

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-179>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/179>

УДК 631.671:551.49:004

РОЗВИТОК МОНІТОРИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЕРУВАННЯ ЗРОШЕННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИМ МЕТОДОМ

О.П. Войтович¹, аспірант, В.П. Ковальчук², докт. тех. наук

Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-1513-4744>; e-mail: aleksvoitovych@gmail.com

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0001-7570-1264>; e-mail: volokovalchuk@gmail.com

Анотація. У статті виділені актуальні проблеми розвитку моніторингових досліджень вологості ґрунту і метеорологічних показників для інформаційного забезпечення систем керування зрошенням. На основі аналізу літератури показано, що керування вологістю ґрунту може здійснюватись як безпосередньо за результатами вимірювань вологості ґрунту, так і використовуючи розрахункові методи. За наявності автоматично отриманих даних метеорологічних прогнозів прийняття рішень про полив відбувається експериментально-розрахунковим методом. Моніторингові дослідження складають експериментальну частину і використовуються у якості зворотного зв'язку при управлінні вологістю. Вимірювання вологості ґрунту рекомендується з використанням різноманітних сенсорів вологості ґрунту непрямыми методами визначення. В якості сенсорів можна застосувати різні тензіометри, діелектричні та резистивні датчики. Розрахункову частину складають критерії прийняття рішень про початок поливу сільськогосподарських культур, балансовий метод прогнозу і розрахунку вологості ґрунту чи вологозапасів у ґрунті (або багаточислова математична модель вологоперенесення за наявності достатніх для її роботи вхідних параметрів) з використанням автоматичного метеорологічного прогнозу. Статтю проілюстровано результатами лабораторного модельного експерименту та польових досліджень з автоматизованою передачею даних вимірювання і реалізацією зворотного зв'язку при керуванні вологістю ґрунтів. Модельний лабораторний експеримент використовувався для апробації конструктивних, технічних і технологічних показників обладнання для автоматичного моніторингу та відпрацювання експериментально-розрахункового методу. Практичні прогнози, розрахунки і отримання даних вимірювань вологості ґрунту і метеорологічних показників за реалізації зворотного зв'язку при керуванні поливами розглянуто на прикладі поля кукурудзи в господарстві на Черкащині. Результати лабораторного експерименту і польових досліджень показують ефективність прогнозування вологості ґрунту згаданим методом. Корекцію прогнозованої вологості ґрунту за безпосереднім автоматизованим вимірюванням на полі за допомогою наземних датчиків рекомендується проводити щоденно.

Ключові слова: вологість ґрунту, меліорація, метеорологічні показники, автоматизований моніторинг, керування зрошенням, зворотний зв'язок, експериментально-розрахунковий метод, система підтримки прийняття рішень.

Постановка завдання. Інформаційні технології передбачають розроблення систем керування вологістю ґрунту за оптимізації водного режиму під заплановану врожайність. В основному це досягається шляхом розробки інформаційних систем, які автоматизують та спрощують процес прийняття рішень за керування зрошенням.

В Україні розробки систем керування зрошенням впроваджують з кінця 80-х років 20-го століття [1-2]. Характерною ознакою перелічених пропозицій є складність в експлуатації та необхідність залучення до роботи спеціалістів, науковців, інженерів.

Закордоном при керуванні вологістю ґрунту у системах підтримки прийняття

рішень [3-6] для вимірювання вологості ґрунту на полі використовують різноманітні сенсори [2-4, 6-8]. Прийняття рішень про проведення поливу здебільшого відбувається лише на основі показання датчиків [4; 6; 8]. Балансова модель [3] отримує з погодних Інтернет-сервісів дані лише «на сьогодні». СППР [6] використовує прогноз погоди для врахування випадання опадів при призначенні поливу. Такі моделі не націлені на прогнозування вологості ґрунту.

В Інституті водних проблем і меліорації НААН розроблено систему «Полив онлайн» [9], що використовує 5-денний прогноз погоди (для розрахунку евапотранспірації і врахування опадів) [10]. Бездротовий

моніторинг вологості ґрунту і метеорологічних показників на полі у цій системі використовуються у якості зворотного зв'язку для керування вологістю ґрунту на полі і щоденної корекції прогнозованої вологості. Це зумовлено тим, що будь-яка система точного зрошення – це багатокомпонентний та складний процес. І серед актуальних сучасних напрямів розвитку таких систем є пошук можливостей автоматизації складних процесів, бездротової передачі даних вимірювання вологості ґрунту і метеорологічних показників на полі.

У роботі ми пропонуємо низку можливостей удосконалення та автоматизації роботи системи вимірювання для управління зрошенням.

Метою роботи є розробка інформаційної складової моніторингу вологості і метеопказників на полі для забезпечення прийняття рішень відносно поливу експериментально-розрахунковим методом.

Методи досліджень. Об'єктом управління в системі «Полив онлайн» [9] є вологість ґрунту на полі (рис. 1), на яку впливають неконтрольовані зовнішні фактори, до яких належать температура та вологість повітря, опади, вітер, хмарність та атмосферний тиск. Вони прогножуються синоптичним методом, який базується на використанні низки виявлених закономірностей у розвитку атмосферних процесів [10], з деяким наближенням, і використовуються у вигляді вхідних параметрів для блоку прийняття рішень (рис. 1).

Прогнози атмосферних показників отримуються з загальнодоступних погодних сайтів, зберігаються в базі даних [10].

Використовуючи ці дані, автоматично розраховується прогноз на евапотранспірацію.

Вплив на об'єкт управління здійснюється за допомогою поливу сільськогосподарських культур. Прийняття рішень про полив може відбуватись як за результатами безпосередніх вимірювань вологості ґрунту [4; 6-8], так і на основі прогнозування вологості ґрунту розрахунковими методами [1-2] або поєднання розрахунків із вимірюванням [9].

Блок прийняття рішень з планування поливних режимів спирається на критерій прийняття рішень. Критерій визначає досягнення деякого критично низького значення середньої вологості шару ґрунту певної товщини (розрахункового шару) [10; 11]:

$$\theta_h^{сеп} = \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i}{m}; \quad (1)$$

де θ_i – вологість ґрунту в i -му шарі; m – число горизонтів ґрунту, що складають розрахунковий шар h .

Блок може використовувати багат шарові моделі вологоперенесення [9; 11] або двошарові балансові моделі вологості ґрунту [2; 12; 13]. Балансова модель прогнозування стану вологості ґрунту:

$$D_{i+1} = D_i + (K \cdot \alpha \cdot E - P) - m, \text{ мм або м}^3/\text{га} \quad (2)$$

де D_{i+1} , D_i – дефіцит вологості ґрунту на початок і кінець розрахункового періоду (у наших дослідженнях це 1 доба, але може бути 5 діб або декада); E – сумарне випаровування; α – редуційний коефіцієнт зниження

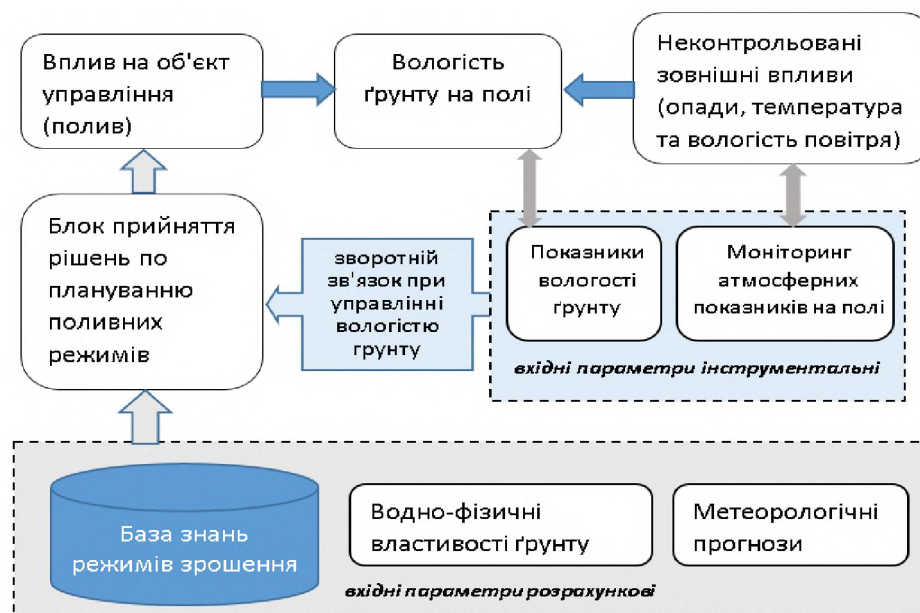


Рис. 1. Система збору та передачі даних для управління поливами

випаровування внаслідок неоптимального зволоження ґрунту: $\alpha = (D_{BB} - D_i)/0,5D_{BB}$; P – атмосферні опади; m – поливна норма; D_{BB} – дефіцит при вологості в'янення. Евапотранспірація може розраховуватись кількома методами: Штойко [13] Пенмана-Монтейта [14] або Іванова [12].

Отже, керування поливом здійснюється на основі **експериментально-розрахункового методу**, який поєднує як математичні розрахунки (1)-(2) або моделювання вологоперенесення, так і фактичні дані з поля, отримані за допомогою наземних датчиків. Реалізація експериментально-розрахункового методу на основі моделювання вологоперенесення буде наведена в іншому дослідженні. При оперативному керуванні поливом здійснюється періодична корекція вологості ґрунту за безпосереднім вимірюванням та визначення строків і норм поливів за прогнозуванням погоди на п'ятиденку. Таким чином, відбувається керування поливами на «ковзному інтервалі» [15] з використанням прогнозних даних і розрахунків. Виникає питання **необхідності і частоти оберненого зв'язку в експериментальних методах визначення вологості і метеопоказників на полі, способу вимірювання і передачі даних з поля.**

Інструментальну частину складають польові метеостанції та вологоміри [2-4, 7-9], які автоматично отримують дані про вологість ґрунту та атмосферні показники у визначеній точці поля та надсилають їх на Інтернет-сервер для подальшої обробки та розрахунків.

Існує декілька поширених методів вимірювання вологості ґрунту, які умовно можна розділити на прямі, непрямі та дистанційні.

Прямі методи передбачають безпосереднє визначення кількості води в зразку ґрунту шляхом її відокремлення. Найпростішим у технічному плані тут виявився термостатно-ваговий метод, який передбачає випаровування води із зразків ґрунту. Вологість ґрунту розраховується різницею в масі сухого та вологого зразка ґрунту. Метод є громіздким і інерційним. У даному дослідженні не застосовується.

Непрямі методи визначення вологості ґрунту базуються на вимірюванні його фізичних характеристик, які змінюються від вмісту води в ґрунті. Вимірювання проводять як механічними, так і електронними приладами, а найпоширенішими серед них стали тензіметри [8; 9], діелектричні [3; 4] та резистивні датчики [6; 7; 9]. Перевагою непрямих методів вважається можливість автоматизації процесу отримання даних про фізичні характеристики ґрунту. Але склад-

ністю стає визначення зв'язку між цими фізичними властивостями та ґрунтовою вологою.

Дистанційні методи вимірювання вологості ґрунту зазвичай проводять через супутникові знімки, але то є предмет інших досліджень.

Результати досліджень. Наведемо реалізацію **експериментально-розрахункового методу**, використовуючи залежності (1)-(2) (при неповноті даних для моделювання вологоперенесення), результати лабораторного експерименту та польових досліджень з **автоматизованою передачею даних вимірювання і реалізацією зворотного зв'язку при керуванні вологістю ґрунту.**

Кількісну величину вологості ґрунту вимірювали опосередковано декількома методами, які базуються на зміні величини електричної провідності, діелектричних властивостей ґрунту чи всмоктуючого потенціалу ґрунту залежно від рівня його зволоженості. Достовірність та коректність цих методів залежить від точності визначення водно-фізичних властивостей ґрунту і їх представлення у вигляді залежностей Ван-Генухтена [16].

Лабораторний експеримент. Для практичного відпрацювання **експериментально-розрахункового методу** прогнозування вологості ґрунту і апробації «зворотного зв'язку» восени 2018 і взимку 2019 р. в лабораторії ІВПіМ проведено модельний лабораторний експеримент (рис. 2). Водно-фізичні властивості ґрунту розраховано за допомогою програми «розетта» [17]. Потенціал вологи щогодинно вимірювали автоматичним тензіометром власної конструкції. Переведення вологості в потенціал і навпаки виконувалось за формулами [16].

Розрахунки прогнозу поливів проводили за двошаровою балансовою моделлю, що використовує залежність (2) для визначення дефіциту вологості ґрунту. Евапотранспірація розраховувалась за автоматично отриманими даними про температуру і відносну вологість повітря у лабораторії із застосуванням біофізичного методу Штойко, розробленого Інститутом зрошувального землеробства НААН [13].

Автоматично отримані дані про фактичну і прогнозовану вологість ґрунту обробляються блоком прийняття рішень з планування поливів. Система співставляє відповідність вологості ґрунту пороговому значенню у базі знань (рис. 2) відносно поливних норм та режимів зрошення.

Робота системи автоматичних вимірювань виявилась достатньо точною і стабільною для розрахунків вологості ґрунту та евапотранспірації модельних рослин.

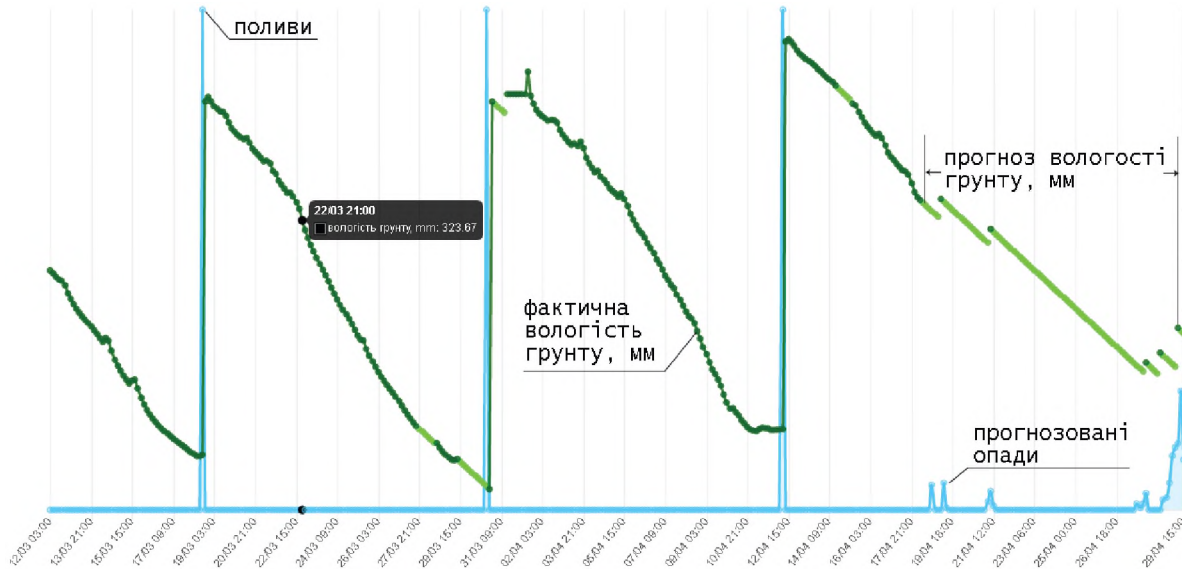


Рис. 2. Модельний лабораторний експеримент з апробації «зворотного зв'язку» і прогнозуванню вологості ґрунту

Практичне використання експериментально-розрахункового методу. Розрахунки і отримання даних вимірювань за реалізації зворотного зв'язку при керуванні поливами розглянемо на прикладі поля кукурудзи в господарстві на Черкащині.

Розрахункова частина базується на балансовому двохшаровому рівнянні (2) і прийнятті рішень за (1). Вона потребує поточних і прогнозних погодних даних – випадання опадів і даних для розрахунку поточної і прогнозної потенційної евапотранспірації сільськогосподарської культури (використовуються метеопрогнози на кілька днів). Тип ґрунту, його водно-фізичні властивості; тип

і стадія (фаза) розвитку вирощуваної сільськогосподарської рослини знаходяться у базі знань. Початкова вологість передається автоматизовано.

На сервері прогнозується динаміка зміни вологості ґрунту на кожному полі. Враховуючи ймовірнісний характер прогнозів погоди щодо опадів, температури тощо потрібна періодична корекція розрахунків. **Зворотний зв'язок** і корекція дати поливу відбувається за даними інструментальних вимірювань. З автоматичних сенсорів надходять величини водного потенціалу ґрунту в кПа (рис. 3). Відповідно за визначеною залежністю водного потенціалу до вологості ґрунту [16] дані із кПа переводили

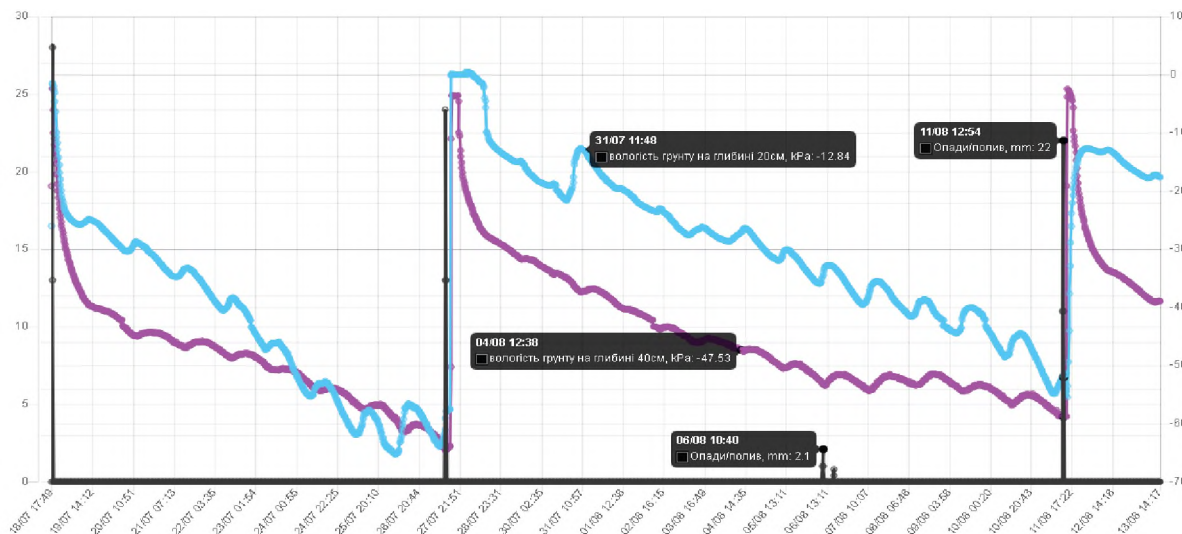


Рис. 3. Динаміка потенціалів вологості ґрунту на полі, отримана за допомогою автоматичних сенсорів

у міліметри водного шару. Водний потенціал дорівнює всмоктуючому тиску, який безпосередньо вимірюється тензіометром.

Для реалізації зворотного зв'язку та управління зрошенням була задіяна станція вологості ґрунту, яка в автоматичному режимі вимірює водний потенціал ґрунту, температуру та відносну вологість повітря (рис. 4). У складі станції потенціал вологості ґрунту вимірювали на глибині 20 та 40 см. Оподи і поливи фіксувались автоматичними оподомірами. Кожну годину отримані дані зберігаються в базі даних і можуть бути відображені у вигляді історії динаміки будь-якого з показників до поточного часу.

Додатково система отримувала з мережі Інтернет три показники метеопрогнозів на 5 днів для найближчого населеного пункту: температуру повітря, відносну вологість повітря, кількість опадів. Крок такого прогнозу залежить від налаштувань метеосайту і може змінюватись від погодинного до добового. У наших розрахунках для господарства ми використовуємо крок у 3 години. Для всіх отриманих поточних і прогнозних періодів розраховували евапотранспірацію за методом Штойко. Для кожного з тригодинних проміжків часу за допомогою балансового методу (2) розраховувалась прогнозована вологість ґрунту, де вхідними параметрами є остання визначена вологість ґрунту (фактична або розрахункова), евапотранспірація та кількість опадів.

Надалі розраховані величини прогнозованої вологості ґрунту у вигляді вхідних даних та в якості зворотного зв'язку надсилають до блоку прийняття рішень з управління поливом та обчислюються за формулою (1). Корекція

прогнозованої на 5 діб вологості ґрунту відбувалась щодобово. Таким чином, відбувається керування поливами на «ковзному інтервалі».

Висновки. Експериментально-розрахунковий метод дозволяє прогнозувати вологість ґрунту терміном до 5 діб за умови автоматичного отримання і використання метеорологічних прогнозів із Інтернет-сервісів прогнозування погоди, а також за наявності автоматично отриманих даних моніторингу вологості і метеопоказників на полі. Дані моніторингу вологості є складовою інформаційного забезпечення вказаного методу і слугують зворотним зв'язком при керуванні зрошенням.

Фактичні дані моніторингу вологості і метеопоказників на полі, що є «зворотним зв'язком» і передаються автоматично, що суттєво підвищує точність рекомендацій зі зрошення та дозволяє оперативно коригувати прогнозні розрахунки. За оперативного керування поливами корекцію розрахунків вологості ґрунту за безпосереднім автоматизованим вимірюванням на полі потрібно здійснювати щоденно.

Апробація експериментально-розрахункового методу із системою польових вимірювань для прогнозування вологості ґрунту в лабораторних і польових умовах показала, що точність, достовірність і вчасність надходження рекомендацій достатня для забезпечення ефективного керування зрошенням. Точніші результати забезпечать одномірні багат шарові моделі вологоперенесення, які потребують більшої кількості вхідних параметрів.

Результати лабораторних досліджень показали тривалу, надійну роботу і достатню точність автоматичної системи збору інформації.

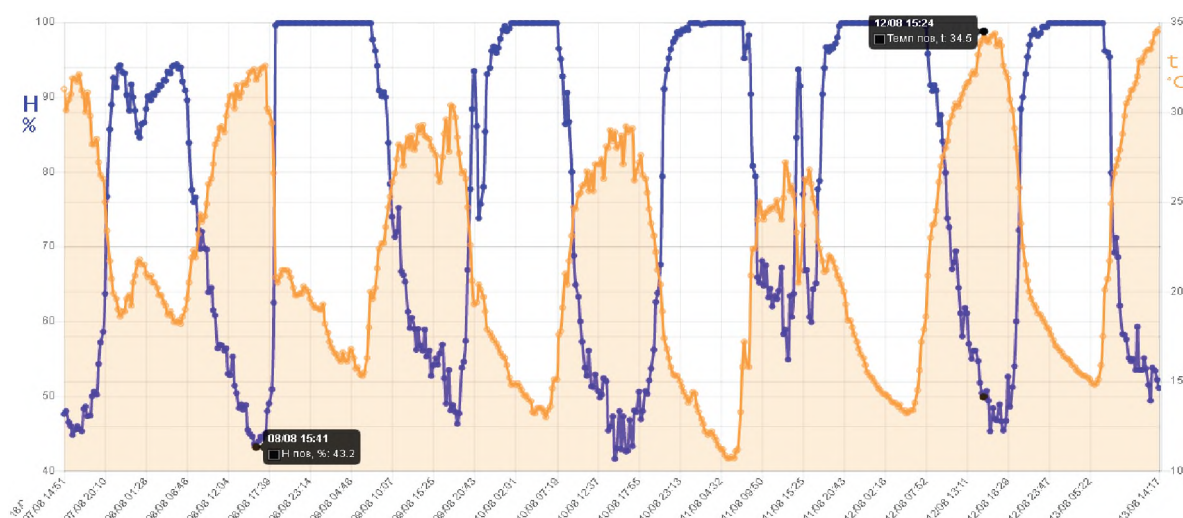


Рис. 4. Приклад динаміки даних відносної вологості і температури повітря на дослідному полі

Бібліографія

1. Остапчик В.П., Костромин В.А., Коваль А.М. Информационно-советующая система управления орошением. Киев: Урожай, 1989. 248 с.
2. Жовтоног О.І., Філіпенко Л.А., Деменкова Т.Ф., Діденко Н.О. Використання інформаційної системи «ГІС Полив» та модулю IRRIMET інтернет-метеостанції для оперативного планування зрошення при дощуванні // Таврійський науковий вісник, 2015. №92. С.159–165.
3. ENORASIS (Environmental Optimization of irrigation Management with the Combined use and Integration of High precision Satellite Data, Advanced Modeling, Process Control and Business Innovation). <http://www.enorasis.eu/>. Accessed 15 Sep 2019.
4. Villarrubia, G., Paz, J.F.D., Iglesia, D.H., & Bajo, J. (2017). Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation. *Sensors*, 17(8), 1775. doi:10.3390/s17081775.
5. Rinaldi, M., & He, Z. (2014). Decision support systems to manage irrigation in agriculture. In: Sparks, D. (ed.) *Advances in Agronomy*, vol. 123, pp. 229–279. Academic Press, Burlington.
6. CFAES 2018 eFields Report: Ohio State Digital Ag Program. (Jan. 2019). The Ohio State University. Pp. 26–27.
7. Khan, F., Shabbir, F., & Tahir, Z. (2014). A fuzzy approach for water security in irrigation system using wireless sensor network. *Science International*, 26(3).
8. Tevatronic LTD. <http://tevatronic.net>. Accessed 1 May 2019.
9. 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
10. 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* (pp. 133–143). Springer, Cham.
11. Системна оптимізація водокористування при зрошенні: Ковальчук П.І. та ін., монографія. Рівне: НУВГП, 2008. 204 с., ISBN 978-966-327-0967-5
12. Методичні рекомендації з оперативного планування режимів зрошення. Київ: ПГІМ УААН, ІЗПР УААН, 2004. 50 с.
13. Інструкція по оперативному розрахунку поливних режимів та прогноз поливів сільськогосподарських культур за дефіцитом вологозапасів (друге видання) / Г.В. Цивінський, Н.В. Пендак, В.А. Ідаятов. Херсон: Всеукраїнська екологічна ліга, 2010. 33 с.
14. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.
15. Толокняненко В.А. Синтез и анализ систем управления со скользящим интервалом оптимизации: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук: спец. 05.13.01. Политехн. ин-т им. 50-летия Великой Октябрьской соц. революции, Киев, 1975. 30 с.
16. 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.
17. Rosetta Version 1.0 (Free downloaded program). U.S.Salinity Laboratory ARSUSDA; <http://www.usssl.ars.usda.gov>. Accessed 10 Sep 2016.

References

1. Ostapchik, V.P., Kostromin, V.A., & Koval, A.M. (1989). *Informatsyonno-sovetuiushchaia sistema upravleniia orosheniem* [Information advisory irrigation management system]. Kyev: Urozhai. [in Ukrainian].
2. Zhovtonog, O.I., Filipenko, L.A., Demenkova, T.F., & Didenko, N.O. (2015). *Vykorystannia informatsiinoi systemy «GIS Polyv» ta moduliu IRRIMET internet-meteostantsii dlia operatyvnoho planuvannia zroshennia pry doshchuvanni* [Use of the GIS watering information system and IRRIMET module of the Internet meteorological station for prompt irrigation planning]. *Tavrijskyi naukovyi visnyk*, 92, 159–165. [in Ukrainian]
3. ENORASIS (Environmental Optimization of irrigation Management with the Combined use and Integration of High precision Satellite Data, Advanced Modeling, Process Control and Business Innovation). www.enorasis.eu. Retrieved from: http://www.enorasis.eu.
4. Villarrubia, G., Paz, J.F.D., Iglesia, D.H., & Bajo, J. (2017). Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation. *Sensors*, 17(8), 1775. <https://doi.org/10.3390/s17081775>.

5. Rinaldi, M., & He, Z. (2014). Decision support systems to manage irrigation in agriculture. *Advances in Agronomy*, vol. 123, 229–279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00006-6> Retrieved from: https://www.academia.edu/18425605/Decision_Support_Systems_to_Manage_Irrigation_in_Agriculture.
6. CFAES 2018 eFields Report: Ohio State Digital Ag Program. (2019). The Ohio State University, 26-27.
7. Khan, F., Shabbir, F., & Tahir, Z. (2014). A fuzzy approach for water security in irrigation system using wireless sensor network. *Science International*, 26(3), 1065–1070. Retrieved from: <http://www.sci-int.com/pdf/5308846311065-1070--FARAZ%20KHAN-EE---FAISALABAD-CORRECTED.pdf>
8. Tevatronic LTD. tevatronic.net. Retrieved from: <http://tevatronic.net>.
9. 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.
10. 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.
11. Kovalchuk, P.I., Pendak, N.V., Kovalchuk, V.P., & Voloshyn, M.M. (2008). Systemna opty-mizatsiia vodokorystuvannia pry zroshenni: monohrafiia [System optimization of water use during irrigation]. Rivne: NUVHP. [in Ukrainian].
12. *Metodychni rekomendatsii z operatyvnoho planuvannia rezhymiv zroshennia [Guidelines for the operational planning of irrigation regimes]*. (2004). Kyiv: IHiM UAAN, IZPR UAAN. [in Ukrainian].
13. Tsyvinskyi, H.V., Pendak, N.V., & Idaiatov, V.A. (2010). *Instruktsiia po operatyvnomu rozra-khunku polyvnykh rezhymiv ta prohnoz polyviv silskohospodarskykh kultur za defitsytom volohozapasiv (druhe vydannia) [Instruction on prompt calculation of irrigation regimes and forecast of irrigation of crops on deficit of moisture reserves]*. Kherson: Vseukrainska ekolohichna liha. [in Ukrainian].
14. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.
15. Toloknianenko, V.A. (1975). *Sintez i analiz sistem upravlenia so skolziashchym intervalom optimizatsyi [Synthesis and analysis of control systems with sliding optimization interval]*. Extended abstract of candidate's thesis. Kyev. Politekh. institut im. 50-letyia Velykoi Oktiabrskoi revoliutsii.
16. Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892–898.
17. Rosetta Version 1.0 (Free downloaded program). U.S. Salinity Laboratory ARSUSDA. www.usssl.ars.usda.gov. Retrieved from: <http://www.usssl.ars.usda.gov>.

А.П. Войтович, В.П. Ковальчук

Развитие мониторинговых исследований влажности почвы на поле для обеспечения управления орошением экспериментально-расчетным методом

***Анотация.** В статье выделены актуальные проблемы развития мониторинговых исследований влажности почвы и метеорологических показателей для информационного обеспечения систем управления орошением. На основе анализа литературы показано, что управление влажностью почвы может осуществляться как непосредственно по результатам измерений влажности почвы, так и используя расчетные методики. При наличии автоматически полученных данных метеорологических прогнозов принятие решений о поливе происходит экспериментально-расчетным методом. Мониторинговые исследования составляют экспериментальную часть и используются в качестве обратной связи при управлении влажностью. Измерение влажности почвы рекомендуется осуществлять с использованием различных сенсоров влажности почвы косвенным методом определения. В качестве сенсоров можно применить различные тензиометры, диэлектрические и резистивные датчики. Расчетную часть составляют критерий принятия решений о начале полива, балансовый метод расчета влажности почвы или влагозапасов в почве (или многослойная математическая модель влогопереноса при наличии достаточных для ее работы входных параметров) с использованием автоматического метеорологического прогноза. Статья проиллюстрирована результатами лабораторного модельного эксперимента и полевых исследований по автоматизированной передаче данных измерения и реализацией обратной связи при управлении влажностью почвы. Модельный лабораторный эксперимент использовался для апробации конструктивных, технических и технологических показателей оборудования для автоматического мониторинга*

и обработки экспериментально-расчетного метода. Практические прогнозы, расчеты и получение данных о влажности почвы и метеорологических показателей при реализации обратной связи при управлении поливами рассмотрены на примере поля кукурузы в одном из исследовательских хозяйств. Результаты лабораторного эксперимента и полевых исследований показывают эффективность прогнозирования влажности почвы упомянутым методом. Коррекцию прогнозируемой влажности почвы с непосредственным автоматизированным измерением на поле с помощью наземных датчиков рекомендуется проводить ежедневно.

Ключевые слова: влажность почвы, мелиорация, метеорологические показатели, автоматизированный мониторинг, управление орошением, обратная связь, экспериментально-расчетный метод, система поддержки принятия решений.

O.P. Voitovich, V.P. Kovalchuk

**Monitoring research of field soil moisture to provide irrigation management
on the base of an experimental and calculation method**

Abstract. The article highlights the actual problems of monitoring studies of soil moisture and meteorological indicators for informational support of irrigation management systems. On the basis of literature analysis it is shown that soil moisture control can be carried out both directly on the results of soil moisture measurements and using calculated methods. In the presence of automatically obtained meteorological forecasting data, irrigation decisions are made using an experimental calculation method. Monitoring studies are part of the experiment and are used as feedback in soil moisture control. Soil moisture measurement is recommended when using a variety of soil moisture sensors by indirect methods of determination. Various tensiometers, dielectric and resistive sensors can be used as sensors. The calculation part consists of the decision criterion for the beginning of irrigation, the balance method of calculating soil moisture or moisture reserves in the soil (or a multilayered mathematical model of moisture transfer in the presence of sufficient input parameters for that) when using automatic meteorological forecast. The article is illustrated by the results of a laboratory model experiment and field research with automated measurement data transmission and feedback implementation in soil moisture control. The model laboratory experiment was used to test the design, technical and technological parameters of the equipment for automatic monitoring and testing of the experimental and calculation method. Practical forecasts, calculations and data acquisition of soil moisture and meteorological indicators for the implementation of feedback during irrigation management are considered on the example of a corn field in one of the experimental farms. The results of the laboratory experiment and field studies show the effectiveness of predicting soil moisture by this method. It is recommended to make daily soil moisture correction for direct automated field measurements using ground sensors.

Key words: soil moisture, weather station, decision support system, automatic irrigation management.