
	MAPE, %	6,0	23,7	25,9	—
	RMSE, мм	0,6	2,5	2,8	—
«Цвітіння — технічна стиглість»	ET, мм	449,8	537,3	523,3	467,8
	MAPE, %	16,2	19,7	18,0	—
	RMSE, мм	2,0	2,3	2,1	—

3. Коефіцієнти томата K_c, у різні фази його розвитку (2019 р.)

Фаза розвитку томата	Метод			K _c
	Пенмана–Монтейта	Монтейта	Будико	
«Цвітіння — початок плодоутворення»	1,72	1,76	1,55	1,43
«Початок плодоутворення — налив плодів»	1,68	2,21	2,28	2,08
«Налив плодів — технічна стиглість»	1,90	2,32	2,35	1,89
Похибка:				
MAPE	13,3	17,4	14,1	—
RMSE	0,29	0,32	0,30	—

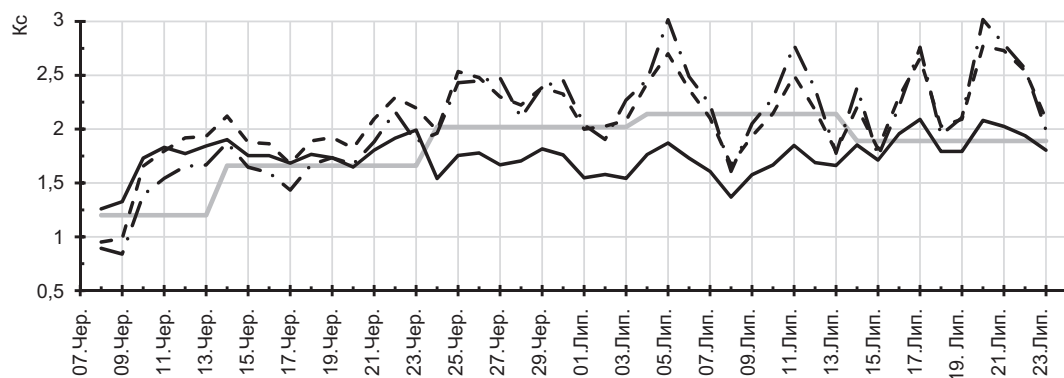


Рис. 3. Динаміка коефіцієнтів томата K_c, визначена у 2019 р. за використання різних методів: — — Пенмана–Монтейта; - - - Монтейта; - · - · Будико; — — Пенмана–Монтейта для еталонної поверхні

Використовуючи зазначені методи, коефіцієнти культури томата обчислювали як відношення розрахункової евапотранспірації до еталонної — $K_c = ET_f / ET_0$, порівнювали їх із K_c. Для цього значення K_c томата були взяті з попередніх досліджень [20]. Для

фази розвитку томата «цвітіння — початок плодоутворення» отримані коефіцієнти за використання методів Пенмана–Монтейта і Монтейта відповідно на 0,29 і 0,33, а за використання методу Будико — на 0,12 перевищували ті, що були отримані для цієї фази

розвитку рослини в попередніх дослідженнях. У фазі розвитку «початок плодоутворення — налив плодів» отримані коефіцієнти за використання методів Монтейта і Будико відповідно на 0,13 і 0,20 перевищували K_s , а за використання методу Пенмана–Монтейта, навпаки, отриманий коефіцієнт був на 0,4 нижчий за K_s . У фазі розвитку томата «налив плодів — технічна стиглість» отриманий коефіцієнт за використання методу Пенмана–Монтейта дорівнював K_s , а за використання методів Монтейта та Будико відповідно на 0,43 та 0,46 перевищував його.

У середньому за вегетаційний період похибка MAPE визначення коефіцієнта культури залежно від використовуваного методу дослідження становила 13,3–17,4%, що відповідає добрій точності розрахунку цього показника [22]. Похибка RMSE перебувала в межах 0,29–0,30.

На рис. 3 порівнюються значення коефіцієнтів томатів K_s , отриманих із застосування різних методів. Як бачимо, вони досить близькі, що також підтверджується похибками MAPE та RMSE (табл. 3). Добре узгодження отриманих коефіцієнтів є одним із непрямих методів доказу достатньої їх надійності [11].

Висновки

Результати досліджень підтвердили можливість використання комбінованого рівняння Пенмана–Монтейта, рівнянь Монтейта та Будико для визначення фактичної евапотранспірації томатів розсадних без використання додаткових коефіцієнтів. Щоправда, за несприятливих метеорологічних умов розрахункові методи не враховують захисної дії рослини, чим

пояснюється завищене значення фактичної ET_f на 30–60%. Проведений комплексний статистичний аналіз підтвердив добру точність визначення ET_f та K_s вибраними методами: похибка MAPE за вегетаційний період відповідно становила 16,2–18,0 та 13,3–17,4%, що відповідає добрій точності визначення цих показників. Похибка RMSF відповідно становила 2,0–2,9 та 0,29–0,30 мм.

Kovalenko I.¹, Zhuravliov O.²

Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS; 37 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine; e-mail: ¹igorok333@ukr.net, ²zhuravliov.olexandr@gmail.com; ORCID: ¹0000-0003-1548-3992, ²0000-0001-7035-219X

Determination of the actual evapotranspiration of tomatoes by calculation methods

Goal. To determine the actual evapotranspiration of seedling tomatoes by calculation methods and, based on the obtained results, propose the optimal water regime of the soil depending on the phases of plant development. **Methods.** Short-term field methods, generally accepted analytical and statistical methods of experimental data processing. **Results.** Calculation of the actual evapotranspiration of tomatoes (ET_f) by various methods confirmed that the process took place mainly from 7 to 8 p.m. and during that time 95–96% of the daily amount of moisture evaporated. The maximum values of actual and reference (ET_o) evapotranspiration — 1.44–1.97 mm/h and 0.94 mm/h — were recorded from 12 to 3 p.m., and the minimum values — after sunset. The reaction of plants to changes in environmental factors was monitored. Thus, with a deficit of air vapor pressure of 5.2 mb, the speed of sap ascent through the xylem was 0.9 rel. units, and ET_f depending on the method

used — 4.4–6.6 mm/day. With a deficit of air vapor pressure of 16.2 mb, the speed of sap ascent through the xylem decreased to 0.5 v. units, and ET_f , depending on the method used, increased to 9.6–14.2 mm/day. The correlation coefficient between the speed of sap movement through the xylem and ET_f was 0.68–0.71. Under average meteorological conditions and the use of the Penman–Monteith, Monteith, and Budyko methods, the MARE error was 8%, 19, and 28%, respectively; in the case of adverse meteorological conditions and the use of the Penman–Monteith, and Monteith methods, it increased to 48–49%, and in the case of Budyko's method, it almost did not change and amounted to 27%. The analysis of the daily dynamics of tomato evapotranspiration showed that all the selected methods responded equally to changes in climatic parameters. The errors of MARE and RMSE of determination of ET_f by phases of tomato development were calculated. On average, during the growing season, the used methods gave a MARE error of 16.2–19.7% (good accuracy of ET determination), and RMSE — 2.0–2.3 mm. The smallest errors were observed using the Penman–Monteith method, and the largest — using the Monteith method. With the application of the specified calculation methods, the coefficients of tomato culture K_s were also calculated. On average, during the growing season, the MARE error, depending on the method, was 13.3–17.4%, and the

RMSE error was 0.29–0.30. **Conclusions.** Based on the research results, the possibility of using the combined Penman-Monteit equation, Monteit, and Budyko equations to determine the actual evapotranspiration of seedling tomatoes without using additional coefficients was confirmed. It was found that under unfavorable meteorological conditions, calculation methods did not take into account the protective effect of the plant, and therefore overestimated the actual value of ETf by

30–60%. Comprehensive statistical analysis confirmed the good accuracy of ETf and Ks determination by the selected methods: the MARE error during the growing season was within 10–20%, and the RMSE error was 2.0–2.3 mm and 0.29–0.30, respectively.

Keywords: culture coefficient, xylem, air vapor pressure deficit, Penman-Monteit method, Monteit method, Budyko method.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202308-07>

Бібліографія

1. FAOSTAT. URL: <http://www.fao.org> (дата звернення 2.06.2023).

2. Посівні площі сільськогосподарських культур за їх видами у 2019 році. Державна служба статистики України: веб-сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 2.06.2023).

3. Шатковський А.П., Черевичний Ю.О. Водоспоживання та врожайність пасльонових культур за краплинного зрошення в умовах Степу України. *Меліорація і водне господарство*. 2013. № 1. С. 27–33.

4. Кныш В., Наумов А. Промышленная технология выращивания томата на капельном орошении. *Овощеводство*. 2017. № 2. С. 26–30.

5. Ромащенко М.І., Шатковський А.П., Рябов С.В. Краплинне зрошення овочевих культур і картоплі в умовах Степу України. Київ: ТОВ «ДІА», 2012. 248 с.

6. Журавльов О.В., Шатковський А.П., Васюта В.В. та ін. Порівняння розрахункових методів визначення евапотранспірації кукурудзи на зерно за краплинного зрошення. *Меліорація і водне господарство*. 2022. № 1. С. 40–49. doi: 10.31073/mivg202201-324

7. Monteith J.L., Unsworth M.H. Principles of Environmental Physics. Plants, Animals, and the Atmosphere. Fourth Edition Academic Press is an imprint of Elsevier, 2013. 401 p. ISBN: 978-0-12-386910-4 doi: 10.1016/B978-0-12-386910-4.00002-0

8. Monteith J. L. Principles of Environmental Physics. London: Edward Arnold, 1973. 241 p.

9. *FieldClimate* by Pessl instrument. URL: <https://ng.fieldclimate.com> (дата звернення 8.06.2023).

10. *Bio-Instrument* S.R.L. An Independent Genuine Manufacturer of Phyto-Sensors. URL: <http://phyto-sensor.com> (дата звернення 8.06.2023).

11. Budyko M.I. Climate and Life. San Diego: Academic Press, 1974. 508 p.

12. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO. 1998. URL: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

13. Полузтков Р.А., Нагиев А. Т., Шукуров М.Ш., Мирзоев Ф.А. Расчет транспирации и испарения в динамической модели агроэкосистемы. *Известия национальной академии наук*

Азербайджана. Сер. физико-технических и математических наук. 2004. № 2. С. 245–248.

14. Dirisa G., Bekele D., Hordofa T. Crop Coefficient and Water Requirement of Tomato (Melka Shola Variety) at Melkassa, Central Rift Valley of Ethiopia. *Acad. Res. J. Agri. Sci.* 2017. V 5(5). P. 336–340. doi: 10.14662/ARJASR2017.039

15. Katsoulas N., Stanghellini C. Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy*. 2019. V. 9. 392 p. doi: 10.3390/agronomy9070392

16. Zhang Yo., Liu Ch., Yu Q. et al. Energy fluxes and the Priestley-Taylor parameter over winter wheat and maize in the North China Plain. *Hydrol. Process.* 2004. V. 18. P. 2235–2246. doi: 10.1002/hyp.5528

17. Sammis T.W., Wang J., Miller D.R. The Transition of the Blaney-Criddle Formula to the Penman-Monteith Equation in the Western United States. *J. of Service Climatology*. 2011. V. 5(1) P. 1–11.

18. Fei G., Feng G., Ouyang Yi. et al. Evaluation of Reference Evapotranspiration Methods in Arid, Semiarid, and Humid Regions. *J. of the American Water Resources Association*. 2017. V. 53. № 4. P. 791–808. doi: 10.1111/1752-1688.12530

19. *Technical catalogue Metos* © by Pessl Instruments. Pessl Instruments GmbH. Werksweg 107, 8160 Weiz, Austria, 2017. 132 p.

20. Romashchenko M.I., Shatkovski A.P., Zhursvlov O.V. et al. Adjustment of the «Penman-Monteith» method for growing tomato seedlings in production conditions when applying drip irrigation. *Меліорація і водне господарство*. 2018. № 2. С. 5–11. doi: 10.31073/mivg20180108-146

21. Thom A.S., Oliver H.R. On penman's equation for estimating regional evaporation. *Quart. J. Roy. Meteorol.* 1977. № 103. P. 345–357. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202103>

22. Shcherbakov M.V., Brebels A., Shcherbakova N.L. et al. A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Sciences J.* 2013. V. 24. P. 171–176. doi: 10.1002/qj.49710343610

23. Журавльов О.В., Шатковський А.П. Вплив екологічних чинників на інтенсивність транспірації рослин томата. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 3. С. 63–69. doi: 10.31073/agrovisnyk202103-08