

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202101-266>Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/266>

УДК 631.671:633.34

## ВПЛИВ ВОДНОГО СТРЕСУ НА ЕВАПОТРАНСPIРАЦІЮ СОЇ

О.В. Журавльов<sup>1</sup>, канд. с.-г. наук, А.П. Шатковський<sup>2</sup>, докт. с.-г. наук,  
В.В. Васюта<sup>3</sup>, докт. с.-г. наук<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;<https://orcid.org/0000-0001-7035-219X>; e-mail: zhuravlov\_olexandr@ukr.net;<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;<https://orcid.org/0000-0002-4366-0397>; e-mail: andriy-1804@ukr.net;<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;<https://orcid.org/0000-0001-7786-1843>; e-mail: v.vladvir1@gmail.com

**Анотація.** За результатами спостережень встановлено, що при зниженні вологості ґрунту відбувається непропорційне зменшення середньодобової евапотранспірації (ЕТс). Так, в інтервалі вологості ґрунту 94–80% від НВ ЕТс становила 9,76 мм/добу, а 70–62% НВ – її величина зменшувалася в 3 рази. За досягнення вологості ґрунту 58,5% НВ величина ЕТс не перевищувала 0,5 мм/добу, що в 20 разів менше за початкову. Встановлено, що зниження вологості ґрунту на 10% НВ в інтервалі 90–70% НВ відбувається за 3 доби, а з 70 до 60% НВ та з 60 до 58% НВ – за 8 діб. За вологості ґрунту 70% НВ і нижче фактична евапотранспірація менша за ЕТ<sub>0</sub>, що підтверджує вплив водного стресу на евапотранспірацію рослин сої. За розрахунками коефіцієнту водного стресу (K<sub>s</sub>) отримано математичну модель на основі залежності K<sub>s</sub> від вологості ґрунту у відсотках від найменшої вологості. Середня абсолютна відсоткова похибка (МАРЕ) моделі становить 8,6%, що відповідає високій точності отриманої залежності. У діапазоні вологості ґрунту від 58 до 80% НВ коефіцієнт водного стресу розраховується за формулою:  $K_s = -0,0011 \cdot НВ^2 + 0,1925 \cdot НВ - 7,4541$ . За вологості ґрунту 80% НВ і вище  $K_s = 1$ . Проведено комплексну порівняльну оцінку існуючих методів розрахунку коефіцієнта водного стресу K<sub>s</sub> та встановлено, що фактичні значення K<sub>s</sub> за вологості ґрунту 80–70 і 60–65% від НВ на 8–14% та 72–32%, відповідно, менші, ніж K<sub>s</sub> FAO 56, та на 35–40% більші за визначення методом Saxton. Підтверджено необхідність врахувати зниження евапотранспірації при розрахунку водного балансу в умовах водного стресу рослин. Розрахунок евапотранспірації (ЕТс) методом Penman-Monteith, без урахування коефіцієнта водного стресу показав, що величина фактичного та розрахункового водного балансу співпадає лише до рівня вологості ґрунту 62% НВ. За подальшого зниження вологості ґрунту розрахункова вологість ґрунту була на 20% НВ нижчою за фактичну, що призвело до похибок при визначенні вологості ґрунту після поливів, оскільки фактична її величина дорівнювала майже 100% НВ, а розрахункова – 60% від НВ. Доведено, що визначення водного балансу розрахунковими методами без урахування коефіцієнта водного стресу призводить до значних помилок. Отже, при розрахунках евапотранспірації рослин сої необхідно враховувати вплив водного стресу.

**Ключові слова:** коефіцієнт водного стресу, евапотранспірація, метод Penman-Monteith, водний баланс, соя

**Постановка проблеми.** Оперативне і точне визначення часу початку поливу є дуже важливим із точки зору підтримання оптимального водного режиму ґрунту, що запобігає виникненню водного стресу рослин. Стан водного стресу в рослинах настає, коли запаси води в ґрунті не забезпечують умови їх нормального росту і розвитку. Тому для прогнозування та оперативного управління водним режимом ґрунту необхідно застосовувати моделі, які б адекватно описували стан водного стресу залежно від інтенсивності евапотранспірації (ЕТс) рослин. Це дозволить при розрахунку водного балансу враховувати вплив водного стресу на величину транспірації рослин [1].

Транспірація залежить від метеопараметрів, вологості ґрунту та виду культури. Поширеним підходом щодо моделювання ЕТс є обчислення потенційної евапотранспірації ( $ET_{potential}$ ), яка є вихідною величиною для визначення фактичної евапотранспірації ( $ET_{actual}$ ) на основі функції вологості ґрунту  $f(\beta)$  [2; 3; 4; 5; 6].

$$ET_{actual} = f(\beta) \cdot ET_{potential} \quad (1)$$

де  $ET_{actual}$  – фактична евапотранспірація, мм;  $f(\beta)$  – функція вологості ґрунту;  $ET_{potential}$  – потенціальна евапотранспірація, мм.

Потенційна евапотранспірація виникає за умови наявності необхідної кількості води, достатньої для нормального росту і розвитку

суцільного рослинного покриву. За відношення  $E_{Tactual}/E_{Tpotential}$  близькому до одиниці рослини оптимально забезпечені ґрунтовою вологою, продихи максимально відкриті і рослини здатні активно регулювати свій водообмін на високому рівні. У разі, коли відношення  $E_{Tactual}/E_{Tpotential}$  менше за 1, рослини починають відчувати водний стрес. Продихи поступово закриваються і рослина переходить у фізіологічний стан економії води та гальмує активний ріст вегетативної маси. За використання близько 50% доступної води в ґрунті спостерігається зниження евапотранспірації, а за вологості ґрунту, яка дорівнює точці в'янення, вона практично припиняється [7; 8].

Дослідженнями евапотранспірації ячменю за збільшення дефіциту води в ґрунті [9] встановлено, що транспірація є величиною відносно стабільною до того моменту, поки дефіцит не перевищить 65% від об'єму доступної води в зоні кореневої системи. Залежно від ступеня та тривалості водного стресу зниження транспірації становило 11–40%, де більша частина її зменшення викликала підвищення опору продихів. Дослідженнями водного стресу низки інших культур встановлено, що зниження  $E_{Tc}$  чаберу запашного, залежно від умов водного стресу, становило 14–37% [10], сої – 19–66% [11], цибулі ріпчастої – 15–30% [12], кукурудзи на зерно – 7–39% [13] та пшениці озимої – 8–30% [14].

Моделювання евапотранспірації показало, що прогнозування транспірації на основі тільки середньої вологості ґрунту в зоні кореневої системи може бути надмірним спрощенням, особливо за умови, що рослини можуть компенсувати нестачу води за умови розміщення коріння у сухому ґрунті [15; 17]. Тому контроль  $E_{Tc}$  при обліку середньої вологості ґрунту повинен бути максимально точним і, відповідно, модель слід розглядати як гіпотезу, яку необхідно перевірити [16; 17].

**Актуальність дослідження.** В Україні соя є стратегічною культурою. Посівні площі у 2018 р. становили понад 1,7 млн га [18], що

складає біля 18% від загальної площі всіх технічних сільськогосподарських культур. Один із факторів високої продуктивності культури на зрошенні є контроль евапотранспірації.

На сьогодні великого поширення визначення евапотранспірації набув розрахунковий метод Penman-Monteith [19; 23]. За цим методом спочатку визначають еталонну евапотранспірацію ( $E_{T_0}$ ) – швидкість евапотранспірації з еталонної поверхні без дефіциту води. За еталонну поверхню приймається гіпотетичний трав'яний покрив висотою 0,12 м, опором поверхні 70 с/м, альбедо 0,23. Розрахунок евапотранспірації проводять для добре удобрених, розвинутих культур, які вирощують у певній кліматичній зоні на значній площі угідь за оптимального рівня вологості ґрунту при досягненні повної продуктивності (стандартні умови). Якщо умови вирощування відрізняються від стандартних, то рослини зазнають водного стресу. Вплив водного стресу на евапотранспірацію культури визначається коефіцієнтом водного стресу ( $K_s$ ) [20]. Отже, визначення коефіцієнта водного стресу при розрахунках евапотранспірації сої методом Penman-Monteith, у межах зональних кліматичних умов, є актуальним завданням.

**Метою дослідження** було визначення коефіцієнта водного стресу рослин сої та адаптація методу Penman-Monteith для визначення  $E_{Tc}$  в умовах водного стресу.

**Матеріали і методи дослідження.** Польові дослідження проведено у 2018 р. у виробничих умовах у межах землекористування ФГ «Магістраль сервіс» (с. Ромашки, Мелітопольський р-н, Запорізька обл.). Локація Google Maps: 46.7860 п. ш. 35.1604 сх.д., висота над рівнем моря 30,5 м.

ґрунт дослідної ділянки – темно-каштанові низькогумусо-акумулятивні. Найменшу вологоємність (НВ) визначали методом заливання майданчика [21], щільність складення ґрунту визначали методом ріжучого кільця [22] (табл. 1).

#### 1. Водно-фізичні властивості ґрунту

Шар ґрунту, см	Щільність складання т/м <sup>3</sup>	Найменша вологоємність (НВ)	
		від маси сухого ґрунту, %	від об'єму, %
0-10	1,21	29,7	35,9
11-20	1,31	27,1	35,5
21-30	1,28	26,4	33,8
31-40	1,31	25,7	33,7
41-50	1,33	24,1	32,1
51-60	1,34	23,1	31,0
0-60	1,30	26,02	33,65

Метеорологічні параметри та розрахунки  $ET_0$  проводили за показниками інтернет-метеостанції iMetos® by Pessl Instruments.  $ET_c$  розраховували за методом Penman-Monteith за формулою:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0, \quad (2)$$

де  $ET_0$  – еталонна евапотранспірація, мм;  $K_c$  – коефіцієнт культури [23].

Вологість ґрунту та  $ET_{actual}$  визначали за допомогою датчика вологості ґрунту Sentek Drill & Drop (довжина зонду 60 см) на базі інтернет-метеостанції.

Коефіцієнт водного стресу розраховували згідно [7; 8; 20] як відношення

$$Ks = \frac{ET_{actual}}{ET_{potential}} \quad (\text{за } ET_{actual} > ET_{potential} Ks=1). \quad (3)$$

Отриманий коефіцієнт порівнювали з рекомендованими методиками розрахунку [20; 24; 25]:

$$1. Ks = \frac{TAW - Dr}{TAW - RAW} \quad (\text{за } Dr < RAW, Ks = 1), \quad (4)$$

де  $Ks$  – коефіцієнт водного стресу;  $Dr$  – виснаження кореневої зони, мм;  $TAW$  – загальна доступна ґрунтова волога в кореновому шарі ґрунту, мм;  $RAW$  – легкодоступна ґрунтова волога, мм.

$$2. Ks = \frac{\beta_{20cm}}{\beta_{HB}}, \quad (5)$$

де  $\beta_{20cm}$  – об'ємна вологість ґрунту на глибині 20 см, % від об'єму;  $\beta_{HB}$  – найменша вологоємність (НВ), % від об'єму.

$$3. Ks = \frac{W}{W_0} \quad (\text{за } W > W_0 Ks = 1), \quad (6)$$

де  $W$  – продуктивна волога кореневого шару ґрунту, мм;  $W_0$  – критичне значення продуктивної вологості ґрунту, за якого фактичне випаровування дорівнює потенційному випаровуванню.

#### Результати досліджень та їх обговорення.

Дослідження з визначення коефіцієнта водного стресу було проведено у два етапи: у перший, який тривав з 27 травня по 8 червня, вологість ґрунту знижували до 70% НВ у шарі ґрунту 0–60 см, у другий, який тривав з 10 червня по 01 липня, висушування продовжували до 55–60% НВ (рис. 1). З 26 по 30 червня вологість ґрунту майже не змінювалась і знаходилась на рівні 58,3% НВ. Опади, які випали 30 червня (5,2 мм), підвищили вологість до 59,5% НВ. 01 липня було проведено полив нормою 40 мм. Спостереженнями за евапотранспірацією на першому етапі досліджень встановлено, що за зниження вологості ґрунту від 99,4% до 80,9% від НВ (26.05–02.06) середньодобова  $ET_{actual}$  становила 5,42 мм/добу,  $ET_0$  – 5,11 мм/добу. За подальшого зниження вологості ґрунту до 70,4% НВ (02.06–8.06) середньодобове значення  $ET_{actual}$  знизилось до 3,57 мм/добу,  $ET_0$  – 4,86 мм/добу. За вологості ґрунту 80–70% НВ розрахований коефіцієнт водного стресу становив  $Ks = 0,66$ .

Перед другим етапом досліджень 09 червня провели вегетаційний полив нормою 45 мм. Початкова вологість ґрунту в шарі 0–60 см для другого етапу досліджень становила 94,1% НВ. Спостереженнями встановлено, що за зниження вологості ґрунту відбувалось зменшення середньодобової  $ET_{actual}$ , про що свідчить зміна напрямку тренду лінії вологості ґрунту (рис. 1). За досягнення вологості ґрунту 58,5%

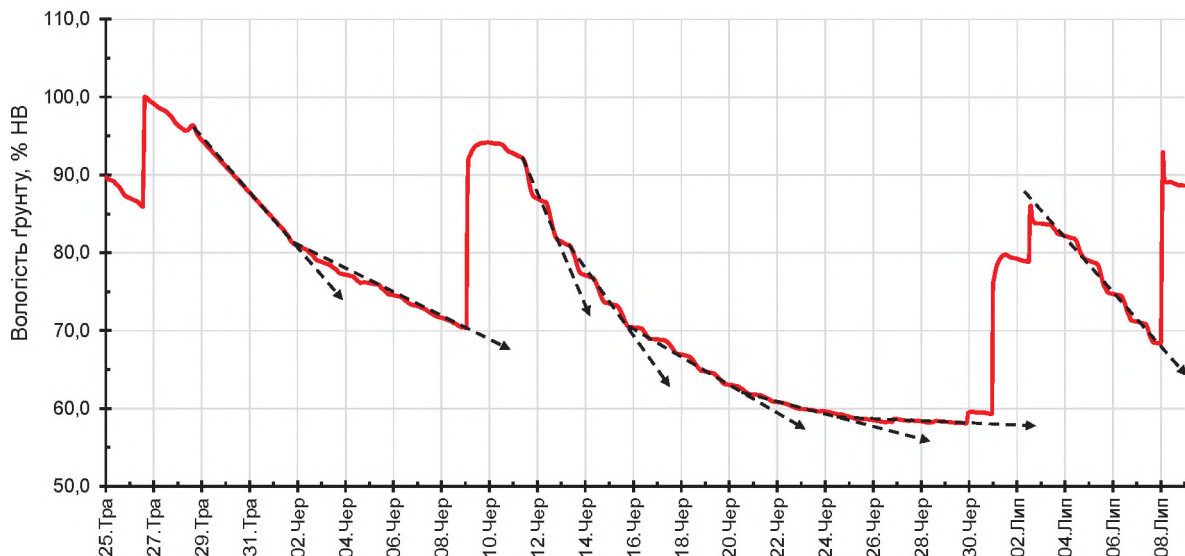


Рис. 1. Динаміка вологості ґрунту на посівах сої за період досліджень

НВ 26 червня  $ET_{actual}$  майже зупинилась і становила лише 0,5 мм/добу, що у 20 разів менше за  $ET_{actual}$  на початку спостережень. За наступні 4 доби вологість ґрунту знизилась лише на 0,4% НВ і станом на 29 червня становила 58,1% від НВ. Спостереженнями встановлено, що в інтервалі вологості ґрунту 94–80% від НВ,  $ET_{actual}$  становила 9,76 мм/добу, а за вологості ґрунту 70–62% від НВ  $ET_{actual}$  знизилась у 3 рази і становила 3,23 мм за добу (рис. 2).

За досягнення вологості ґрунту 60% від НВ водний стрес рослин почав поступово зростати і зниження вологості на 1–2% від НВ зменшувало  $ET_{actual}$  на 1,21–1,08 мм/добу. Так, за вологості 60–59% від НВ  $ET_{actual}$  становило 0,94 мм/добу або 10% від початкової. Слід зауважити, що зниження вологості ґрунту на 10% від НВ – з 90 до 70% НВ проходило за кожні 3 доби. Процес зниження вологості ґрунту з 70 до 60% НВ та з 60 до 58% НВ вже відбувався за кожні 8 діб. Отже, зниження вологості ґрунту з 90 до 70% НВ відбувалося зі швидкістю 2,5% НВ, з 70 до 60% від НВ –

1,25% НВ, а з 60 до 58% НВ – 0,25% НВ за добу. За вологості ґрунту 70% НВ і нижче фактична евапотранспірація є меншою за  $ET_0$  і, відповідно, необхідно коригувати  $ET_c$ , оскільки виникають умови водного стресу, а розрахункові методи цього не враховують.

За результатами визначення коефіцієнта водного стресу ( $K_s$ ) було отримано математичну модель на основі залежності  $K_s$  від вологості ґрунту у відсотках від найменшої вологості ґрунту (рис. 3).

У діапазоні вологості ґрунту від 58 до 80% від НВ коефіцієнт водного стресу розраховують за формулою:

$$K_s = -0,0011 \cdot HB^2 + 0,1925 \cdot HB - 7,4541, \quad (7)$$

де  $HB$  – вологість ґрунту, % від НВ.

За вологості ґрунту 80% НВ і вище  $K_s = 1$ . Візуалізацію результатів розрахунків за формулою 7 відображено на рисунку 4, де наведено експериментальний і теоретичний коефіцієнти водного стресу. Середнє арифметичне значення, стандартне відхилення

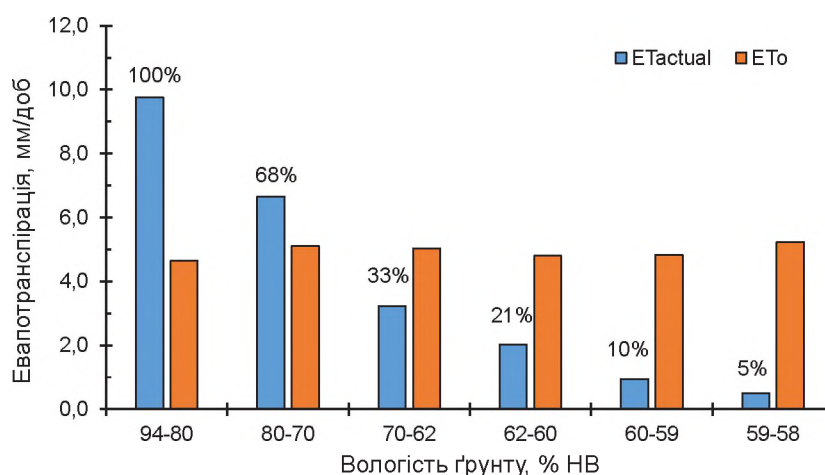


Рис. 2. Евапотранспірація сої залежно від вологості ґрунту

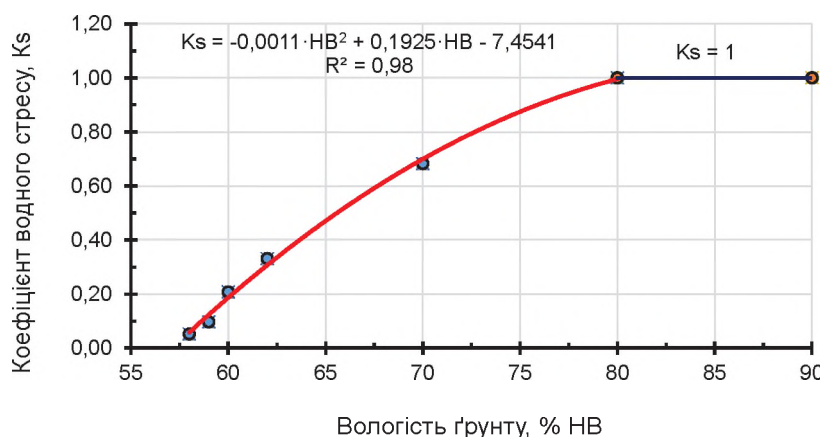


Рис. 3. Залежність коефіцієнта водного стресу рослин сої від вологості ґрунту



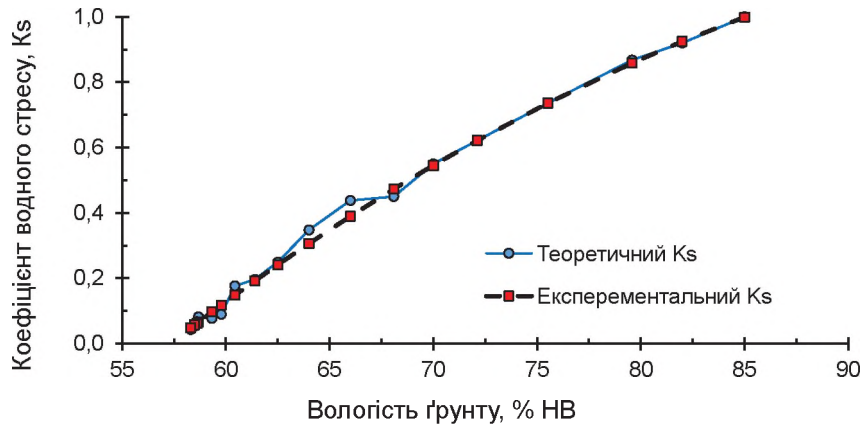


Рис. 4. Експериментальний та розрахунковий коефіцієнт водного стресу сої

експериментальних та розрахованих даних становлять 0,387; 0,326 та 0,383; 0,326 відповідно. Для встановлення точності отриманої моделі було розраховано середню абсолютну відсоткову похибку (МАРЕ) [26], яка становить 8,6% та виконано розрахунок точності прогнозу моделі, який становить 91,4%. Похибка МАРЕ отриманої моделі менше 10%, що відповідає високій точності отриманої залежності.

За результатами порівняння отриманої моделі 7 з рекомендованими методиками визначення коефіцієнта водного стресу встановлено, що розрахунок  $K_s$  за вмістом продуктивної вологи у ґрунті, запропонований методиками 4 (FAO 56 [20]) та 6 (Будько М.І., 1971 [25]), однаковий. Отриманий  $K_s$  за методиками 4 та 6, в межах вологості ґрунту 70–80% від НВ, на 8–14% більший, ніж у запропонованій моделі. За подальшого зниження вологості ґрунту різниця між моделями зростає

(рис. 5). Так, за вологості 60–65% від НВ різниця, відповідно, становить 0,34 (72%) та 0,20 (32%). Величини  $K_s$ , отримані за методикою 5 (Saxton, 1986 [2; 24]), знаходяться в межах 0,3–0,6. За вологості ґрунту 64–80% від НВ значення  $K_s$  за моделлю 5 менші, ніж визначені за формулою (7), а за вологості ґрунту 58–64% НВ, навпаки, – більші. Відповідно, за вологості ґрунту 70–80% від НВ  $K_s$  за моделлю 5 на 40–34% менший, ніж у запропонованій.

На основі результатів порівняльного аналізу можна зробити висновок, що модель 5 для цього виду ґрунтової відміни не підходить. Найменша різниця між отриманою моделлю та моделями 4 і 6 знаходиться для вологості ґрунту в межах 70–80% від НВ, а за зниження рівня вологості ґрунту і, відповідно, зростання водного стресу ця різниця збільшується.

Розрахунок евапотранспірації (ЕТс) за методом Penman-Monteith (P-M) без ураху-

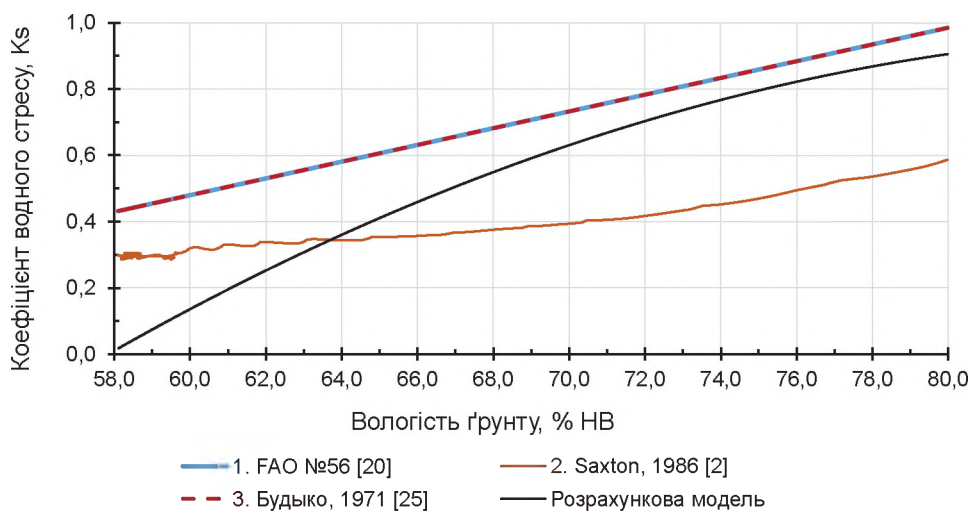


Рис. 5. Залежність коефіцієнта водного стресу сої від вологості ґрунту, розрахованого за різними методиками

вання коефіцієнта водного стресу виявив, що фактичний та розрахунковий водний баланс співпадають лише до рівня вологості ґрунту 62 % від НВ (рис. 6). За подальшого зниження вологості ґрунту  $ET_{actual}$  практично відсутня, проте розрахунки  $ET_c$  за методом Р-М показали, що на 30 червня вологість ґрунту становила 40,4 % від НВ, тоді як фактична вологість ґрунту не знижувалась нижче 59,5 % від НВ. Після проведення трьох вегетаційних поливів фактична вологість станом на 17 липня піднялася до 99 % від НВ, а за розрахунками методом Р-М лише до 60 % від НВ. Розрахунки  $ET_c$  методом Penman-Monteith не відповідали фактичним величинам і досягли їх лише при врахуванні коефіцієнта водного стресу. Отже, все вищенаведене вказує на необхідність обов'язкового врахування впливу водного стресу за визначення величини евапотранспірації рослин сої з метою запобігання неточно-

стей при регулюванні водного режиму ґрунту та визначенні елементів водного балансу розрахунковими методами.

**Висновки.** На основі комплексного порівняльного аналізу існуючих методів розрахунку коефіцієнтів водного стресу  $K_s$  встановлено, що запропонована модель визначення  $K_s$  забезпечує високу точність, а середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE) становить 8,6%. Отримані величини  $K_s$  на 8–14% та 72–32% за вологості ґрунту 80–70% від НВ та 60–65% від НВ відповідно менші за  $K_s$  FAO 56 [20], Будико М.І., 1971 [25] та на 35–40% вищі за метод Saxton, 1986 [2; 24]. Отже, за проведення розрахунків  $ET_c$  методом Penman-Monteith для запобігання суттєвих неточностей при регулюванні водного режиму ґрунту та визначенні елементів водного балансу необхідно обов'язково враховувати коефіцієнт водного стресу.

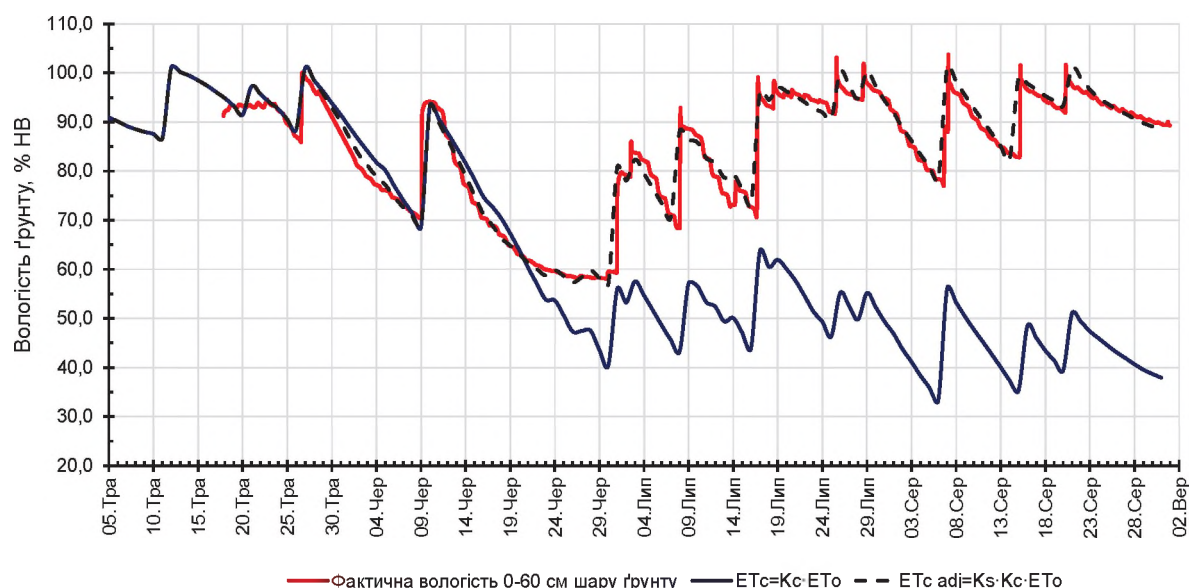


Рис. 6. Динаміка фактичної та розрахункової вологості ґрунту в посівах сої

### Бібліографія

1. Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes. Vol. 1; Ed. L.R. Ahuja, V.R. Reddy, S.A. Saseendran, Qiang Yu First. Madison, 2008. 435 p. DOI: 10.2134/advagriscystmodell
2. Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendick R.I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture // *Soil Science of America Journal*. 1986. Vol. 50. № 4. P. 1031–1036. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x
3. Vivoni E.R., Moreno H.A., Mascaro G. et al. Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the North American monsoon region // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35 № 22. L 22403. DOI: 10.1029/2008GL036001
4. Методика оценки биологического водопотребления посевов для решения задач управления водным режимом / Козырева Л.В. и др. // *Агрофизика*. 2013. № 4(12). С. 12–19.

5. Шумова Н.А. Оценка и анализ испарения, транспирации и запасов воды в почве полей яровой пшеницы за безморозный период в различные по водности годы // *Экосистемы: Экология и Динамика*. 2018. Том 2. № 2. С. 65–88. DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10009
6. Полуэктов Р.А., Кумаков В.А., Василенко Г.В. Моделирование транспирации посевов сельскохозяйственных растений // *Физиология растений*. 1997. Том 44. № 1. С. 68–73.
7. Evaporation, evapotranspiration and soil moisture. *The Guide to Hydrological Practices. Vol. I Hydrology – From Measurement to Hydrological Information (WMO No. 168)*. A publication of the Commission for Hydrology, 2008. 296 p.
8. Шейн Е.В. Курс физики почв. Москва : Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
9. Jamieson P.D., Francis G.S., Wilson D.R., Martin R.J. Effects of water deficits on evapotranspiration from barley // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1995. Vol. 76. P. 41–58. DOI: 10.1016/0168-1923(94)02214-5
10. Saeedinia M., Hosseinian S.H., Beiranvand F. The Effect of Water Stress on Evapotranspiration and Morphological Characteristics of *Satureja Hortensis* // *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2017. Vol. 50 № 8 P. 2063–2072. DOI: 10.22059/IJSWR.2019.276349.668131
11. Середньодобове випаровування та сумарне водоспоживання сої залежно від режиму зрошення, фону живлення та сорту при вирощуванні на Півдні України / Гамаюнова В.В. та ін. // *Зрошуване землеробство*. 2010. № 53. С. 11–18.
12. Васюта В.В., Журавльов О.В. Водоспоживання цибулі ріпчастої на краплинному зрошенні в південному регіоні України // *Зрошуване землеробство*. 2009. № 52. С. 10–15.
13. Вплив умов вологозабезпеченості, фону мінерального живлення та густоти стояння рослин на урожайність ділянок гібридизації кукурудзи в умовах зрошення / Коковіхін С.В. та ін. // *Зрошуване землеробство*. 2011. № 56. С. 20–25.
14. Wenhui Zhao, Leizhen Liu, Qiu Shen et al. Effects of Water Stress on Photosynthesis, Yield, and Water Use Efficiency in Winter Wheat // *Water*. 2020 Vol. 12(8). № 2127. DOI: 10.3390/w12082127
15. Guswa A., Celia M., Rodriguez-Iturbe I. Models of soil moisture dynamics in ecohydrology: A comparative study // *Water Resources Research*. 2002. Vol 38(9). № 1166. DOI: 10.1029/2001WR000826
16. Reinder A. Feddes, Holger Hoff, Michael Bruen et al. Modeling root water uptake in hydrological models and climate models // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001. Vol. 82. P. 2797–2810. DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<27972810
17. Shirley A. Kurc, Eric E. Small. Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico // *Water Resources Research*. 2004. Vol. 40. W09305. DOI: 10.1029/2004WR003068
18. Посівні площі сільськогосподарських культур за їх видами у 2018 році. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 10.05.2021).
19. Romashchenko M., Shatkowski A., Zhuravlev O. Features of application of the «Penman–Monteith» method for conditions of a drip irrigation of the Steppe of Ukraine (on example of grain corn) // *Journal of Water and Land Development*. 2016. № 31. P. 123–127. DOI: 10.1515/jwld-2016-0043
20. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. 1998. No. 56. Rome. FAO pp. 300. URL: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm> (дата звернення: 11.05.2021).
21. Горянский М.М. Методика полевых опытов на орошаемых землях. Киев : Урожай, 1970. 84 с.
22. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. [Чинний від 2010.10.01] Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 36 с. (Національний стандарт України).
23. Shatkovskiy A.P., Romashchenko M.I., Vasyuta V.V. et al. Evaluation of the «Penman–Monteith» model for determination of soybeans evapotranspiration in irrigated conditions of the Steppe of Ukraine. *Modern Phytomorphology*. 2020. Vol. 14. P. 111–113. DOI: 10.5281/zenodo.4449887
24. Brandes D., Wilcox D. Evapotranspiration and soil moisture dynamics on a semiarid ponderosa pine hillslope. *Journal of the American Water Resources Association*. 2000. Vol. 36. № 5. P. 965–974. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2000.tb05702.x
25. Будыко М.И. Климат и жизнь. Ленинград : Гидрометеоиздат. 1971. 472 с.
26. Shcherbakov M.V., Brebels A.A., Shcherbakova N.L. et al. A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Sciences Journal*. 2013. № 24. P. 171–176. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.8003.



## References

1. Ahuja, L.R., Reddy, V.R., Saseendran, S.A., & First, Q.Y. (Ed.). (2008). Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes. Vol. 1. Madison. DOI: 10.2134/advagricystmodel1
2. Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., & Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science of America Journal*, 50(4), 1031–1036. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x
3. Vivoni, E.R., Moreno, H.A., & Mascaro, G.I. et al. (2008). Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the North American monsoon region. *Geophysical Research Letters*, 35(22), 22403. DOI: 10.1029/2008GL036001
4. Kozyreva, L.V., Sitdikova, Yu.R., Yefimov, A.Ye., & Dobrokhотов, A.V. (2013). Metodika otsenki biologicheskogo vodopotrebleniya posevov dlya resheniya zadach upravleniya vodnym rezhimom [Methodology for assessing the biological water consumption of crops for solving problems of water management]. *Agrofizika*, 4(12), 12–19. [in Russian]
5. Shumova, N.A. (2018). Otsenka i analiz ispareniya, transpiratsii i zapasov vody v pochve poley yarovoy pshenitsy za bezmoroznyy period v razlichnyye po vodnosti gody [Assessment and analysis of evaporation, transpiration and water reserves in the soil of spring wheat fields for a frost-free period in years of different water content]. *Ekosistemy: Ekologiya i Dinamika*, 2(2), 65–88. DOI: 10.24411/2542-2006-2018-10009 [in Russian]
6. Poluektov, R.A., Kumakov, V.A., & Vasilenko, G.V. (1997). Modelirovaniye transpiratsii posevov selskokhozyaystvennykh rasteniy [Modeling of transpiration of crops of agricultural plants]. *Fiziologiya rasteniy*, 44(1), 68–73. [in Russian]
7. Evaporation, evapotranspiration and soil moisture. (2008). *The Guide to Hydrological Practices. Vol. 1 Hydrology – From Measurement to Hydrological Information (WMO No. 168)*. A publication of the Commission for Hydrology.
8. Shein, E.V. (2005). Kurs fiziki pochv [Soil physics course]. Moscow: Izd-vo MGU. [in Russian]
9. Jamieson, P.D., Francis, G.S., Wilson, D.R., & Martin R.J. (1995). Effects of water deficits on evapotranspiration from barley. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76, 41–58. DOI: 10.1016/0168-1923(94)02214-5
10. Saedinia, M., Hosseinian, S.H., & Beiranvand, F. (2017). The Effect of Water Stress on Evapotranspiration and Morphological Characteristics of *Satureja Hortensis*. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(8), 2063–2072. DOI: 10.22059/IJSWR.2019.276349.668131
11. Hamayunova, V.V., Pysarenko, P.V., Suzdal, O.S., & Kazano, O.O. (2010). Serednodobove vyparovuvannya ta sumarne vodospozhyvannya soyi zalezno vid rezhymu zroshennya, fonu zhyvlennya ta sortu pry vyroshchuvanni na Pivdni Ukrayiny [Average daily evaporation and total water consumption of soybeans depending on the irrigation regime, feeding background and variety when grown in the South of Ukraine]. *Zroshuvane zemlerobstvo*, 53, 11–18. [in Ukrainian]
12. Vasyuta, V.V., & Zhuravlov, O.V. (2009) Vodospozhyvannya tsybuly ripchastoyi na kraplynnomu zroshenni v pivdennomu rehioni Ukrayiny [Water consumption of onion on drip irrigation in the southern region of Ukraine]. *Zroshuvane zemlerobstvo*, 52, 10–15. [in Ukrainian]
13. Kokovikhin, S.V., Pysarenko, P.V., Prisyazhnyy, Yu.I., & Pilyarska, O.O. (2011). Vplyv umov volohozabezpechenosti, fonu mineralnoho zhyvlennya ta hustoty stoyannya roslyn na urozhaynist dilyanok hibrydyzatsiyi kukurudzy v umovakh zroshennya [Influence of moisture supply conditions, mineral nutrition background and plant density on the yield of maize hybridization plots under irrigation conditions]. *Zroshuvane zemlerobstvo*, 56, 20–25. [in Ukrainian]
14. Wenhui, Zhao, Leizhen, Liu, & Qiu, Shen et al. (2020). Effects of Water Stress on Photosynthesis, Yield, and Water Use Efficiency in Winter Wheat. *Water*, 12(8), 2127. DOI: 10.3390/w12082127
15. Guswa, A., Celia, M., & Rodriguez-Iturbe, I. (2002). Models of soil moisture dynamics in ecohydrology: A comparative study. *Water Resources Research*, 38(9), 1166. DOI: 10.1029/2001WR000826
16. Reinder, A., Feddes, Holger Hoff, & Michael Bruen et al. (2001) Modeling root water uptake in hydrological models and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2797–2810. DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<27972810:
17. Shirley A., Kurc, & Eric E., Small. (2004). Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico. *Water Resources Research*, 40, W09305. DOI: 10.1029/2004WR003068



18. Posivni ploshchi silskohospodarskykh kultur za yikh vydamy u 2018 rotsi [Sown areas of agricultural crops by their types in 2018]. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrayiny. Retrieved from: <http://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian]
19. Romashchenko, M., Shatkowski, A., & Zhuravlev, O. (2016). Features of application of the «Penman–Monteith» method for conditions of a drip irrigation of the Steppe of Ukraine (on example of grain corn). *Journal of Water and Land Development*, 31, 123–127. DOI: 10.1515/jwld-2016-0043
20. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D.A., & Smith, M.I. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO. Retrieved from: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
21. Goryanskiy, M.M. (1970). Metodika polevykh opytov na oroshayemykh zemlyakh [Methodology of field experiments on irrigated lands]. Kiev : Urozhai. [in Russian]
22. Grunty. Metody laboratornogo vyznachennya fizychnykh vlastyvostey [Soils. Methods of laboratory determination of physical properties]. (2010). DSTU B V.2.1-17:2009. Natsionalnyi standart Ukrayiny. Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny. [in Ukrainian]
23. Shatkovskiy, A.P., Romashchenko, M.I., & Vasyuta, V.V. et al. (2020). Evaluation of the «Penman–Monteith» model for determination of soybeans evapotranspiration in irrigated conditions of the Steppe of Ukraine. *Modern Phytomorphology*, 14, 111–113. DOI: 10.5281/zenodo.4449887
24. Brandes, D., Wilcox, D. (1971). Evapotranspiration and soil moisture dynamics on a semi-arid ponderosa pine hillslope. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(5), 965–974. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2000.tb05702.x
25. Budyko, M.I. (1971). Klimat i zhizn [Climate and life]. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]
26. Shcherbakov, M.V., Brebels, A.A., & Shcherbakova, N.L. et al. (2013). A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Sciences Journal*, 171–176. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.8003

**А.В. Журавлев, А.П. Шатковский, В.В. Васюта**

#### **Влияние водного стресса на эвапотранспирацию сои**

**Аннотация.** По результатам наблюдений установлено, что при снижении влажности почвы происходит непропорциональное уменьшение среднесуточной эвапотранспирации ( $ET_c$ ). Так, в интервале влажности почвы 94–80 % от НВ  $ET_c$  составляла 9,76 мм/сутки, а 70–62 % от НВ – ее величина уменьшалась в 3 раза. При достижении влажности почвы 58,5 % от НВ величина  $ET_c$  не превышала 0,5 мм/сутки, что в 20 раз меньше начальной. Установлено, что снижение влажности почвы на 10 % от НВ в интервале 90–70 % от НВ происходит за 3 суток, а с 70 до 60 % НВ и с 60 до 58 % НВ – за 8 суток. При влажности почвы 70 % от НВ и ниже фактическая эвапотранспирация меньше  $ET_0$ , что подтверждает влияние водного стресса на эвапотранспирацию сои. По расчетам коэффициента водного стресса ( $K_s$ ) получена математическая модель на основе зависимости  $K_s$  от влажности почвы в процентах от наименьшей влагоемкости. Средняя абсолютная процентная ошибка (МАРЕ) которой составляет 8,6 %, что соответствует высокой точности полученной зависимости. В диапазоне влажности почвы от 58 до 80 % от НВ коэффициент водного стресса рассчитывается по формуле:  $K_s = -0,0011 \cdot НВ^2 + 0,1925 НВ - 7$ . При влажности почвы 80 % от НВ и выше  $K_s = 1$ . Проведена комплексная сравнительная оценка существующих методов расчета коэффициента водного стресса  $K_s$  и установлено, что фактические значения  $K_s$  при влажности почвы 80–70 % и 60–65 % от НВ на 8–14 % и 72–32 %, соответственно, меньше, чем  $K_s$  FAO 56, и на 35–40 % больше за определение методом Saxton. Подтверждена необходимость учета снижения эвапотранспирации при расчете водного баланса в условиях водного стресса растений. Расчет эвапотранспирации ( $ET_c$ ) методом Penman–Monteith, без учета коэффициента водного стресса, показал, что величина фактического и расчетного водного баланса совпадает только до уровня влажности почвы 62 % от НВ. При дальнейшем снижении влажности почвы расчетная влажность почвы была на 20 % от НВ меньше фактической, что привело к ошибкам при определении влажности почвы после поливов, поскольку фактическая ее величина равнялась почти 100 % НВ, а расчетная – 60 % от НВ. Доказано, что определение водного баланса расчетными методами без учета коэффициента водного стресса приводит к значительным ошибкам. Следовательно, при расчетах эвапотранспирации растений сои необходимо учитывать влияние водного стресса.

**Ключевые слова:** коэффициент водного стресса, эвапотранспирация, метод Penman–Monteith, водный баланс, соя

O.V. Zhuravlov, A.P. Shatkovskyi, V.V. Vasiuta

### Effects of water stress on evapotranspiration of soybean

**Abstract.** Based on the results of observations, it was specified that when decreasing soil moisture there is a disproportionate decrease in the average daily evapotranspiration (ET). Thus, in the range of soil moisture of 94–80% minimum moisture-holding capacity (MMHC) ET was 9,76 mm a day, and in the range of 70–62% MMHC – its value decreased by 3 times. When the soil moisture reached 58,5% MMHC, the value of ET did not exceed 0,5 mm a day, which is 20 times less than the initial one. It was determined that the decrease in soil moisture by 10% in the range of 90–70% MMHC occurs during 3 days, and from 70 to 60% MMHC and from 60 to 58% MMHC – during 8 days. When soil moisture is 70% MMHC and below, the actual evapotranspiration is less than  $ET_0$  that proves the effect of water stress on soybeans ET. When calculating water stress coefficient (Ks), a mathematical model based on the dependence of Ks on soil moisture as a percentage of MMHC was obtained. The average absolute percentage error (MAPE) is 8,6%, which corresponds to the high accuracy of the obtained dependence. In the range of soil moisture from 58 to 80% MMHC, the water stress coefficient is calculated by the formula  $K_s = -0.0011 \cdot FC^2 + 0.1925 \cdot FC - 7,4541$ . When having soil moisture as 80% MMHC and above,  $K_s = 1$ . A comprehensive comparative assessment of existing methods for calculating water stress coefficient Ks was taken and it was found out that the actual values of Ks when having soil moisture as 80–70 and 60–65% MMHC by 8–14% and 72–32%, respectively, less than Ks FAO 56, and by 35–40% larger than those determined by Saxton method. It was proved the need of taking into account the reduction in evapotranspiration when calculating water balance under water stress of plants. The calculation of evapotranspiration (ET) by the Penman–Monteith method, without taking into account the water stress coefficient, showed that the value of the actual and calculated water balance coincides only when soil moisture does not exceed 62% MMHC. With a further decrease in soil moisture, the estimated soil moisture was 20% less than the actual, which led to the errors in determining soil moisture after irrigation, because its actual value was almost 100% MMHC, and the estimated one was only 60% MMHC. It was proved that the determination of water balance by calculation methods without taking into account the water stress coefficient leads to significant errors. Therefore, when calculating evapotranspiration, it is necessary to take into account the effect of water stress on plants.

**Key words:** water stress coefficient, evapotranspiration, Penman–Monteith method, water balance, soybeans