

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-207>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/207>

UDC 631.675

ДОСВІД РОЗРОБКИ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЗРОШЕННЯМ

М.І. Ромащенко¹, докт. техн. наук, Т.В. Матяш², канд. техн. наук, В.О. Богаєнко³, канд. техн. наук, В.П. Ковальчук⁴, докт. техн. наук, О.П. Войтович⁵, А.В. Крученко⁶, В.В. Книш⁷, В.В. Шліхта⁸

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

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-1225-086X>; e-mail: t.v.matiash@gmail.com

³ Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-3317-9022>; e-mail: sevab@ukr.net

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-7570-1264>; e-mail: volokovalchuk@gmail.com

⁵ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-1513-4744>; e-mail: aleksvoitovych@gmail.com

⁶ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-5850-2404>; e-mail: anatolkru@gmail.com

⁷ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-1225-086X>; e-mail: iwpim27@gmail.com

⁸ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-7447-1540>; e-mail: sh.vova@outlook.com

Анотація. У роботі наведено огляд моделей та програмних засобів, що застосовуються у системах підтримки прийняття рішень при зрошенні. В основі систем підтримки прийняття рішень у зрошенні лежать моделі накопичення біомаси або моделі евапотранспірації. У статті дано огляд цих моделей, найвідоміших систем, а також презентується інноваційна система управління зрошенням «Полив онлайн». Система складається з апаратної та програмної частини. Частина технічного апаратного оснащення системи розміщена в полі, складається з метеостанції iMetos чи Davis, а також обладнання власної розробки. Програмна частина, що призначена для зберігання, обробки та надання рекомендацій, розміщується і виконується на сервері, надсилає користувачеві рекомендації про початок поливу і поливну норму на комп'ютер або на мобільний пристрій. Система базується на моделюванні вологоперенесення, автоматизованих вимірюваннях вологозабезпечення ґрунту і метеорологічних показників на полі та погодних даних з автоматизованих прогнозних сайтів. Основна гідрофізична характеристика (ОГХ) ґрунту та залежність коефіцієнта вологоперенесення від напору, які є вихідними параметрами моделі, задаються у поширивій формі згідно з моделлю ван Генухтена-Муалема. Впровадження системи відбувалось у 2019 р. в ДП ДГ «Асканійське» Херсонської області та ТОВ «АПК «Маїс» Черкаської області. За допомогою системи надавались рекомендації про полив озимого ріпака, пшениці, кукурудзи, сої, люцерни та картоплі. Встановлено, що використання системи «Полив онлайн» дає можливість формувати режими зрошення, реалізація яких вимагає проведення поливів меншими (на 15-25%) порівняно з існуючою практикою нормами, завдяки чому створюються сприятливіші для реалізації потенціалу сортів і гібридів сільськогосподарських культур умови вологозабезпечення за одночасного підвищення екологічної безпеки зрошення внаслідок мінімізації втрат поливної води на інфільтрацію.

Ключові слова: системи управління зрошенням, моделювання вологоперенесення, автоматизовані вимірювання, рекомендації про початок поливу, програмне забезпечення

Вступ. Зміни клімату, інтенсивність яких в Україні є найвищою серед країн Східної Європи, що проявляється насамперед через підвищення не тільки середньорічної температури, а й температури по окремих періодах року, за практично незмінної кількості опадів, що обумовлює постійне погіршення умов вологозабезпечення, а отже і умов вирощування

сільськогосподарських культур. Наявність прогресуючого процесу зневоднення ґрунтів формує зростання потреби у зрошенні як обов'язкової складової забезпечення сталого землеробства в умовах змін клімату.

Реалізація завдань схваленої КМ України «Стратегії зрошення і дренажу в Україні на період до 2030 року» [1] крім значного

нарощування площ поливу та водорегулювання передбачає істотне підвищення ефективності використання зрошуваних земель за одночасного зменшення негативного впливу зрошення на довкілля.

Шляхи вирішення цих завдань у зрошувальному землеробстві полягають в постійному удосконаленні існуючих технологій і систем управління зрошенням та розвитку нових технологій і способів поливу. Саме рівень управління зрошенням все частіше визначає ефективність та екологічну безпеку останнього.

Огляд існуючих рішень. Як свідчить вітчизняний та світовий досвід, сьогодні для управління зрошенням все частіше використовуються системи підтримки прийняття рішень (СППР).

СППР у зрошенні є інструментами, що застосовуються при управлінні технологічними процесами поливу на основі визначення строків та норм поливу, враховуючи дефіцит вологозабезпечення відповідно до основних фаз розвитку сільськогосподарських культур. На сучасному етапі розвитку СППР потребують використання ГІС технологій [2], які суттєво полегшують введення даних, інтерпретацію та розуміння результатів.

Будучи інструментами, мета яких сприяння отриманню найвищих врожаїв шляхом регулювання подачі води культурам, в основі СППР у зрошенні лежать моделі двох типів – моделі накопичення біомаси та моделі евапотранспірації.

Виділяють три типи моделей накопичення біомаси [3]: базовані на циклі вуглецю, на сонячній радіації та на циклі вологи. Моделі, базовані на циклі вуглецю, описують перш за все процес фотосинтезу. До них належать моделі, описані, зокрема, у [4; 5]. У моделях, що беруть за основу показник сонячної радіації, вважається, що біомаса зростає безпосередньо пропорційно перехопленому сонячному випромінюванню [6; 7]. Найпоширенішим є підхід, заснований на наявності взаємозв'язку між кумулятивною сезонною транспірацією культур при належному водопостачанні та їх біомасою [8]. Основною проблемою такого підходу є труднощі у визначенні фактичної транспірації. На моделях цього класу базується, зокрема, система AquaStor [9–11].

Просторове та часове кількісне визначення евапотранспірації є принципово важливим для управління водними ресурсами в сільському господарстві. Зазвичай евапотранспірація обчислюється як добуток еталонної евапотранспірації, яку можна оцінити за допомогою різних методів залежно від наяв-

ності кліматичних даних та коефіцієнта культури. Найбільш використовуваними в умовах України методами, що застосовуються при оцінці евапотранспірації, є методи Пенмана-Монтейта [12], А.М. Алпатьєва та С.М. Алпатьєва [13], Д.А. Штойка [14], М.І. Будико [15], М.М. Іванова [16], Блейні і Крідла [17]. Коефіцієнти культур можна оцінити як лабораторно, так і методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Польові методи, зокрема системи eddy covariance, забезпечують прямі й точні вимірювання евапотранспірації [18], але вони отримуються лише у масштабі конкретної точки поля. Для отримання розподілених оцінок у більших масштабах використовуються алгоритми, базовані на обробці даних ДЗЗ [19–22], зокрема METRIC [22] та SEBAL [19; 20].

Поєднання гідрологічних моделей та ДЗЗ дозволяє подолати багато недоліків, пов'язаних із низькою просторовою розподільчою здатністю цих моделей та низькою часовою розподільчою здатністю ДЗЗ [23]. Таке комбінування полегшує детальний просторовий та часовий аналіз для оцінки ефективності зрошення [21; 24]. Окрім цього, ДЗЗ може використовуватись для ідентифікації ділянок у межах яких необхідне вдосконалення управління зрошенням [25].

У СППР у зрошенні термін та норма поливу можуть визначатись як функція від:

– вологозабезпечення ґрунту: у цьому випадку встановлюються пороги загального вмісту ґрунтової вологи, або вологи, доступної рослинам на певній глибині чи у певному шарі ґрунту;

– порогу евапотранспірації: призначення поливу, коли сукупна денна евапотранспірація за мінусом ефективної кількості опадів досягне цього порога;

СППР можуть також рекомендувати додатково призначати поливи в критичні фази розвитку культур.

Оскільки ефективно управління зрошенням потребує максимально повного врахування всіх процесів у системі «ґрунт-рослина-повітря», СППР у зрошенні часто моделюють також і такі процеси як управління живленням, зокрема цикли азоту [26; 27], забруднення підземних та поверхневих вод [28], включають у себе модулі оцінки ризиків та економічного моделювання [29].

Розглянемо детальніше деякі з відомих сучасних систем підтримки прийняття рішень у зрошенні.

CropWat [30] – це емпірична СППР, що враховує дані про клімат, ґрунт та посіви

й базується на документах FAO-56 [12] та FAO-33 [31]. Модель, що лежить в її основі, описана у [32] й пов'язує відносні втрати врожаю та відносне зменшення евапотранспірації, що розраховується у системі за рівнянням Пенмана – Монтейта. Розвитком системи CropWat є модель AquaCrop [10], що базується на документах FAO-33 [31] та FAO-66 [11]. В її основі лежить критерій ефективності використання біомаси.

Система IrtiSatSMS [33] використовує коефіцієнти культур, обчислені за даними ДЗЗ, при розрахунку щоденного водного балансу. Щоденні показання евапотранспірації у цій системі розраховуються з даних місцевих автоматичних метеостанцій.

Система DAISY [34] має у своїй основі моделювання вологоперенесення за рівнянням Річардса, використовуючи дані гідрофізичних властивостей ґрунту. При генерації рекомендацій вона враховує тип зрошення (дощування, поверхневе чи підґрунтове краплинне зрошення), моделює внесення мінеральних та органічних добрив. На основі змодельованого вмісту вологи в кореневій зоні, вмісту поживних речовин та фази розвитку культури система визначає скільки води слід подавати та чи потрібно додавати добрива. Модель також дозволяє оцінити концентрацію кишкової палички та важких металів, а також проводити розрахунки прибутку.

Система CropIrti [35] ґрунтується на оцінці водного балансу ґрунту, моделях фенології посівів, росту кореневої системи та прийняття рішень у зрошенні. Евапотранспірація розраховується згідно із FAO-56 [12].

APSIM [36] є модульною системою, заснованою на моделюванні біофізичних процесів, що протікають у сільськогосподарських культурах. Вона містить набори модулів для моделювання біологічних та фізичних процесів та модулів управління зрошенням. Моделювані фізичні процеси включають рух ґрунтової вологи та перенесення розчинних речовин, ерозію. Водний баланс ґрунту моделюється як за багаточисловою моделлю, так і за рівнянням Річардса, яке для опису перенесення розчинних речовин доповнюється рівнянням конвекції-дифузії.

Система CropSyst [37] базується як на моделі поглинання сонячної радіації, так і на моделі водного циклу. При призначенні поливів ця система використовує показник водного потенціалу у стовбурах рослин. Результати попередньо проведених моделювань за допомогою CropSyst використовувались також СППР, що може працювати неза-

лежно від складного вимірювання водного потенціалу у стовбурах [38].

Серед інших систем, що базуються на моделюванні та прогнозуванні водного балансу ґрунту, відмітимо SIMIS [39] та IWMS [40]. Остання вирізняється тим, що використовує методи нечіткої кластеризації та ланцюгів Маркова для прогнозування опадів.

В Інституті водних проблем і меліорації НААН із врахуванням попереднього багаторічного досвіду розробки та експлуатації систем оперативного планування зрошенням [41; 42], результатів аналізу наведених вище існуючих СППР розроблена система управління зрошенням «Полив онлайн» [43], що базується на моделюванні вологоперенесення у ґрунті для підтримання оптимального вологозабезпечення кореневої системи рослин та мінімізації втрат вологи через інфільтрацію у глибші шари ґрунту. Математичну основу системи складає одновимірне диференціальне рівняння вологоперенесення Річардса в термінах напорів у класичній та нелокальній дробово-диференціальній постановках. Апаратна частина системи складається з мікрометеостанцій з сенсорами, які надають вихідну інформацію для моделювання. Мінімальним необхідним набором сенсорів є сенсори температури та вологості повітря, опадів та всмоктуючого тиску ґрунтової вологи. Додаткові параметри нелокальної моделі надають можливість адаптувати її до конкретних умов та мінімізувати вплив неточностей вимірювання вихідних даних. Система «Полив онлайн» впроваджена в декількох господарствах різних ґрунтово-кліматичних зон.

Метою роботи є поділитися досвідом розробки та впровадження, окреслити шляхи вдосконалення систем управління зрошенням.

Система «Полив онлайн»

Загалом, система «Полив онлайн» складається з апаратної частини, розміщеної у полі, та програмної частини, що, своєю чергою, складається з бази даних, підсистеми моделювання та користувацького інтерфейсу (рис. 1).

Як апаратна частина в системі використовуються метеостанції iMetos чи Davis, а також обладнання власної розробки. Система моніторингу метеорологічних показників та стану вологозабезпечення ґрунту складається з базових станцій та віддалених вузлів із сенсорами. Для моніторингу стану вологозабезпечення і доступності ґрунтової вологи для рослин використовують сенсори Watermark [44] та тензіометри власної

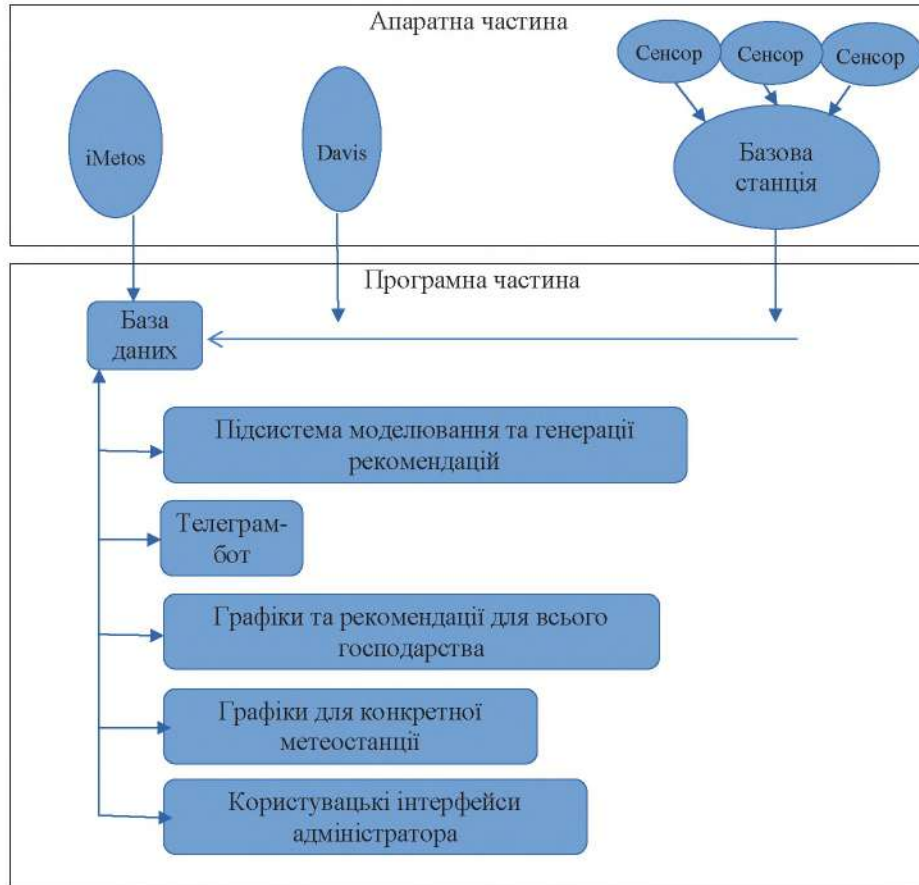


Рис. 1. Структура системи

розробки [45]. Кожен сенсор оснащений системою безпроводної передачі даних на базову станцію та незалежним живленням із сонячною батареєю. Базова станція, збираючи дані з сенсорів, відправляє їх GPRS-каналом на сервер, де вони проходять постобробку, зокрема в контексті автоматичного виявлення некоректностей й потенційної несправності сенсорів, та зберігаються у базі даних системи. Збереження даних відбувається на годинній основі.

Прогнозування зміни стану вологозабезпечення ґрунту виконується на основі даних, зібраних апаратною частиною системи, та метеорологічних прогнозів, які автоматично отримуються з сервісів прогнозування погоди [46].

Прогнозування зміни стану вологозабезпечення кореневмісного шару ґрунту здійснюється через використання одновимірного дробово-диференціального за часовою та просторовою змінними рівняння вологоперенесення, що має вигляд:

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

$$0 \leq z \leq L, t \geq 0$$

$$C^{-1}(H) = \frac{\partial H}{\partial \theta},$$

де H – напір (м); θ – об'ємна вологість ґрунту (%); $k(H)$ – коефіцієнт вологоперенесення (м/с); S – функція екстракції, що моделює взаємодію кореневої системи рослин із ґрунтом; $D_t^{(\beta)}$ – дробова похідна Капуто-Герасимова по часовій змінній 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 по просторовій змінній, $0 < \alpha, \beta \leq 1$. Зауважимо, що рівняння (1) є узагальненнями класичного рівняння Річардса для функцій напору. Приклад застосування рівняння (1) для прогнозування строку проведення поливу для поля, де вирощувалась соя, наведено на рис. 2, де показана динаміка середніх фактичних та змодельованих напорів у шарі ґрунту 0–20 см. Попередній полив був проведений 3 липня 2019 р. о 10.00, після чого на основі прогнозних метеоданих було проведено моделювання зміни вологості ґрунту на 5 днів вперед. При передполивному

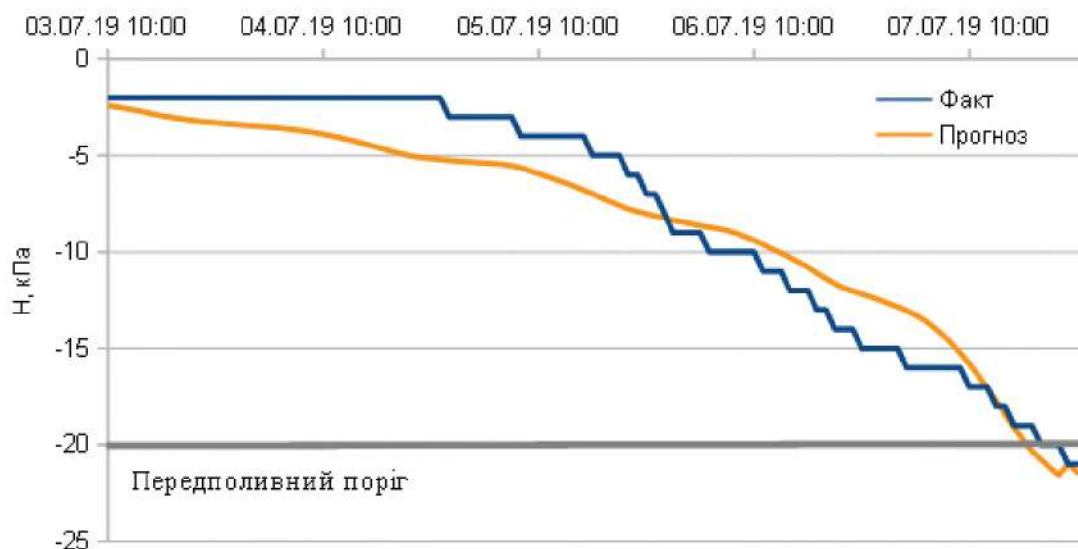


Рис. 2. Динаміка середніх фактичних та змодельованих напорів в шарі ґрунту 0–20 см при прогнозуванні строку проведення поливу

порозі на рівні -20 кПа модель визначила, що наступний полив має відбутись 7 липня 2019 р. о 20.00. Різниця у часі, коли вологість опустилась нижче передполивного порога, за фактичними показаннями датчиків та згідно змодельованих значень склала 2 години. Полив був фактично проведений 8 липня 2019 о 10.00.

Використання для прогнозування рівняння Річардса в термінах напорів дає ряд переваг, порівняно з рівнянням у термінах вологості, а саме:

- дозволяє розглядати в межах однієї крайової задачі зону аерації разом із горизонтом ґрунтових вод, використовуючи як граничну умову на нижній границі відсутність перетоку через водотрив. За такої схеми при близькому заляганні ґрунтових вод автоматично враховується їх участь у формуванні сумарного випаровування;

- дає можливість прогнозувати початок поливу за пороговою величиною всмоктуючого тиску ґрунтової вологи, а не за вологістю ґрунту, що істотно підвищує точність визначення строків і норм поливу.

Евапотранспірація, яка є одним із найважливіших факторів, що впливають на точність прогнозування в умовах України [47], оцінюється за формулами Іванова [16] та Штойко [14]. Коефіцієнти культури визначаються [47] так, щоб мінімізувати похибку моделювання динаміки вологості ґрунту. Це дозволяє за мінімального набору вихідних даних (температури та вологості повітря у приземному шарі) використовувати оціночні формули, зокрема Іванова. При наявності додаткових сенсорів,

перш за все сенсора сонячної радіації, також можуть використовуватись оцінки, що розраховуються за методом Пенмана-Монтейта метеостанціями iMetos чи Davis.

Основна гідрофізична характеристика (ОГХ) ґрунту та залежність коефіцієнта вологоперенесення від напору, які є вихідними параметрами моделі, задаються у пошаровій формі згідно з моделлю ван Генухтена-Муалема [48]. Коефіцієнти моделі визначаються на основі експериментальних даних дослідження ґрунтів. За відсутності останніх для визначення коефіцієнтів моделі Генухтена-Муалема використовуються відомі наближені методи, що реалізовані у програмі Rosetta [49], та результати визначень гранулометричного складу і щільності ґрунту. Для максимально точного моделювання мають також бути оцінені параметри розвитку кореневої системи рослин – її глибина та функція щільності розподілу коріння. При моделюванні крок дискретизації за глибиною складає 1 см, а за часом – 5 хв. Прогнозування здійснюється як за диференціальною моделлю, так і за одношаровою балансовою моделлю, використання якої дозволяє прогнозувати динаміку вологості ґрунту за мінімальної кількості вихідних даних.

Калібрування диференціальних моделей відбувається шляхом підбору значень їх параметрів, зокрема значення коефіцієнта культури, таким чином, щоб модель якнайкраще описувала динаміку напорів у ґрунті за 5 днів, що передують часу, коли відбувається калібрування. Калібруються як класична, так і нелокальна моделі, після чого для подальшого

прогнозування вибирається модель, найкраща за точністю. Перекалібрування моделі виконується один раз на тиждень за умови, що динаміка напорів, змодельована за останні 5 днів, відрізняється від фактичної не більше ніж на заданий відсоток.

Програмна частина системи реалізована у клієнт-серверному веб-середовищі й розміщена на сервері Інституту. Один раз на день виконується прогнозування динаміки напорів на наступний період у 5 днів, після чого генеруються рекомендації щодо поливів відповідних полів господарства, які містять час та норму поливу. Оскільки точне калібрування диференціальних моделей вимагає великої кількості фактичних даних, суттєві похибки вимірювання можуть призвести до некоректного визначення значень параметрів. Тому, окрім прогнозування за однією з диференціальних моделей, відбуваються розрахунки й за балансовою. При генерації рекомендацій використовується та з моделей, яка за останню добу найкраще описувала динаміку напорів. Для кожного поля система генерує рекомендації трьох типів – «полив необхідний терміново», «полив не потрібний у найближчі 5 днів» та «полив має бути виконаний через

певний час» з відповідною нормою вилливу (рис. 2). Рекомендація «полив необхідний терміново» надається у випадках протермінованого користувачем з різних причин поливу або коли полив потрібно здійснити сьогодні з відповідною нормою.

Система «Полив онлайн» надає користувачеві можливість отримувати інформацію про стан та прогноз стану вологості ґрунту на декількох рівнях деталізації у вигляді:

- телеграм-боту з актуальними рекомендаціями на поточну добу;
- списку графіків зміни напорів та поточних рекомендацій для кожного поля господарства (рис. 3);
- графіків фактичних значень найважливіших показників (напорів, температури та вологості повітря, опадів) для конкретного поля та метеостанції;
- графіків фактичних та прогнозних значень усіх показників, що зберігаються в межах системи, включаючи розрахункові значення евапотранспірації, метеопрогнози та прогнози динаміки напорів за різними моделями.

Окрім цього система містить засоби її адміністрування, зокрема внесення гідрофізичних

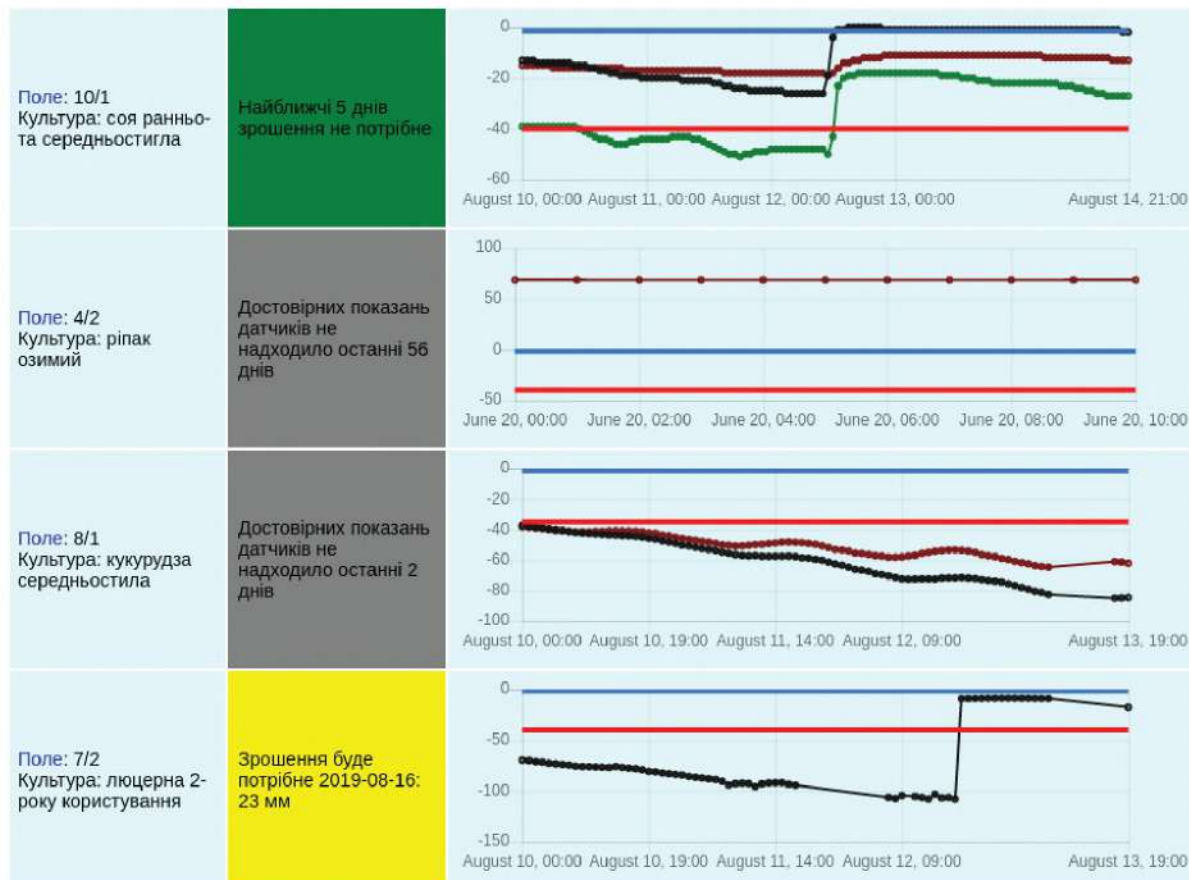


Рис. 3. Користувачський інтерфейс системи: інформація про стан вологості ґрунту в розрізі полів

параметрів ґрунтів та параметрів проведення поливів у розрізі фаз розвитку культур.

Усі засоби системи поєднуються в межах інтерактивної карти (рис. 4), до якої інтегровані засоби супутникового моніторингу стану полів: карти індексу біомаси NDVI на основі даних супутників Sentinel-2 (рис. 5) та визначення вологості у верхньому шарі ґрунту на основі нейромережевої моделі та даних пасивного та активного дистанційного зондування супутниками Sentinel-1 та 2.

Результати впровадження системи «Полив онлайн»

Система «Полив онлайн» у 2019 р. впроваджена у 2-х господарствах – ДПДГ «Асканійське»

Херсонської області і в ТОВ «АПК «Маїс» Черкаської області.

Впровадження у ДП ДГ «Асканійське» проводилось на важкосуглинистих чорноземах південних і темно-каштанових ґрунтах.

Полив проводили ДМ «Фрегат». Автоматичним моніторингом було охоплено сім полів сівозміни, на яких вирощувались соя, озимий ріпак і озима пшениця, кукурудза на зерно, люцерна і соняшник. Датчики всмоктуючого тиску встановлювались на 2-х або 3-х глибинах (через 20 см), залежно від сільськогосподарської культури.

Впровадження системи «Полив онлайн» у ТОВ «АПК»Маїс» проводилось на середньо- та легкосуглинкових чорноземних

ДПДГ Асканійське

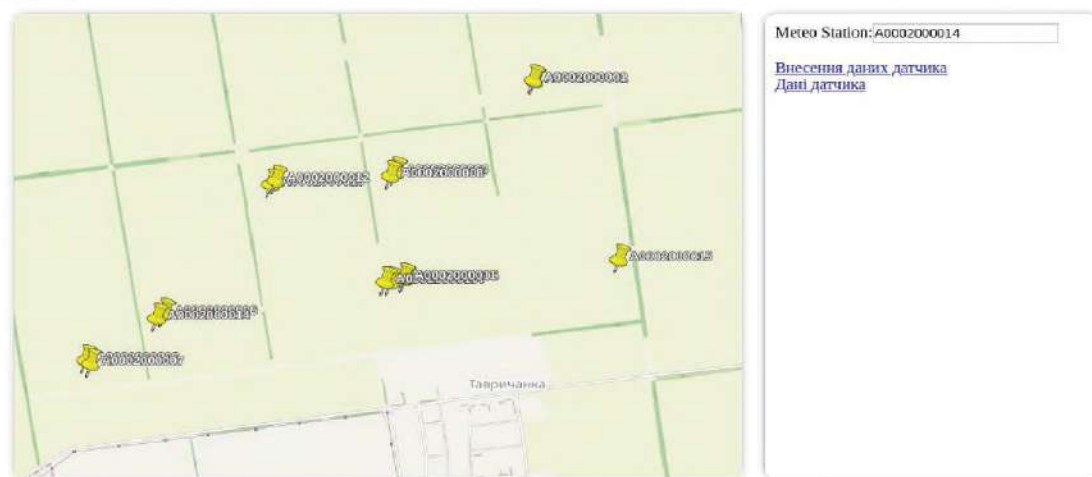


Рис. 4. Інтерактивна карта з розміщенням інструментальної частини системи у дослідному господарстві Асканійське

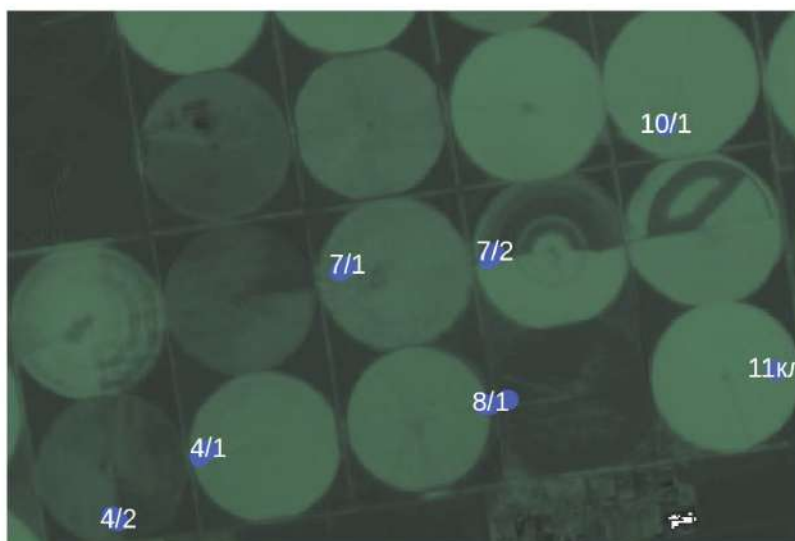


Рис. 5. Інтерактивна карта з зображенням індексу біомаси NDVI

грунтах за вирощування кукурудзи на насіння та картоплі. Полив проводили дощувальними машинами ДМ «Otech». І поле кукурудзи, і поле картоплі були охоплені автоматичним моніторингом, причому на полі кукурудзи через його велику протяжність було обладнано дві точки спостережень з установкою датчиків на 2-х глибинах – 20 і 40 см.

В обох господарствах поливи призначались при зниженні всмоктуючого тиску до передполивного порога, величина якого встановлювалась залежно від фази розвитку кожної сільськогосподарської культури.

Всмоктуючий тиск переводився у вологість і навпаки за моделлю ван Генухтена-Муалема.

Приклад даних моніторингу динаміки всмоктуючого тиску наведено на рис. 6.

Результати впровадження підтвердили робочу гіпотезу щодо доцільності використання в якості показника доступності ґрунтової вологи для рослин і відповідно передполивного порога величини всмоктуючого тиску замість вологості ґрунту. Завдяки цьому значно підвищується чутливість (точність системи) до визначення строку поливу, знижується ризик формування умов водного стресу через недостатню вологоємність ґрунтів кореневмісного шару і, відповідно, неспроможність підтримання водоспоживання рослин на оптимальному рівні.

Використання системою в якості верхньої межі оптимального діапазону величини всмоктувального тиску, що відповідає значенню НВ, отриманою з ОГХ за методикою

С.С. Коломійця [50] у поєднанні з описаним вище підходом до визначення передполивного порога зумовлює звуження діапазону оптимального вологозабезпечення рослин і потребує проведення поливів меншими, порівняно з існуючою практикою, нормами.

Унаслідок використання системою «Полив онлайн» описаних інновацій рекомендовані величини норм для обох господарств становили 250–300 м³/га замість раніше використовуваних 350–400 м³/га за однієї й тієї ж потужності розрахункового шару ґрунту.

Проведення поливів меншими нормами за такого визначення передполивного порога всмоктуючого тиску і НВ дозволяє підтримувати вологозабезпечення ґрунту в діапазоні високої, близької до НВ вологості, і створює передумови для формування більших урожаїв за умови дотримання інших складових технологій вирощування сільськогосподарських культур.

Одночасно створюються передумови для зменшення втрат води на інфільтрацію за межі кореневмісного шару, що своєю чергою, мінімізує ризики розвитку процесів підтоплення і вторинного засолення.

Висновки. Система управління зрошенням «Полив онлайн» є системою підтримки прийняття рішень у зрошенні нового покоління, в якій завдання визначення строків і норм поливу вирішується на новій методичній основі, а саме:

– в якості діапазону оптимального вологозабезпечення рослин використовується

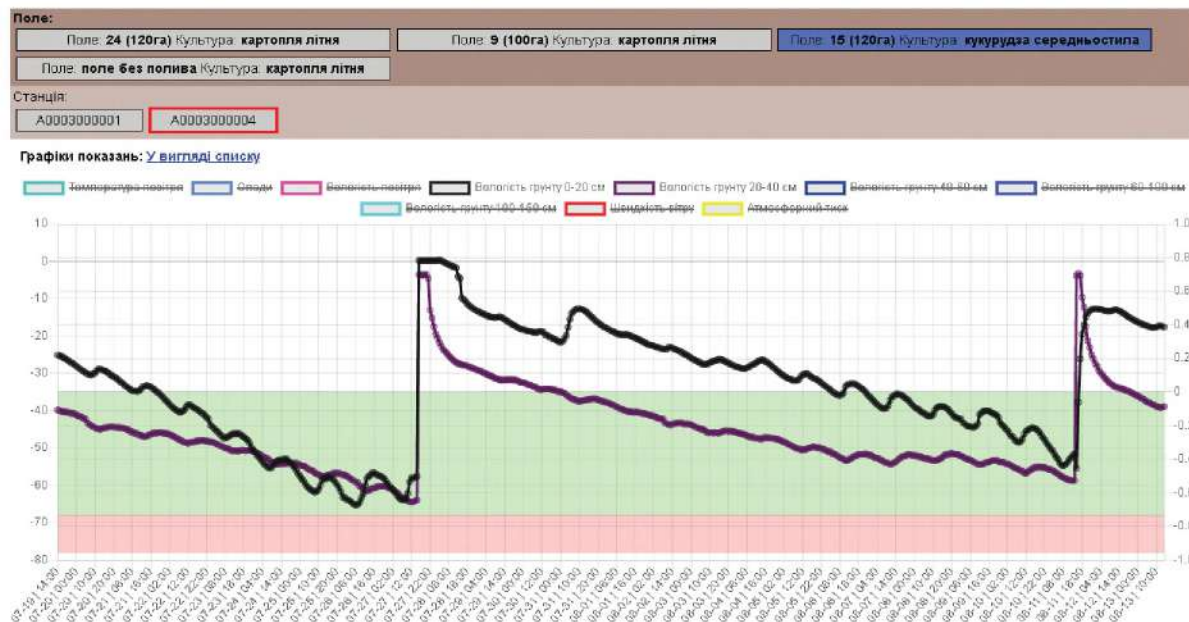


Рис. 6. Динаміка вологості ґрунту в шарі 0–20 см та 20–40 см при управлінні зрошенням кукурудзи за допомогою системи «Полив онлайн»

діапазон вологості ґрунту, а діапазон всмоктуючого тиску ґрунтової вологи. Одночасно в якості предполівного порога всмоктуючого тиску приймається така його величина, за якої не проведення поливу протягом однієї доби не створить умови водного стресу для рослин;

– в якості верхньої межі оптимального діапазону вологозабезпечення рослин приймається величина всмоктуючого тиску, що відповідає НВ за її визначення по ОГХ за методикою, яка враховує структуру порового простору і більш повно відповідає фізичному визначенню – вологості, при якій припиняється стікання гравітаційної вологи.

Перехід на використання всмоктуючого тиску, як критерію регулювання вологозабезпечення рослин, дозволив використовувати для прогнозування строків і норм поливу рівняння Річардса в термінах напору, що своєю чергою дало можливість в одній крайовій задачі розглядати зону аерації разом

із горизонтом ґрунтових вод і автоматично враховувати наявність чи відсутність їх участі у забезпеченні водоспоживання зрошуваних сільськогосподарських культур.

Використання системи «Полив онлайн» дає можливість формувати режими зрошення, реалізація яких вимагає проведення поливів меншими (на 15–25%) порівняно з існуючою практикою нормами, завдяки чому створюються сприятливіші для реалізації потенціалу сортів і гібридів сільськогосподарських культур умови вологозабезпечення за одночасного підвищення екологічної безпеки зрошення внаслідок мінімізації втрат поливної води на інфільтрацію.

Наявність у складі системи «Полив онлайн» підсистеми інструментального автоматичного моніторингу стану метеопараметрів та рівня вологозабезпечення ґрунтів дозволяє щоденно коригувати прогнозні, розраховані на 5 днів вперед, строки і норми поливу і суттєво покращити точність їх прогнозування.

Бібліографія

1. 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: 25.10.2019).
2. Mainaa M.M., Amina M.S.M. and Yazidb M.A. Web geographic information system decision support system for irrigation water management: a review // *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, Vol. 64, 2014. № 4. P.283–293, <http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2014.896935>.
3. Michele Rinaldi, Zhenli He Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture // *Advances in Agronomy Volume 123*, 2014, Pp. 229-279.
4. Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laar, H.H., Rabbinge, R. 1996. The “school of de Wit” crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric. Syst.* 52, p.171–198.
5. Van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckeley, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkin, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A.E., van der Wal, T., Wien, J.E., Wolf, J., 2008. Integrated assessment of agricultural systems – a component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agric. Syst.* 96 (1–3), p. 150–165.
6. Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 281, P. 277–294.
7. Sinclair, T.R., Muchow, R.C., 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.* 65, P. 215–265.
8. De Wit, C.T., 1958. Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 64.6 Institute of Biological Chemistry Research on Field Crops and Forage, Wageningen, The Netherlands.
9. Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2007. On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrig. Sci.* 25, P. 189–207.
10. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101, P. 426–437.
11. Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2012. AquaCrop: concepts, rationale and operation. In: Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (Eds.), *Crop Yield Response to Water*. FAO irrigation and drainage paper no. 66. FAO, Rome, P. 17–49.
12. 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.
13. 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.

14. Штойко Д.А., Писаренко В.А., Бичко О.С., Єлаженко Л.І. Розрахункові методи визначення сумарного випаровування і строків поливу с.-г. культур // Зрошувальне землеробство. 1977. С. 3–8.
15. Budyko, M.I. *Climate and Life*; Academic Press: New York, NY, USA, 1974.
16. Иванов, Н.Н. Об определении величин испаряемости. Москва: Изв. ГГО, 1954. С. 189–196.
17. Blaney, H.F. and Criddle, W.D. (1950) Determining Requirements Water in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. Washington Soil Conservation Service, 48 p.
18. Dugas, W.A., Fritschen, L.J., Gay, L.W., Held, A.A., Mathias, A.D., 1991. Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. *Agric. Forest Meteorol.* 56 (1/2), 1–20.
19. Bastiaanssen, W., Noordman, E., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B., Allen, R., 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131 (1), 85–93.
20. 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.
21. Kite, G.W., Droogers, P., 2000. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J. Hydrol.* 229 (1–2), 3–18.
22. Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133 (4), P. 380–394.
23. Droogers, P., Bastiaanssen, W., 2002. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *J. Irrig. Drain. Eng.* 128 (1), 11–18.
24. Kite, G.W., 2000. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *J. Hydrol.* 229 (1–2), 59–69.
25. 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), P. 277–288.
26. Williams, J.R., Izaurralde, R.C., 2005. The APEX Model BRC report 2005-02. Blackland.
27. 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), P. 967–986.
28. Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Mimikou, M., 2012. Decision support for diffuse pollution management. *Environ. Model Softw.* 30, P. 57–70.
29. 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, P. 472–781.
30. Smith, M., 1992. CROPWAT, A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper № 46.
31. Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield Response to Water: FAO Irrigation and Drainage Papers No. 33. FAO, Rome.
32. Jensen, M.E., 1968. Water consumption by agricultural plants. In: Kozlowski, T.T. (Ed.), *Water Deficits in Plant Growth*, vol. 1. Academic Press, New York, P. 1–22.
33. Car, N.J., Christen, E.W., Hornbuckle, J.W., Moore, G.A., 2012. Using a mobile phone short messaging service (SMS) for irrigation scheduling in Australia—farmers’ participation and utility evaluation. *Comput. Electron. Agric.* 84, P. 132–143.
34. Abrahamsen, P., Hansen, S., 2000. Daisy: an open soil-crop-atmosphere model. *Environ. Model Softw.* 15, P. 313–330.
35. Zhang, Y., Feng, L., 2010. CropIrr: a decision support system for crop irrigation. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 317 Springer, Berlin, Heidelberg, P. 90–97.
36. Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verbug, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, J.C., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming system simulation. *Eur. J. Agron.* 18 (3), P. 267–288.
37. Stockle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, P. 289–307.
38. Marsal, J., Stockle, C.O., 2010. Use of CropSyst as a decision support system for scheduling regulated deficit irrigation in a pear orchard. *Irrig. Sci.* 30, 139–147.
39. Mateos, L., Lopez-Cortijo, I., Sagardoy, J.A., 2002. SIMIS, the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agric. Water Manage.* 56, 193–206.

40. Cheng-cai Z, Mao Z, Xi-mei S. 2012. Henan Zhaokou irrigation management system design based on flex viewer. *Procedia Eng.* 28: P. 723–728.
41. Жовтоног О.І., Філіпенко Л.А., Деменкова Т.Ф., Бабич В.А., Поліщук В.В. Комп'ютерна програма «Інформаційна система оперативного планування зрошення ІС «ГІС Полив («ІС «ГІС Полив»)). Свідоцтво про реєстрацію авторських прав на твір № 5450 від 07.05.2014.
42. Zhovtonog O., Hoffmann M., Polishchuk V. and Dubel A. New planning technique to master the future of water on local and regional level in Ukraine// *Journal of Water and Climate Change Vol. 2* № 2-3. 2011. P. 189–200.
43. Gadzalo, Ya., Romashchenko, M., Kovalchuk, V., Matiash, T., & Voitovich O. (2019, September). 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.
44. IRRROMETER Company Inc. <https://www.irrometer.com/sensors.html>. Accessed 10 Sep 2016.
45. Автоматичний тензіометр з передачею даних через Інтернет і дозаправкою водою вручну: патент на корисну модель №132271 Україна. Опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4.
46. Kovalchuk, V., Demchuk, O., Demchuk, D., & Voitovich, O. (2018, January). Data mining for a model of irrigation control using weather web-services. In *International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications* (P. 133–143). Springer, Cham.
47. Mykhailo I. Romashchenko, Vsevolod O. Bohaienko, Tetiana V. Matiash, Volodymyr P. Kovalchuk and Iuliia Iu. Danylenko. (2019). 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*. Article ID: GAGS 1674445. DOI: 10.1080/03650340.2019.1674445.
48. Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), P. 892–898.
49. Rosetta Version 1.0 (Free downloaded program). U.S.Salinity Laboratory ARSUSDA; <http://www.ussl.ars.usda.gov>. Accessed 10 Sep 2019.
50. Спосіб визначення структур порового простору ґрунтів дисперсних середовищ для визначення найменшої вологості ґрунтів (НВ): патент на корисну модель № 45287 Україна. Опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.

References

1. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030.]: Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy № 688-p. (2019, August 14). *Uriadovyi kurier*, 170. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80>. [in Ukrainian]
2. 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)*, Vol. 64, No. 4, 283–293. <http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2014.896935>.
3. Rinaldi, M., & He, Z. (2014). Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. In: *Advances in Agronomy*, Vol. 123, 229–279
4. Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laar, H.H., & Rabbinge, R. (1996). The “school of de Wit” crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agric. Syst.* 52, 171–198.
5. Van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckeley, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., et al. (2008). Integrated assessment of agricultural systems – a component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agric. Syst.*, 96 (1–3), 150–165.
6. Monteith, J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 281, 277–294.
7. Sinclair, T.R., & Muchow, R.C. (1999). Radiation use efficiency. *Adv. Agron.*, 65, 215–265.
8. de Wit, C.T. (1958). Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 64.6 Institute of Biological Chemistry Research on Field Crops and Forage, Wageningen, The Netherlands.
9. Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2007). On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrig. Sci.*, 25, 189–207.
10. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.*, 101, 426–437.
11. Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2012). AquaCrop: concepts, rationale and operation. In: Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (Eds.), *Crop Yield Response to Water*. FAO irrigation and drainage paper no. 66, 17–49.

12. 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.
13. Alpatov, A.M. (1974). O metodakh rascheta potrebnosti v vode kulturnykh fytotsenozov v svyazy s razvytyem orosheniya v SSSR [On methods for calculating the water requirements of cultivated phytocenoses in connection with the development of irrigation in the USSR]. M.: Nauka. *Byolohycheskye osnovy oroshaemoho zemledelia*, 85-89. [in Russian]
14. Shtoiko, 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 total evaporation and irrigation time of crops]. *Zroshuvalne zemlerobstvo*, 3-8. [in Ukrainian]
15. Budyko, M.I. (1974) *Climate and Life*; New York: Academic Press, NY, USA.
16. Ivanov, N.N. (1954). Ob opredelenii velychyn yspariaemosti. [On the determination of evaporation values] *Moskov: Yzv. HHO*, 189–196. [in Russian]
17. Blaney, H.F. & Criddle, W.D. (1950). *Determining Requirements Water in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data*. Washington Soil Conservation Service, 48.
18. Dugas, W.A., Fritschen, L.J., Gay, L.W., Held, A.A., & Mathias, A.D. (1991). Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. *Agric. Forest Meteorol.*, 56 (1/2), 1–20.
19. Bastiaanssen, W., Noordman, E., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B., & Allen, R. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131 (1), 85–93.
20. 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.
21. Kite, G.W., & Droogers, P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J. Hydrol.*, 229 (1–2), 3–18.
22. Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007a). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 133(4), 380–394.
23. Droogers, P., & Bastiaanssen, W., (2002). Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 128 (1), 11–18.
24. Kite, G.W. (2000). Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *J. Hydrol.*, 229(1–2), 59–69.
25. 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.
26. Williams, J.R., & Izaurralde, R.C. (2005). *The APEX model*. BRC Report 2005-02. Blackland Research and Extension Center, Blackland.
27. 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.
28. Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., & Mimikou, M. (2012). Decision support for diffuse pollution management. *Environ. Model Softw.*, 30, 57–70.
29. 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.
30. Smith, M., (1992). *CROPWAT*, A computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. No. 46.
31. Doorenbos, J., & Kassam, A.H. (1979). *Yield Response to Water: FAO Irrigation and Drainage Papers*. No. 33. FAO, Rome.
32. Jensen, M.E. (1968). Water consumption by agricultural plants. In: *In: Kozlowski, T.T. (Ed.), Water Deficits in Plant Growth*, vol. 1. Academic Press, 1–22.
33. Car, N.J., Christen, E.W., Hombuckle, J.W., & Moore, G.A. (2012). Using a mobile phone short messaging service (SMS) for irrigation scheduling in Australia—farmers’ participation and utility evaluation. *Comput. Electron. Agric.*, 84, 132–143.
34. Abrahamsen, P., & Hansen, S. (2000). Daisy: an open soil-crop-atmosphere model. *Environ. Model Softw.*, 15, 313–330.

35. Zhang, Y., & Feng, L. (2010). CropIrr: a decision support system for crop irrigation. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 317, 90–97.
36. Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., & Holzworth, D., et al. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming system simulation. Eur. J. Agron., 18(3), 267–288.
37. Stockle, C.O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron., 18, 289–307.
38. Marsal, J., & Stockle, C.O. (2010). Use of CropSyst as a decision support system for scheduling regulated deficit irrigation in a pear orchard. Irrig. Sci., 30, 139–147.
39. Mateos, L., Lopez-Cortijo, I., Sagardoy, J.A. (2002). SIMIS, the FAO decision support system for irrigation scheme management. Agric. Water Manage., 56, 193–206.
40. Cheng-cai, Z, Mao, Z, & Xi-mei, S. (2012). Henan Zhaokou irrigation management system design based on flex viewer. Procedia Eng., 28, 723–728.
41. Zhovtonoh, O.I., Filipenko, L.A., Demenkova, T.F., Babych, V.A., & Polishchuk, V.V. (2014). Комп'ютерна програма «Інформаційна система оперативного планування зрошення ІС «ІС Полів» («IS «HIS Polyv»). [Computer Program «Information System for Operational Irrigation Planning of IS» GIS Poliv («IS» GIS Poliv «)]. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskykh prav na tvir № 5450 vid 07.05.2014.
42. 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.
43. Gadzalo, Ya., Romashchenko, M., Kovalchuk, V., Matiash, T., & Voitovich O. (2019). Using smart technologies in irrigation management. International Commission on Irrigation and Drainage: 3rd World Irrigation Forum (WIF3). Bali, Indonesia: WIF3, 178. Retrieved from: https://www.icid.org/wif3_bali_2019/wif3_abst_vol.pdf.
44. IRROMETER Company Inc. irrometer.com. Retrieved from: <https://www.irrometer.com/sensors.html>
45. Kovalchuk, V.P, Voitovich, O.P, & Demchuk, D.O. (2019). Automatic tensiometer with data transmission over the Internet and refueling with water manually. Patent of Ukraine №132271. [in Ukrainian].
46. Kovalchuk, V., Demchuk, O., Demchuk, D., & Voitovich, O. (2018). Data mining for a model of irrigation control using weather web-services. Advances in Computer Science for Engineering and Education. International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications: Springer International Publishing, 133-143. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_14.
47. Romashchenko, M.I., Bohaienko, V.O., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., & Danylenko, Iu.Iu. (2019). 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. <https://doi.org/10.1080/036503402019.1674445>.
48. Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. Soil science society of America journal, 44(5), 892–898.
49. Rosetta Version 1.0 (Free downloaded program). U.S.Salinity Laboratory ARSUSDA; Retrieved from: <http://www.ussl.ars.usda.gov>. Accessed 10 Sep 2019.
50. Kolomiets S.S., & Yatsyk M.V. (2009). Method of determining the pore space structures of soils of dispersed media to determine the lowest soil moisture (HB). Patent of Ukraine № 45287. [in Ukrainian].

**М.И. Ромащенко, Т.В. Матяш, В.А. Богаенко, В.П. Ковальчук,
А.П. Войтович, А.В. Крученко, В.В.Кныш, В.В. Шлихта**

Опыт разработки и пути совершенствования систем управления орошением

Аннотация. В работе приведен обзор моделей и программных средств, применяемых в системах поддержки принятия решений при орошении. В основе СППР в орошении лежат модели накопления биомассы или модели эвапотранспирации, дан обзор самых известных систем, а также презентуется инновационная система управления орошением «Полив онлайн». Система состоит из аппаратной и программной части. Часть технического аппаратного оснащения системы размещена в поле, состоит из метеостанций iMetos или Davis, а также оборудование собственной разработки. Программная часть, предназначенная для хранения, обработки и предоставления рекомендаций размещается и выполняется на сервере, направляет пользователю рекомендации о начале полива и поливную норму на компьютер или на мобильное устройство.

Система базується на моделюванні вологоперенесення, автоматизованих вимірюваннях вологообеспеченості ґрунту та метеорологічних показувачів на полі та погодних даних із автоматизованих прогнозних сайтів. Основна гідрофізичська характеристика (ОГХ) ґрунту та залежність коефіцієнта вологоперенесення від напора, які є вихідними параметрами моделі, задаються в послойній формі згідно моделі ван Генухтена-Муалема.

Внедрення системи відбулося в 2019 році в ГП ОХ «Асканійське» Херсонської області та ООО «АПК «Маїс» Черкаської області. З допомогою системи надавалися рекомендації щодо поливу озимого рапсу, пшениці, кукурудзи, сої, люцерни та картоплі. Встановлено, що використання системи «Полив онлайн» дає можливість формувати режими зрошення, реалізація яких потребує проведення поливів менше (на 15–25%) порівняно з існуючою практикою нормами, завдяки чому створюються сприятливі умови реалізації потенціалу сортів та гібридів сільськогосподарських культур за умови вологообеспеченості при одночасному підвищенні екологічної безпеки зрошення завдяки мінімізації втрат поливної води на інфільтрацію.

Ключові слова: системи управління зрошенням, моделювання вологоперенесення, автоматизовані вимірювання, рекомендації щодо початку поливу, програмне забезпечення.

**M.I. Romashchenko, T.V. Matiash, V.O. Bohaienko, V.P. Kovalchuk,
O.P. Voitovich, A.V. Krucheniuk, V.V. Knysh, V.V. Shlikhta**

Development experience and ways of improvement of irrigation management systems

Abstract. The paper provides an overview of models and software used in decision support systems in irrigation. The models of biomass accumulation or evapotranspiration are the base of the decision support systems in irrigation. The overview of the most famous systems is given, as well as an innovative irrigation control system “Irrigation online” is presented. The system consists of hardware and software. The part of the system’s hardware is located in the field consisting of iMetos or Davis weather stations, as well as of own-developed equipment. The software part, intended for storing, processing and providing recommendations, is hosted and run on a server. It sends the recommendations about starting watering and necessary irrigation rates to a user’s computer or mobile device. The system is based on modelling of moisture transfer, automated measurements of soil moisture and meteorological indicators in the field and weather data from automated forecast web-sites. Water retention curve of soil and the dependence of the moisture transfer coefficient on the water head, which are the input parameters of the model, are given for every layer according to the van Genuchten-Mualem Model.

The application of the system took place in 2019 in SE EF “Askaniiske” Kherson region and LLC “APC “Mais” in Cherkasy region. The system “Irrigation Online” provided the recommendations on watering winter rape, wheat, corn, soybeans, alfalfa and potatoes.

It was specified that the use of the system “Irrigation Online” enables to schedule irrigation regimes, the implementation of which requires watering with less rates (by 15–25%) in comparison with the current irrigation rates, due to which more favorable conditions for the maximum realization of crop varieties and hybrids potential are created. It is accompanied by enhancing the environmental safety of irrigation as a result of minimization of irrigation water losses for infiltration.

Key words: irrigation management systems, moisture transfer’s modelling, automated measurements, recommendations for irrigation timing, software