

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-328>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/328>

УДК 631.675

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ПОЛИВАМИ ПРИ ЗРОШЕННІ

М.І. Ромашенко<sup>1</sup>, докт. техн. наук, В.О. Богаєнко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, А.П. Шатковський<sup>3</sup>, докт. с.-г. наук, Т.В. Матяш<sup>4</sup>, канд. техн. наук, С.С. Коломієць<sup>5</sup>, канд. с.-г. наук, С.А. Шевчук<sup>6</sup>, канд. техн. наук, Ю.Ю. Даниленко<sup>7</sup>, канд. техн. наук, А.С. Сардак<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-9997-1346>; e-mail: [mi.romashchenko@gmail.com](mailto:mi.romashchenko@gmail.com)

<sup>2</sup> Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-3317-9022>; e-mail: [sevab@ukr.net](mailto:sevab@ukr.net)

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-4366-0397>; e-mail: [andriy-1804@ukr.net](mailto:andriy-1804@ukr.net)

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-1225-086X>; e-mail: [t.v.matyash@gmail.com](mailto:t.v.matyash@gmail.com)

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-4329-4382>; e-mail: [kss2006@ukr.net](mailto:kss2006@ukr.net)

<sup>6</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-5844-4980>; e-mail: [sergey\\_shevchuk@ukr.net](mailto:sergey_shevchuk@ukr.net)

<sup>7</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-6778-5039>; e-mail: [iuliia.danylenko@gmail.com](mailto:iuliia.danylenko@gmail.com)

<sup>8</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0540-9492>; e-mail: [anastasiabilobrova1993@gmail.com](mailto:anastasiabilobrova1993@gmail.com)

**Анотація.** Викладено концептуальні засади управління поливами при зрошенні з використанням систем підтримки прийняття рішень. На основі аналізу та досліджень закордонних та вітчизняних авторів доведено, що ефективність управління поливами визначальною мірою залежить від методологічних підходів, які використовують для визначення строків і норм поливу в різноманітних системах підтримки прийняття рішень. Показано, що найповніше потенціал сортів і гібридів різних видів сільськогосподарських культур в умовах зрошення може бути реалізований за умови формування та реалізації режимів зрошення, якими забезпечується підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту у вузькому діапазоні високої вологості (близькому до НВ) протягом всього періоду вегетації. Обґрунтовано, що реалізувати такі режими зрошення можливо лише за умови застосування систем підтримки прийняття рішень із використанням ГІС технологій, в яких поєднані гідрогеологічні моделі розрахунку та прогнозування строків і норм поливу, що базуються на використанні потенціалу ґрунтової вологи як критерію рівня вологозабезпечення та її доступності для рослин і даних дистанційного зондування землі (ДЗЗ). Таке поєднання дає можливість аналізу та розповсюдження даних вимірювань та прогнозування на ділянки, які не охоплено наземними спостереженнями та забезпечує можливість високоефективного еколого-безпечного зрошення за максимального рівня продуктивності поливної води та екологічної безпеки зрошення. Реалізація зазначених принципів у практику управління зрошенням забезпечує отримання врожайності зрошуваних сільськогосподарських культур на рівні 0,85–0,90 від потенціалу сучасних сортів та гібридів за одночасного зниження витрат поливної води на одиницю врожаю, а також мінімізацію або повне виключення втрат поливної води на інфільтрацію, розвитку процесів підтоплення, вторинного осолоцювання та засолення ґрунтів.

**Ключові слова:** зрошення, управління поливами, концептуальні засади, системи підтримки прийняття рішень.

**Актуальність дослідження.** Кліматичні зміни, наявність яких ускладнює умови ведення сільськогосподарського виробництва у більшості регіонів земної кулі, для України є особливо значущим чинником негативного впливу на умови природного вологозабезпечення, адже вони характеризуються найшвидшими для Європи темпами (понад +0,6 °C за останні

10 років) зростання середньорічної температури повітря [1], і, відповідно, посушливості клімату, що унеможливорює стає ведення землеробства у більшості регіонів України без застосування зрошення [2].

Як свідчать результати раніше виконаних в Інституті водних проблем і меліорації НААН досліджень [2], уже сьогодні вирощування

сільськогосподарських культур на всій території степової і на більшій частині лісостепової зони ведеться в умовах значного (від 150 до 450–500 мм і більше) дефіциту кліматичного водного балансу, що зумовлює необхідність суттєвого розширення обсягів застосування зрошення як обов'язкового елемента технологій високоефективного та сталого вирощування більшості сільськогосподарських культур.

Вирішення завдання нарощування обсягів зрошення передбачено схваленими Кабінетом Міністрів України «Стратегією зрошення і дренажу в Україні на період до 2030 року» [3] та «Планом заходів із реалізації Стратегії зрошення і дренажу в Україні на період до 2030 р.» [4]. Виконання завдань «Стратегії...» в частині збільшення площ поливу до 2030 року на 1,0–1,2 млн га буде вимагати залучення значних (не менше 4,0–4,5 млрд м<sup>3</sup>) додаткових обсягів води. Зважаючи на те, що зміна клімату негативно впливає не тільки на умови природного вологозабезпечення, а й на стан забезпечення придатними до використання водними ресурсами [5], раціональне та ефективне використання води за зрошення є важливою умовою нарощування потенціалу зрошення і від рівня його розв'язання значною мірою буде залежати можливість та обсяги вирішення завдання розширення площ поливу.

У свою чергу, аналіз тенденцій розвитку зрошення на сучасному етапі свідчить, що головними складовими розв'язання завдання ефективного використання води при зрошенні є застосування водозберігаючих способів зрошення (різновиди краплинної та низько-напірного дощування) та використання систем підтримки прийняття рішень при управлінні поливами [6].

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) у зрошенні є інструментами, які застосовують при управлінні технологічними процесами поливу з метою отримання найвищих урожаїв шляхом регулювання подачі води рослинам відповідно до їх водопотреби протягом усього періоду вегетації. На сучасному етапі розвитку СППР потребують використання ГІС технологій [7], які суттєво полегшують введення даних, інтерпретацію та розуміння результатів.

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** Як свідчить аналіз наявних публікацій [8], в основі СППР у зрошенні зазвичай лежать моделі накопичення біомаси та моделі евапотранспірації. За цього найпоширенішим є підхід, заснований на наявності взаємозв'язку між сезонною транспірацією культур за оптимального вологозабезпечення та їх біомасою [9].

Забезпечення необхідного режиму водоподачі при зрошенні здійснюється із застосуванням різноманітних методів [10–14], серед яких виокремлюють підхід, що базується на оцінюванні стану рослин [14] та підхід, заснований на контролюванні вологозабезпечення кореневого шару ґрунту [10–13].

Відомо, що технологічною основою реалізації необхідного режиму подачі води рослинам є режим зрошення [15]. Саме методологічний рівень формування режиму зрошення буде визначати основні можливості та складові ефективного та еколого-безпечного використання та продуктивність поливної води при управлінні поливами з допомогою СППР.

Результати багаторічних та різнопланових досліджень і розробок з питань формування режимів зрошення та управління поливами, зокрема й з використанням автоматизованих інформаційних, інформаційно-аналітичних та інформаційно-дорадчих систем управління зрошенням, що виконані в Інституті водних проблем і меліорації НААН протягом декількох десятиліть, у тому числі й за участю та безпосередньо авторами цієї статті [16; 17; 18], стали основою формування системного бачення концептуальних засад управління поливами у складі СППР. Їх застосування дозволяє найбільш повно використовувати потенціал сортів та гібридів різноманітних сільськогосподарських культур за мінімальних витрат поливної води на одиницю врожаю і практично повному виключенні втрат води на інфільтрацію, а отже – за мінімальних ризиків розвитку процесів підтоплення та вторинного засолення зрошуваних земель.

**Метою досліджень** є визначення концептуальних засад управління поливами з використанням систем підтримки прийняття рішень для підвищення ефективності та екологічної безпеки зрошення.

**Матеріали і методи досліджень.** Дослідження проведено із використанням інформаційно-аналітичного методу для аналізу результатів з питань обґрунтування режимів зрошення та управління поливами, які висвітлено у вітчизняних та закордонних публікаціях: експериментального обґрунтування діапазону оптимального вологозабезпечення кореневого шару ґрунту, НВ та передполивного порога для різних ґрунтів та видів сільськогосподарських культур, математичного моделювання для прогностичних розрахунків стану вологозабезпечення кореневого шару ґрунту та визначення строків і норм поливу [19]. Величину евапотранспірації визначали [20] розрахунками для конкретних видів сільськогосподарських

культур із використанням моделей Пенмана-Монтейта [21], Штойка [22] та Іванова [23], а також із використанням алгоритму SEBAL [24] при обробці даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Дані ДЗЗ використовували також для оцінювання стану рослин та якості проведення поливів.

**Результати досліджень та їх обговорення.** В узагальненому вигляді концептуальні засади управління поливами при зрошенні можливо звести до таких положень. Проведення поливів має забезпечувати підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту протягом усього періоду вегетації в оптимальному для росту та розвитку сільськогосподарських культур діапазоні. Під оптимальним розуміється такий рівень вологозабезпечення, за підтримання якого евапотранспірація культур є рівною або близькою до потенційно можливої за конкретних погодних умов [13].

Ця умова може бути означена виразом

$$\frac{E_f}{E_{п.м.}} \leq 1,$$

де  $E_f$  – фактична, а  $E_{п.м.}$  – потенційно можлива евапотранспірація за конкретних погодних умов.

За цього як верхня межа оптимального діапазону вологозабезпечення (ПДВ) кореневого шару ґрунту згідно з результатами абсолютної більшості досліджень приймається найменша вологоємність (НВ) ґрунту [13], а як нижня – так званий передполивний поріг [13], величина якого на відміну від НВ є динамічним показником, що змінюється залежно від виду та фази розвитку зрошуваної сільськогосподарської культури, а також властивостей ґрунту [25].

Саме величина оптимального діапазону вологозабезпечення (ОДВ) кореневого шару ґрунту є показником, який безпосередньо впливає на величину норми поливу, тому підхід до його визначення потребує, на наше переконання, значних уточнень порівняно з класичними підходами [13].

Насамперед, це стосується визначення НВ. Класичні та найбільш поширені методи визначення НВ (методом заливу площадок), за результатами наших досліджень [26], завищують величину НВ, провокуючи тим самим вищий рівень зволоження ґрунтів при поливах і, відповідно, спричиняючи формування в кореневому шарі ґрунту надлишкових запасів легкорухомої вологи, що створює передумови для втрат поливної води на інфільтрацію за межі кореневого шару ґрунту. Тому в ІВПіМ розроблено та апробовано методику лабораторного визначення НВ на монолітах ґрунту в дослідках із визначення основної гідрофізичної характеристики (ОГХ) ґрунтів [27].

Як показали результати визначень НВ з використанням цієї методики, параметри, що встановлюються за критерієм інтенсивності гравітаційного стікання вологи [27], як правило, на декілька відсотків об'єму менші за величини НВ для цих же ґрунтів, що визначені методом заливу площадок (табл. 1).

Тому нами в практиці управління поливами, як верхня межа ОДВ кореневого шару ґрунту рекомендується використовувати величини НВ, що визначають за методикою, яка викладена в [27], і характеризувати їх відповідними значеннями всмоктувального тиску (капілярного потенціалу), а не вологості ґрунту.

#### 1. Співставлення польових і лабораторних визначень найменшої вологомісткості (НВ) (с. Небелиця Макарівського району Київської області)

Ділянка	Інтервал, м	Літологія	НВ, % об'єму		Різниця значень НВ, %
			після наливу	лабораторні	
Точка 1	0,05–0,20	суглинки легкі	33,38	27,53	-5,63
	0,25–0,40		30,48	30,66	+0,18
	0,65–0,80		28,87	24,7	-4,17
Точка 2	0,05–0,20	суглинки середні	37,56	36,41	-1,11
	0,25–0,40	суглинки легкі	36,84	31,8	-5,04
	0,55–0,70		36,26	33,59	-2,67
Точка 3	0,05–0,20	пісок	14,99	11,56	-3,45
	0,30–0,45		14,33	7,83	-6,50
	0,55–0,70		15,5	5,0	-10,5
Точка 4	0,05–0,20	субстрат (суглинки легкі)	33,55	26,3	-7,25
	0,45–0,60	суглинки середні	27,61	25,5	-2,29
	0,65–0,80		28,63	26,33	-2,30

Стосовно ж нижньої межі ОДВ кореневого шару ґрунту, то протягом тривалого часу його значення встановлювались за результатами експериментальних польових досліджень і для різних сільськогосподарських культур за їх вирощування на різних ґрунтах пропонувалось використовувати величини вологості ґрунту в межах від 0,6 до 0,9 НВ, залежно від властивостей ґрунту, виду сільськогосподарської культури та фази її розвитку [28]. Надалі дослідження багатьох учених, зокрема й авторів цієї статті, засвідчили [29; 30], що у разі підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту у вузькому діапазоні високої (як правило вище 80% від НВ) вологості, завжди витримується умова забезпечення фактичної евапотранспірації рослин рівним або близьким до потенційно можливого за даних погодних умов та врожайність, близька до генетичного потенціалу сорту або гібриду (рис. 1).

Але найбільш істотні зміни щодо підходів у визначенні нижньої межі ОДВ кореневого шару ґрунту пов'язані з початком використання для цієї мети основної гідрофізичної характеристики (кривої рівноважної сорбції) ґрунту з одночасним використанням як показника вологозабезпечення не вологості ґрунту, а всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи [13]. Використання ОГХ дозволило розглядати вологоємність ґрунту, зокрема для цілей визначення меж ОДВ в поєднанні зі структурою пор, і, як уже зазначалось, визначати як НВ (верхню межу

ОДВ), так і величину передполивного порога, не в показниках вологості ґрунту, а величиною всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи [13]. За цього величину всмоктувального тиску, що відповідає передполивному порогу, пропонуємо визначати з урахуванням резервування в кореновому шарі ґрунту запасів легкодоступної вологи як мінімум на одну добу евапотранспірації на рівні потенційно можливого споживання вологи (рис. 2).

Такий підхід зумовив значне звуження ОДВ та дав можливість обґрунтувати перехід на проведення поливів значно (у 1,5–2,0 раза) меншими нормами порівняно з тими, що застосовували у попередні роки [32]. Технологічно це узгоджується з продуктивністю дощувальних машин нового покоління та дає можливість реалізовувати еколого-безпечні технології поливу за одночасного підтримання фактичної евапотранспірації зрошуваних сільськогосподарських культур на рівні потенційно можливого і, відповідно, отримувати врожаї сільськогосподарських культур близькими до максимально можливих за прийнятого рівня агротехнологій та одночасного скорочення витрат поливної води на формування одиниці врожаю [32–34].

Не менш важливим для формування та реалізації режимів зрошення є визначення та прогнозування величини евапотранспірації. Точність оцінок евапотранспірації є одним із визначальних чинників точності моделю-

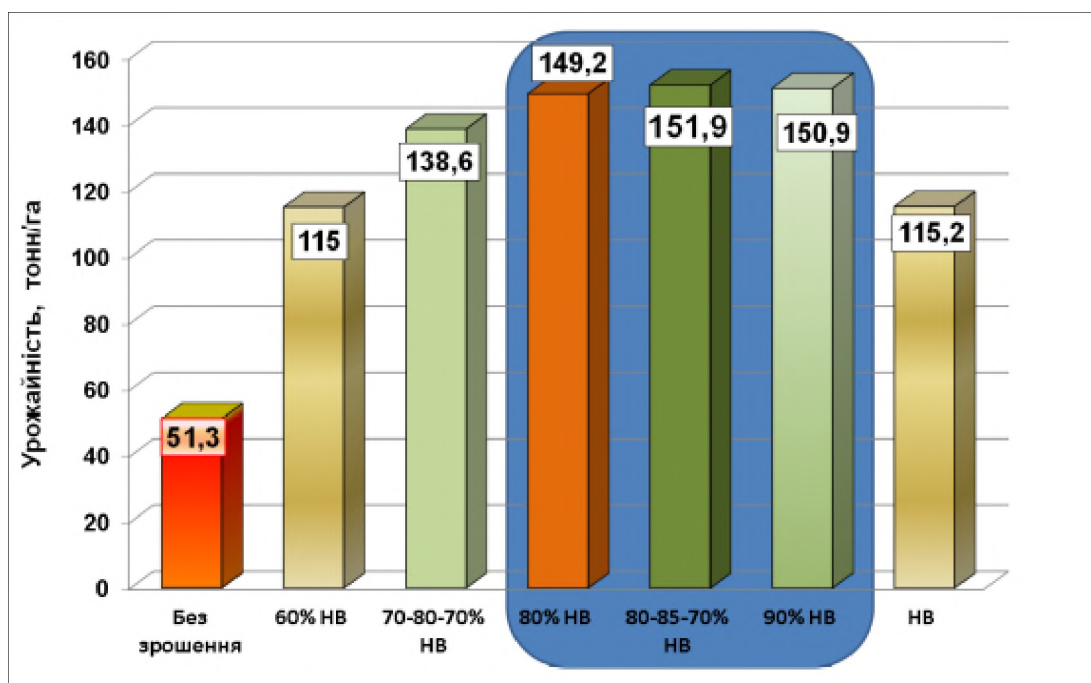


Рис. 1. Урожайність томата розсадного залежно від передполивної вологості ґрунту [31]

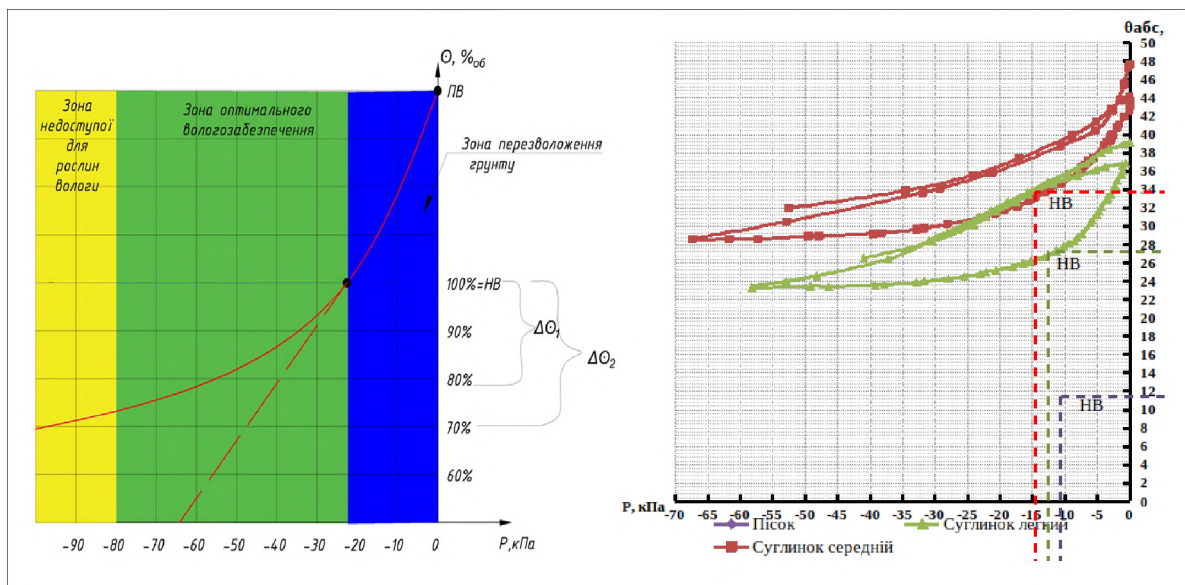


Рис. 2. Використання ОГХ для визначення НВ та передполивного порога

вання стану вологозабезпечення кореневого шару ґрунтів в процесі управління поливами. З одного боку, для кількісного визначення інтенсивності евапотранспірації та більш точного моделювання вологоперенесення в системі «ґрунт-рослина-атмосфера» потрібні інтегровані моделі, що враховують фізику ґрунтів та атмосфери і фізіологію рослин [35], наприклад моделі Пенмана-Монтейта [21], Шатлворта-Уолеса [36] і Прістлі-Тейлора [37]. З іншого боку, існує великий масив емпіричних методів, ефективність яких обмежено конкретними агрокліматичними умовами. Такими методами, що найбільше використовують в умовах України, є методи А.М. Алпатьєва та С.М. Алпатьєва [38], Д.А. Штойка [22], М.І. Будика [39] та М.М. Іванова [23].

Для дослідження процесів вирощування сільськогосподарських культур за даними робіт [40, 41] найкраще використовувати методи, що враховують найбільшу кількість вхідних параметрів. За цього питання визначення точності параметрів евапотранспірації залишається актуальним для кожного окремого випадку [20]. Це витікає з того, що в умовах зрошення, підтримувані діапазони вологості кореневого шару ґрунту суттєво впливають на доступність вологи рослинам [13]. Тому точність визначення інтенсивності евапотранспірації безпосередньо впливає на точність визначення строків і норм поливу.

Враховуючи, що на сьогодні не існує універсального, придатного для будь-яких агрокліматичних умов, методу визначення інтенсивності евапотранспірації в СППР при управлінні

поливами на підставі проведених досліджень [20] рекомендується поєднувати одночасне використання інтегрованих моделей з максимальною кількістю параметрів, насамперед Пенмана-Монтейта та моделей, які розроблено для конкретних агрокліматичних умов України, насамперед – методів Д.А. Штойка та М.М. Іванова.

Слід зауважити, що використання методу Пенмана-Монтейта рекомендується з урахуванням рекомендацій ФАО [42] та його використанням у сучасних інтернет-метеостанціях типу iMetos, але з обов'язковим уточненням коефіцієнтів культур  $K_c$  для різних ґрунтово-кліматичних зон України [43]. Доповнення методу Пенмана-Монтейта методами Д.А. Штойка та М.М. Іванова, як показали результати наших досліджень [20], дає можливість більш точного визначення параметрів евапотранспірації в окремі фази розвитку сільськогосподарських культур.

Іншою, вкрай важливою, складовою сучасних СППР при управлінні поливами є методика прогнозування вологозабезпечення ґрунтів. Зараз найбільш використовуваним для вказаних цілей є диференціальне рівняння Річардса [44], яке описує вологоперенесення в ґрунтових середовищах із властивостями, незалежними від масштабу. Нами, для підвищення точності моделювання процесів масоперенесення в пористих середовищах фрактальної структури, можуть бути використані дробово-диференціальні рівняння [45–48]. За цього рекомендується використовувати рівняння, які описують процеси масоперенесення в термінах

потенціалу ґрунтової вологи, а не у вологості ґрунту.

Прогнозування зміни стану вологозабезпечення кореневмісного шару ґрунту пропонується, зокрема, здійснювати використовуючи одновимірне дробово-диференціальне за часовою та просторовою змінними рівняння вологоперенесення, що має вигляд [48] та є узагальненнями класичного рівняння Річардса для функцій напору:

$$D_t^{(\beta)} H = C^{-1}(H) \left[ D_z^{(\alpha)} \left( k(H) \frac{\partial H}{\partial z} \right) - S \right],$$

$$0 \leq z \leq L, t \geq 0, \quad (1)$$

де  $H$  – напір,  $C^{-1}(H) = \frac{\partial H}{\partial \theta}$ ,  $\theta$  – об’ємна воло-

гість ґрунту (%),  $k(H)$  – коефіцієнт вологоперенесення,  $S$  – функція екстракції, що моделює взаємодію кореневої системи рослин з ґрунтом,  $D_t^{(\beta)}$  – дробова похідна Капуто-Герасимова за часовою змінною виду,

$$D_t^{(\beta)} H(t, z) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^t H'(t, z) (t-\tau)^{-\beta} d\tau$$

$D_z^{(\alpha)}$  – аналогічна похідна за просторовою змінною,  $0 < \alpha, \beta \leq 1$ .

Використання моделей, заснованих на рівнянні (1) та подібних дробово-диференціальних рівняннях, дозволяє підвищити точність моделювання у складних геогідрологічних умовах завдяки врахуванню нелокальних ефектів у часі та просторі. Окрім цього, такі моделі можна розглядати як напівемпіричні, де порядки дробових похідних є додатковими параметрами, значення яких ідентифікуються в процесі адаптації моделі до конкретних умов вирощування культури. Зауважимо, що одним із критичних ефектів за цього, які мають розпізнаватись та враховуватись, є можливе перенавчання (*overfitting*) моделі.

Крім підвищення точності моделювання, використання таких рівнянь дає можливість розглядати зону аерації в одній гідродинамічній схемі з горизонтами ґрунтових вод, а водотрив водоносного горизонту може використовуватись як гранична умова другого ряду в крайовій задачі моделювання процесів вологоперенесення з метою прогнозування рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту та визначення строків і норм поливу.

Звичайно ж, що сучасні СППР за визначення строків і норм поливу, мають використовувати

не тільки розрахункові методи, а й мати можливість корегування розрахунків за даними прямих вимірювань рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту. За цього важливим є вибір параметра, інструментальні вимірювання якого буде використано в якості контрольних для корегування цих розрахунків і рівня вологозабезпечення кореневого шару, а також строків та норм поливу.

Враховуючи, що нами для прогнозних розрахунків рівня вологозабезпечення, строків та норм поливу використано рівняння вологоперенесення в термінах потенціалу вологи, а величини НВ і передполивного порога характеризуються відповідними значеннями всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи, логічним і послідовним є використання саме всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) в якості параметра, що інструментально контролюється на реперних полях для корегування прогнозних розрахунків. За цього для його вимірювання використовують тензіометричні датчики Watermark 200 SS у складі автоматичних інтернет-метеостанцій типу iMetos або Devis. Кількість точок вимірювань визначається виходячи з необхідності мати як мінімум одну точку інструментальних вимірювань для кожної пари «ґрунт-рослина» з вимірюванням всмоктувального тиску як мінімум на двох глибинах ґрунтового профілю.

Зрозуміло, що поступова відмова від використання вологості ґрунту в якості параметра (індикатора) рівня вологозабезпечення ґрунтів і перехід на використання для цього параметра потенціалу ґрунтової вологи зумовлено перш за все тим, що саме потенціал ґрунтової вологи або його складові – всмоктувальний тиск чи капілярний потенціал – на відміну від вологості ґрунту є прямими показниками, які характеризують силу, з якою ґрунтова волога утримується в порах ґрунту і не залежать від його властивостей. Його використання не вимагає прив’язки до НВ. Крім того, саме градієнт потенціалу ґрунтової вологи визначає напрямок руху вологи в ґрунтовому профілі [49]. Крім чисто фізичних переваг, використання потенціалу ґрунтової вологи значно, мінімум на порядок, підвищує точність визначення стану вологозабезпечення та доступність ґрунтової вологи для рослин через вищу роздільну здатність та точність приладів вимірювання тензіометричного тиску порівняно з датчиками вимірювання об’ємної вологості ґрунту [50].

Важливими аспектами методів управління зрошенням є прогнозування погодних умов, які використовують для прогнозних розрахунків евапотранспірації та вологозапасів

кореневого шару ґрунту за визначення строків і норм поливу. Досвід виконання цих робіт [18] свідчить, що з достатньою для практики управління поливами точністю можна використовувати усереднені дані прогнозів погоди декількох (не менше трьох) найпоширеніших сайтів погоди [51]. Враховуючи, що прогнозування строків і норм поливу в СППР, як правило, проводиться превентивно на строк не більше 5 діб, тому і прогнози погоди на такий термін можна вважати більш-менш достовірними [18; 51] і використовувати їх для розрахунку параметрів евапотранспірації, величина якої потім використовується при прогнозних розрахунках строків і норм поливу.

Іншим важливим аспектом сучасних підходів до управління зрошенням є використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Поєднання в СППР гідрологічних моделей та даних ДЗЗ дозволяє нівелювати багато недоліків, пов'язаних із низькою часовою роздільною здатністю ДЗЗ [52]. Таке комбінування полегшує часовий аналіз для оцінювання ефективності зрошення [53; 54]. ДЗЗ також можливо використовувати для ідентифікації ділянок, у межах яких необхідне вдосконалення управління зрошенням [55]. Іншим важливим аспектом використання даних ДЗЗ є те, що дистанційна оцінка вологості ґрунту [56; 57] та наближення рослин до стану водного стресу [58] дозволяє проводити управління зрошенням на полях, не покритих наземними засобами моніторингу, використовуючи наземні дані з інших полів для калібрування відповідних моделей.

Крім наведеного, ефективне управління зрошенням потребує також повного врахування всіх процесів в системі «ґрунт-рослина-повітря». СППР у зрошенні також часто моделюють процеси, пов'язані з режимами живлення рослин, зокрема цикли азоту [59; 60], забруднення поверхневих та підземних вод [61], містять модулі оцінки ризиків та економічного моделювання [62].

В Інституті водних проблем і меліорації НААН з використанням викладених вище концептуальних засад розроблена та пройшла успішну апробацію «Інформаційно-аналітична система (ІАС) управління поливами «Полив-онлайн». Результати впровадження ІАС «Полив-онлайн» у різних природно-кліматичних зонах України для управління поливами різних видів сільськогосподарських культур [18] засвідчили високу ефективність зрошення, що є комплексним результатом із реалізації режимів

зрошення, сформованих відповідно до концептуальних підходів, які викладено у цій статті.

**Висновки.** Прогресуюче погіршення природного вологозабезпечення внаслідок глобального потепління потребує розширення застосування зрошення як основного технологічного прийому забезпечення сталості землеробства в умовах змін клімату. В цих умовах найвища ефективність та екологічна безпечність зрошення досягається за умови використання для управління поливами систем підтримки прийняття рішень, які реалізують такі концептуальні засади:

- проведення поливів має забезпечувати підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту у вузькому діапазоні високої вологості ( $0,80-0,85 \text{ НВ} \div 0,95 \text{ НВ}$ );
- використання тензіометричного тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи в якості критерію рівня вологозабезпечення та доступності ґрунтової вологи для рослин;
- використання основної гідрофізичної характеристики (кривої водозатримувальної здатності для визначення НВ, передполивного порога та оптимального діапазону вологозабезпечення кореневого шару ґрунту);
- використання для розрахунків евапотранспірації декількох методів, передбачаючи поєднання інтегрованих та емпіричних моделей;
- використання рівняння неусталеного вологоперенесення в ненасичено-насичених ґрунтах зони аерації в термінах напорів для прогнозних розрахунків стану вологозабезпечення кореневого шару ґрунту та строків і норм поливу;
- поєднання даних прогнозних розрахунків та експериментальних вимірювань рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту за допомогою тензіометричних датчиків;
- використання даних ДЗЗ для визначення строків і норм поливу на ділянках, не охоплених інструментальними моніторинговими спостереженнями.

Введення зазначених принципів у практику управління зрошенням забезпечує:

- отримання врожайності зрошуваних сільськогосподарських культур на рівні  $0,85-0,90$  від потенціалу сортів і гібридів за одночасного зниження витрат поливної води на одиницю врожаю;
- мінімізацію або повне виключення втрат поливної води на інфільтрацію, розвиток процесів підтоплення та вторинного засолення.

Отже, реалізація зазначених принципів у повному обсязі можлива лише за умови застосування сучасних систем підтримки прийняття рішень.

## Бібліографія

1. Projections of air temperature and relative humidity in Ukraine regions to the middle of the 21st century based on regional climate model ensembles / Krakovska S.V. et al. *Heoinformatyka*. 2018. № 3(67). Pp. 62–77.
2. Наукові засади розвитку систем землеробства в зоні Українського Степу / Ромащенко М.І. та ін. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 10. С. 5–9.
3. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> (дата звернення: 24.05.2022).
4. План заходів з реалізації Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 р. № 1567-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npras/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-z-realizaciyi-strategiyi-zroshennya-ta-drenazhu-s211020> (дата звернення: 24.05.2022).
5. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / Ромащенко, М.І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 1. С. 5–22.
6. Rinaldi M., He Z. Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. *Advances in Agronomy*. 2014. № 123. Pp. 229–279.
7. Mainaa M.M., Amina M.S.M., Yazidb M.A. Web geographic information system decision support system for irrigation water management: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 2014. № 64(4). Pp. 283–293.
8. Досвід розробки та шляхи удосконалення систем управління зрошенням / Ромащенко М.І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2019. № 2. С. 17–30.
9. de Wit C.T. Transpiration and crop yields. Versl. Landbouwk. Onderz. 64.6 Institute of Biological Chemistry Research on Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands. 1958
10. Root Zone Water Quality Model (RZWQM2): Model Use, Calibration, and Validation. Ma, L. et al. *Transactions of the ASABE*. 2012. № 55(4). Pp. 1425–1446.
11. Muñoz-Carpena R., Dukes M. Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops. University of Florida: Gainesville, FL, USA. 2005.
12. Sharma N., Hakkim A., Singh A.K. Development and field evaluation of a low-cost automated drip irrigation system. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2021. № 20(2). Pp. 188–194.
13. Campbell G. S., Campbell M.D., Hillel D. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in irrigation*. 1982. № 1. Pp. 25–42.
14. Jones H.J. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*. 2004. № 55(407). Pp. 2427–2436.
15. Режими і способи зрошення / Ромащенко М.І. та ін. *Аграрна наука*. 2009. С. 313–350.
16. Bohaienko V., Matiash T., Krucheniuk A. Decision Support System in Sprinkler Irrigation Based on a Fractional Moisture Transport Model. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEEA 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 83. Springer, Cham.
17. New planning technique to master the future of water on local and regional level in Ukraine / Zhovtonog O. et al. *Journal of Water and Climate Change*. 2011. № 2(2–3). Pp. 189–200.
18. Using smart technologies in irrigation management. In International Commission on Irrigation and Drainage / Gadzalo Ya. et al. // 3rd World Irrigation Forum (WIF3). 2019. Pp. 1–6. (Id: W.1.3.02).
19. Ромащенко М.І., Мистецкий Г.Е., Ключин Д.А. Математическая модель внутривлажного влаго-, соле- и теплопереноса при микроорошении. *Меліорація і водне господарство*. 1991. № 7. С. 51–53.
20. Influence of evapotranspiration assessment on the accuracy of moisture transport modeling under the conditions of sprinkling irrigation in the south of Ukraine / Romashchenko M.I. et al. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2020. № 66(10). Pp. 1424–1435.
21. Monteith J.L. Evaporation and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symposium of the Society for Experimental Biology. Fogg G.E. (ed). 8–12 September 1964, Swansea. The Company of Biologists: Cambridge, 1965. Pp. 205–234.
22. Розрахункові методи визначення сумарного випаровування і строків поливу с.-г. культур / Штойко Д.А. та ін. *Зрошувальне землеробство*. 1977. С. 3–8.
23. Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости. Москва, 1954. С. 189–196.
24. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) / Bastiaanssen W.G.M. et al. *Formulation. J. Hydrol.* 1988. № 212–213. Pp. 198–212.



25. Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China / Wang F.X. et al. *Field Crops Research*. 2011. № 122(1). Pp. 78–84.
26. Муромцев Н.Н., Ромащенко М.И., Панасенко И.И. Определение параметров влагопереноса в полевых условиях. *Мелиорация и водное хозяйство*. 1982. № 56. С. 11–14.
27. Ромащенко М.И., Коломієць С.С., Білоброва А.С. Система лабораторного діагностування водно-фізичних властивостей ґрунтів. *Мелиорация і водне господарство*. 2019. № 2. С. 199–208.
28. Шатковський А.П., Черевичний Ю.О., Чабанов А.С. Закономірності формування режиму краплинного зрошення просапних культур. *Мелиорация і водне господарство*. 2011. № 99. С. 25–32.
29. Особливості режимів краплинного зрошення просапних культур / Ромащенко М.И. та ін. *Вісник аграрної науки*. № 93(2). С. 51–56.
30. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions / Shahnazari A. et al. *Field Crops Research*. 2007. № 100(1). Pp. 117–124.
31. Шатковський А.П., Черевичний Ю.О. Водоспоживання та врожайність пасльонових культур за краплинного зрошення в умовах Степу України. *Мелиорация і водне господарство*. 2013. № 100(1). С. 27–33.
32. Ромащенко М.И. Некоторые аспекты обоснования уменьшения оросительных норм. *Вісник аграрної науки*. 1992. С. 35–39.
33. Ромащенко М.И., Балюк С.А., Жовтоног О.І. Науково-методичні основи та система ґрунтово-екологічного забезпечення режимів зрошення. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 1998. Спец. випуск част. 1. С. 38–43.
34. Ромащенко М.И., Жовтоног О.І., Філіпенко Л.А. Обґрунтування екологічно безпечних поливних норм. *Аграрна наука*. 1999. № 11. С. 56–61.
35. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M.B. Land-surface modelling in hydrological perspective – a review. *Biogeosciences*. 2006. № 3(2). Pp. 229–241.
36. Shuttleworth W.J., Wallace J.S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1985. № 111. Pp. 839–855.
37. Priestley C.H.B., Taylor R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. 1972. № 100. Pp. 81–92.
38. Алпатьев А.М. О методах расчёта потребностей в воде культурных фитоценозов в связи с развитием орошения в СССР. Биологические основы орошаемого земледелия. Москва : Наука. 1974. С. 85–89.
39. Budyko M.I. *Climate and Life*; Academic Press: New York, NY, USA. 1974.
40. Faybishenko B. Climatic Forecasting of Net Infiltration at Yucca Mountain Using Analogue Meteorological Data. *Vadose Zone Journal*. 2007. № 6. Pp. 77–92.
41. Faybishenko B. Fuzzy-probabilistic calculations of water-balance uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2010. № 24(6). Pp. 939–952.
42. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions / Allen R.G. et al. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 2005. № 131 (1). Pp. 2–13.
43. Ромащенко М.И., Шатковський А.П., Журавльов О.В. Особливості застосування методу «Penman-Monteith» в умовах краплинного зрошення Степу України (на прикладі зернової кукурудзи). *Вісник аграрної науки*. 2016. № 5. С. 55–59.
44. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1931. 1(5). Pp. 318–333.
45. Pachepsky Y., Benson D., Rawls W. Simulating Scale-Dependent Solute Transport in Soils with the Fractional Advective-Dispersive Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2010. № 64. Pp. 1234–1243.
46. Fractional governing equations of transient groundwater flow in confined aquifers with multi-fractional dimensions in fractional time / Kavvas, M.L. et al. *Earth Syst. Dynam.* 2017. № 8, pp. 921–929.
47. Kavvas M.L., Ercan A., Polsinelli J. Governing equations of transient soil water flow and soil water flux in multi-dimensional fractional anisotropic media and fractional time. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. № 21. Pp. 1547–1557.
48. Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation / Romashchenko, M.I. et al. *Irrigation Science*. 2021. № 39(3). Pp. 385–396.
49. Ромащенко М.И. Исследование влагопереноса с целью регулирования режима капельного орошения садов : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Киев, 1981. 25 с.

50. Рекомендації з оперативного контролю та управління режимом зрошення сільськогосподарських культур із застосуванням тензіометричного методу / Ромашенко М.І. та ін. Київ : ІВПіМ НААН. 2020. 71 с.
51. Data mining for a model of irrigation control using weather web-services / Kovalchuk V. et al. *In International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications*. 2018. (pp. 133–143). Springer, Cham.
52. Droogers P., Bastiaanssen W. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2002. № 128 (1). Pp. 11–18.
53. Kite G.W., Droogers P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J. Hydrol.* 2000. № 229 (1–2). Pp. 3–18.
54. Kite G.W. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *J. Hydrol.* 2000. № 229 (1–2). Pp. 59–69.
55. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level / Santos C. et al. *Irrig. Sci.* 2008. № 26 (3). Pp. 277–288.
56. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture / Babaeian E. et al. *Reviews of Geophysics*. 2019. № 57. Pp. 530–616.
57. Danylenko Iu., Bohaienko V. Monitoring of soil moisture in the south of Ukraine using active and passive remote sensing data. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXII*. 2020. 11528. 1152807.
58. Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review / Virnodkar, S.S. et al. *Precision Agric.* 2020. № 21. Pp. 1121–1155.
59. Williams J.R., Izaurralde R.C. The APEX model. BRC Report 2005–02. Blackland Research and Extension Center. Blackland/
60. Sediment and nutrient modeling for TMDL development and implementation / Borah D.K. et al. *Trans. ASABE*. 2006. № 49 (4). Pp. 967–986.
61. Panagopoulos Y., Makropoulos C., Mimikou M. Decision support for diffuse pollution management. *Environ. Model Softw.* 2012. № 30. Pp. 57–70.
62. Management model for decision support when applying low quality water in irrigation / Styczen M. et al. *Agric. Water Manage.* 2010. № 98. Pp. 472–781.

#### References

1. Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Gnatiuk, N.V., & Shpytal, T.M. (2018). Projections of air temperature and relative humidity in Ukraine regions to the middle of the 21st century based on regional climate model ensembles. *Heoinformatyka*, 3(67), 62–77.
2. Romashchenko, M., Tarariko, Yu., Shatkovskiy, A., Saydak, R., & Soroka, Yu. (2015). *Naukovi zasady rozvytku system zemlerobstva v zoni Ukrainskoho Stepu [Scientific principles of the development of farming agriculture systems in the zone of Ukrainian Steppe (in Ukrainian)]*. *Bulletin of Agrarian Science*, 10, 5–9. [in Ukrainian].
3. *Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku. Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 14.08.2019 r. № 688-r [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 14, 2019 № 688-r]*, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> [in Ukrainian].
4. *Plan zahodiv z realizatsii Stratehii zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku. Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21.10.2020 r. № 1567-r [Action plan for the implementation of the Irrigation and Drainage Strategy in Ukraine until 2030. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 21.10.2020 № 1567-r]*, available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-z-realizatsiyi-strategiyi-zroshennia-ta-drenazhu-s211020> [in Ukrainian].
5. Romashchenko, M.I., Husiev, Yu.V., Shatkovskiy, A.P., Saidak, R.V., Yatsiuk, M.V., Shevchenko, A.M., & Matiash, T.V. (2020). *Vplyv suchasnykh klimatychnykh zmin na vodni resursy ta silskohospodarske vyrobnytstvo [Impact of modern climate change on water resources and agricultural production]*. *Melioratsiia i vodne gospodarstvo*, 1, 5–22. [in Ukrainian].
6. Rinaldi, M., & He, Z. (2014). Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. *Advances in Agronomy*, 123, 229–279.
7. Mainaa, M.M., Amina, M.S.M., & Yazidb, M.A. (2014). Web geographic information system decision support system for irrigation water management: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 64(4), 283–293.

8. Romashchenko, M., Matiash, T., Bohaienko, V., Kovalchuk, V., Voitovich, O., Krucheniuk, A., Knysh, V., & Shlikhta, V. (2019). Development experience and ways of improvement of irrigation management systems. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 2, 17–30.
9. de Wit, C.T. (1958). Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 64.6 Institute of Biological Chemistry Research on Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands.
10. Ma, L., Ahuja, L.R., Nolan, B.T., Malone, R.W., Trout, T.J., & Qi, Z. (2012). Root Zone Water Quality Model (RZWQM2): Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1425–1446.
11. Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. (2005). *Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops*. University of Florida: Gainesville, FL, USA.
12. Sharma, N., Hakkim, A., & Singh, A.K. (2021). Development and field evaluation of a low-cost automated drip irrigation system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(2), 188–194.
13. Campbell, G. S., Campbell, M. D., & Hillel, D. (1982). Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in irrigation*, 1, 25–42.
14. Jones, H.J. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436.
15. Romashchenko, M.I., Pysarenko, A.V., Pysarenko, P.V., Baliuk, S.A., Shatkovskiy A.P. et al. (2009). *Rezhymy i sposoby zroshennia [Modes and methods of irrigation]*. Kyiv : Ahrarna nauka, 313–350.
16. Bohaienko, V., Matiash, T., & Krucheniuk, A. (2021). Decision Support System in Sprinkler Irrigation Based on a Fractional Moisture Transport Model. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 83. Springer, Cham.
17. Zhovtonog, O., Hoffmann, M., Polishchuk, V., & Dubel, A. (2011). New planning technique to master the future of water on local and regional level in Ukraine. *Journal of Water and Climate Change*, 2(2–3), 189–200.
18. Gadzalo, Ya., Romashchenko, M., Kovalchuk, V., Matiash, T., & Voitovich O. (2019). Using smart technologies in irrigation management. In *International Commission on Irrigation and Drainage, 3rd World Irrigation Forum (WIF3)* (pp. 1–6). Id: W.1.3.02.
19. Romashchenko, M.Y., Mystetskyi, H.E., & Kliushyn, D.A. (1991). *Matematycheskaia model vnutrypochvennoho vlaho-, sole- y teploperenosa pry mykrooroshenny [Mathematical model of intrasoil moisture, salt and heat transfer during microirrigation]*. *Melyoratsiia y vodnoe khoziaistvo*, 7, 51–53.
20. Romashchenko, M.I., Bohaienko, V.O., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., & Danylenko, Iu. Iu. (2020). Influence of evapotranspiration assessment on the accuracy of moisture transport modeling under the conditions of sprinkling irrigation in the south of Ukraine. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(10), 1424–1435.
21. Monteith, J.L. (1965). Evaporation and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symposium of the Society for Experimental Biology. Fogg G.E. (ed). 8–12 September 1964, Swansea. The Company of Biologists: Cambridge, 205–234.
22. Shtoiiko, D.A., Pysarenko, V.A., Bychko, O.S., & Yelazhenko, L.I. (1977). *Rozrakhunkovi metody vyznachennia sumarnoho vyparovuvannia i strokiv polyvu s.-h. kultur [Estimated methods for determining the total evaporation and watering dates of agricultural cultures]*. *Zroshuvalne zemlerobstvo*, 3–8. [in Ukrainian].
23. Yvanov, N. N. (1954). *Ob opredeleny velychyn yspariaemosti [On the determination of volatility values]*. Moskva. [in Russian].
24. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A.A.M., (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *J. Hydrol.*, 212–213, 198–212.
25. Wang, F.X., Wu, X.X., Shock, C.C., Chu, L.Y., Gu, X.X., & Xue, X. (2011). Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China. *Field Crops Research*, 122(1), 78–84.
26. Muromtsev, N.N., Romashchenko, M.Y., & Panasenko, Y.Y. (1982). *Opredelenye parametrov vlahoperenosa v polevykh usloviakh [Determination of moisture transfer parameters in the field]*. *Melyoratsiia y vodnoe khoziaistvo*, 56, 11–14. [in Ukrainian].
27. Romashchenko, M.I., Kolomiets, S.S., & Bilobrova, A.S. (2019). *Systema laboratornoho diahnostuvannia vodno-fizychnykh vlastyvostei gruntiv [System of laboratory diagnostics of water-physical properties of soils]*. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 2, 199–208. [in Ukrainian].

28. Shatkovskiy, A.P., Cherevychnyi, Yu.O., & Chabanov, A.S. (2011). Zakonomirnosti formuvannya rezhymu kraplynnoho zroshennia prosapnykh kultur [Regularities of formation of the regime of drip irrigation of row crops]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 99, 25–32. [in Ukrainian].
29. Romashchenko, M., Shatkovskiy, A., Zhuravlev, A., & Cherevichny, Yu. (2015). Osoblyvosti rezhymiv kraplynnoho zroshennia prosapnykh kultur [Features of regimens of drip irrigation of cultivated crops]. *Visnyk agrarnoi nauky*, 93(2), 51–56. [in Ukrainian].
30. Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E., & Jensen, C.R. (2007). Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*, 100(1), 117–124.
31. Shatkovskiy, A.P., & Cherevychnyi, Yu. O. (2013). Vodospozhyvannia ta vrozhaunist paslonovykh kultur za kraplynnoho zroshennia v umovakh Stepu Ukrainy [Water consumption and yield of nightshade crops under drip irrigation in the steppe of Ukraine]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 100(1), 27–33. [in Ukrainian].
32. Romashchenko M.Y. (1992). Nekotorye aspekty obosnovanyia umenshenyia orosytelnykh norm [Some Aspects of the Justification for Reducing Irrigation Norms]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 35–39. [in Ukrainian].
33. Romashchenko, M.I., Baliuk, S.A., & Zhovtonoh O.I. (1998). Naukovo-metodychni osnovy ta systema gruntovo-ekolohichnoho zabezpechennia rezhymiv zroshennia [Scientific and methodological bases and system of soil and ecological support of irrigation regimes]. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo. Spets.vypusk chast, 1*, 38–43. [in Ukrainian].
34. Romashchenko, M.I., Zhovtonoh, O.I., & Filipenko, L.A. (1999). Obgruntuvannia ekolohichno bezpechnykh polyvnykh norm [Substantiation of ecologically safe irrigation norms]. *Ahrarna nauka*, 11, 56–61. [in Ukrainian].
35. Overgaard, J., Rosbjerg, D., & Butts, M.B. (2006). Land-surface modelling in hydrological perspective – a review. *Biogeosciences*, 3(2), 229–241.
36. Shuttleworth, W.J., & Wallace, J.S. (1985). Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, 839–855.
37. Priestley, C.H.B., & Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81–92.
38. Alpatev, A.M. (1974). O metodakh rascheta potrebnosti v vode kulturnykh fyotsenozov v svyazy s razvytyem orosheniya v SSSR [On methods for calculating the water needs of cultural phytocenoses in connection with the development of irrigation in the USSR]. *Byolohycheskye osnovy oroshaemoho zemledelyia*, 85–89. [in Russian].
39. Budyko, M.I. (1974). *Climate and Life*; Academic Press: New York, NY, USA.
40. Faybishenko, B. (2007). Climatic Forecasting of Net Infiltration at Yucca Mountain Using Analogue Meteorological Data. *Vadose Zone Journal*, 6, 77–92.
41. Faybishenko, B. (2010). Fuzzy-probabilistic calculations of water-balance uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(6), 939–952.
42. Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J.L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 131 (1), 2–13.
43. Romashchenko, M.I., Shatkovskiy, A.P., & Zhuravlov, O.V. (2016). Osoblyvosti zastosuvannia metodu «Penman-Monteith» v umovakh kraplynnoho zroshennia Stepu Ukrainy (na prykladi zemovoi kukurudzy) [Peculiarities of application of the «Penman-Monteith» method in the conditions of drip irrigation of the Steppe of Ukraine (on the example of grain corn)]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 5, 55–59. [in Ukrainian].
44. Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333.
45. Pachepsky, Y., Benson, D., & Rawls, W. (2000). Simulating Scale-Dependent Solute Transport in Soils with the Fractional Advective-Dispersive Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1234–1243.
46. Kavvas, M.L., Tu, T., Ercan, A., & Polsinelli, J. (2017). Fractional governing equations of transient groundwater flow in confined aquifers with multi-fractional dimensions in fractional time. *Earth Syst. Dynam.*, 8, 921–929.
47. Kavvas, M.L., Ercan, A., & Polsinelli, J. (2017). Governing equations of transient soil water flow and soil water flux in multi-dimensional fractional anisotropic media and fractional time. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 1547–1557.
48. Romashchenko, M.I., Bohaienko, V.O., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., & Krucheniuk, A.V. (2021). Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation. *Irrigation Science*, 39(3), 385–396.

49. Romashchenko, M.Y. (1981). Yssledovanye vlahoperenosa s tseliu rehulyrovanyia rezhyma kapelnogo orosheniya sadov [Investigation of moisture transfer in order to regulate the regime of drip irrigation of orchards]. Avtoreferat kandydatskoi dySSERTatsyy, Kyev, 25 s. [in Ukrainian].
50. Romashchenko, M.I., Koriunenko, V.V., Muromtsev, M.M., Shatkovskyi, A.P., Riabkov, S.V., Usatyi, S.V., Usata, L.H., Zhuravlov, O.V., Matiash, T.V., & Cherevychnyi, Yu.O. (2020). Rekomendatsii z operatyvnoho kontroliu ta upravlinnia rezhymom zroshenniia silskohospodarskykh kultur iz zastosuvanniam tenziometrychnoho metodu [Recommendations for operational control and management of irrigation regime of agricultural crops using tensiometric method]. Naukovo-praktychne vydannia: IVPiM NAAN. Kyiv.
51. Kovalchuk, V., Demchuk, O., Demchuk, D., & Voitovich, O. (2018). Data mining for a model of irrigation control using weather web-services. In International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (pp. 133–143). Springer, Cham.
52. Droogers, P., & Bastiaanssen, W. (2002). Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 128 (1), 11–18.
53. Kite, G.W., & Droogers, P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J. Hydrol.*, 229 (1–2), 3–18.
54. Kite, G.W. (2000). Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *J. Hydrol.*, 229 (1–2), 59–69.
55. Santos, C., Lorite, I.J., Tasumi, M., Allen, R.G., & Fereres, E. (2008). Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrig. Sci.*, 26 (3), 277–288.
56. Babacian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., & Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57, 530–616.
57. Danylenko, Iu., & Bohaienko, V. (2020). Monitoring of soil moisture in the south of Ukraine using active and passive remote sensing data. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXII*, 11528, 1152807.
58. Virmodkar, S.S., Pachghare, V.K., Patil, V.C. et al. (2020). Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. *Precision Agric.*, 21, 1121–1155.
59. Williams, J.R., & Izaurralde, R.C. (2005). The APEX model. BRC Report 2005–02. Blackland Research and Extension Center, Blackland.
60. Borah, D.K., Yagow, G., Saleh, A., Barnes, P.L., Rosenthal, W., Krug, E.C., & Hauck, L.M. (2006). Sediment and nutrient modeling for TMDL development and implementation. *Trans. ASABE*, 49 (4), 967–986.
61. Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., & Mimikou, M. (2012). Decision support for diffuse pollution management. *Environ. Model Softw.*, 30, 57–70.
62. Styczen, M., Poulsen, R.N., Falk, A.K., & Jørgensen, G.H. (2010). Management model for decision support when applying low quality water in irrigation. *Agric. Water Manage.*, 98, 472–781.

**M.I. Romashchenko, V.O. Bogaenko, A.P. Shatkovskyi, T.V. Matyash, S.S. Kolomiets, S.A. Shevchuk, Yu. Yu. Danylenko, A.S. Sardak**

#### **Conceptual principles of watering control under irrigation**

**Abstract.** *The conceptual principles of watering control under irrigation using decision support systems are outlined. Based on the analysis and research of foreign and domestic authors, it has been proven that the effectiveness of watering control depends to a large extent on the methodological approaches used to determine the terms and rates of watering in various decision support systems. It is shown that the most complete potential of varieties and hybrids of various types of crops under irrigation can be realized when establishing and implementing irrigation regimes ensuring the moisture supply of the soil root layer in a narrow range of high humidity (close to field water-holding capacity (FWHC) during the entire growing season.*

*It was grounded that the implementation of such irrigation regimes is possible only by applying decision support systems using GIS technologies, which combine hydrogeological models for calculation and forecasting of watering terms and rates, based on the use of soil moisture potential as a criterion of moisture supply availability for plants and Earth remote sensing data (ERSD). Such a combination makes it possible to analyze and apply measurement and forecasting data to the areas not covered by ground observations and provides highly efficient ecologically safe irrigation providing high irrigation water productivity and ecological safety of irrigation.*

*The implementation of these principles in the practice of irrigation management ensures the yield of irrigated crops as of 0.85–0.90 of the potential of modern varieties and hybrids, while simultaneously reducing the consumption of irrigation water per unit of yield, as well as minimizing or eliminating losses of irrigation water due to infiltration, development of flooding processes, salinization, and secondary salinization of soils.*

**Key words:** *irrigation, watering control, conceptual principles, decision support systems.*