

ЦИФРОВІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ВОДНИМ РЕЖИМОМ ҐРУНТУ ЗА КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ ЯГІДНИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

КАРУНА В.В. – аспірант

orcid.org/0009-0005-6162-5391

Інститут водних проблем і меліорації

Національної академії аграрних наук України

ШАТКОВСЬКИЙ А.П. – доктор сільськогосподарських наук, професор,

член-кореспондент

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0002-4366-0397

Інститут водних проблем і меліорації

Національної академії аграрних наук України

Постановка проблеми. Сучасний розвиток аграрного виробництва відбувається в умовах посилення кліматичних змін, що супроводжуються підвищенням середньорічної температури повітря, нерівномірністю розподілу атмосферних опадів та зростанням частоти посушливих періодів. У результаті цього проблема дефіциту водних ресурсів стає одним із ключових обмежувальних факторів підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, зокрема ягідних насаджень [1, 2]. Особливо чутливою до коливань водного режиму ґрунту є ягідні культури, які характеризуються поверхневим розміщенням основної маси кореневої системи та високою інтенсивністю транспіраційних процесів у критичний період формування врожаю [3, 4].

Таким чином, в ґрунтово-кліматичних умовах Лісостепу України ефективність вирощування ягідних культур значною мірою залежить від своєчасності та точності регулювання вологості кореневмісного шару ґрунту, що обумовлює необхідність впровадження сучасних підходів до управління режимами зрошення на основі цифрових технологій моніторингу агрофізичних параметрів ґрунту та фізіологічного стану рослин [5].

Класичні методи визначення строків і норм поливу базуються переважно на результатах періодичних польових вимірювань або розрахункових моделях визначення евапотранспірації, що не забезпечує оперативності прийняття управлінських рішень у динамічних погодних умовах [6].

У зв'язку з цим, впровадження цифрових сенсорних систем контролю вологості ґрунту, автоматизованих метеостанцій, супутникового моніторингу стану рослин та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень є одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності використання поливної води у ягідництві [7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оптимізації водного режиму ґрунту за вирощування ягідних культур досліджувались у працях багатьох вітчизняних та зарубіжних учених. Зокрема встановлено, що підтримання вологості ґрунту на рівні 70–80% від НВ у період активного росту рослин забезпечує формування високого рівня продуктивності культури [9].

Дослідженнями встановлено, що використання краплинного зрошення дозволяє знизити витрати поливної води на 25–40% порівняно з дощуванням за одночасного підвищення врожайності культури [10].

Сучасні наукові роботи свідчать про високу ефективність застосування сенсорних технологій контролю вологості ґрунту типу TDR та FDR для управління режимами зрошення ягідних культур [11]. За результатами досліджень [12] встановлено, що використання автоматизованих систем управління зрошенням на основі моделей розрахунку евапотранспірації дозволяє зменшити витрати води на 18–35% без зниження врожайності культури. Аналіз літератури показав, що перспективним напрямом оптимізації режимів зрошення є використання супутникових індексів рослинності NDVI для оцінювання водного статусу посівів та прогнозування потреби рослин у воді [13].

Водночас, у науковій літературі недостатньо узагальнено питання комплексного використання цифрових технологій управління водним режимом ґрунту саме за вирощування ягідних культур в умовах Лісостепу України, що зумовлює актуальність проведення відповідних досліджень. Згідно проведених досліджень (ТОВ «Віплант», с. Вороньків, Київська обл.), культури: суниця садова, сорт «Румба», площа 1,0 га і лохина щиткова, сорт «Нельсон», площа 0,95 га, схема дослідів:

1. Управління зрошенням – система Talgil.
 2. Управління зрошенням – метод Penman – Monteith з використанням Weather API віртуальної метеостанції «Visual Crossing Weather Data» (VCWD) <https://www.visualcrossing.com/>.
 3. Умовний контроль – без зрошення.
- було досягнуто результати, що відображені в Таблиці 1 і Таблиці 2.

Мета статті полягає в узагальненні сучасних цифрових підходів до управління водним режимом ґрунту за вирощування ягідних культур в умовах Лісостепу України та розроблення практичних рекомендацій щодо їх ефективного застосування у виробничих умовах.

Матеріали та методика досліджень. Для аналізу методів і підходів до управління водним режимом ґрунту за краплинного зрошення ягідних культур було



Таблиця 1

Облік урожаю суниці садової, ТОВ «Віплант», с. Вороньків, Київська обл.

Варіант управління зрошенням	1 декада червня	2 декада червня	3 декада червня	Разом	По відношенню до контролю:
«Talgil»	1,197	0,968	0,645	2,811	100,0%
«Penman-Monteith»	1,342	1,026	0,770	3,138	111,6%
Без зрошення	1,007	0,754	0,492	2,253	80,1%

Таблиця 2

Облік урожаю лохини щиткової, ТОВ «Віплант», с. Вороньків, Київська обл.

Варіант управління зрошенням	2 декада липня	3 декада липня	1 декада серпня	2 декада серпня	Разом	По відношенню до контролю:
«Talgil»	1,971	1,275	1,425	0,053	4,724	100,0%
«Penman-Monteith»	2,107	1,323	1,508	0,061	4,999	105,8%
Без зрошення	0,174	0,076	0,022	0,000	0,272	5,8%

проаналізовано відповідну тематичну наукову літературу. Матеріалами досліджень слугували результати вітчизняних та зарубіжних наукових публікацій, присвячених управлінню водним режимом ґрунту за вирощування ягідних культур в умовах краплинного зрошення, а також застосуванню цифрових технологій моніторингу вологості ґрунту та дистанційного контролю стану посівів. У процесі досліджень використано методи системного аналізу, порівняння, узагальнення та інтерпретації результатів польових експериментів, представлених у науковій літературі. Проведено оцінку ефективності застосування сенсорних технологій контролю вологості ґрунту, супутникових індексів рослинності та автоматизованих систем керування поливами для оптимізації водоспоживання ягідних культур. Особливу увагу приділено аналізу показників водопродуктивності, режимів краплинного зрошення та технологічних рішень щодо підвищення ефективності використання поливної води в умовах Лісостепу. Узагальнення результатів виконано на основі порівняльного аналізу даних щодо впливу різних підходів до управління зрошенням на водний режим ґрунту та продуктивність ягідних культур. Отримані результати систематизовано з метою формування практичних рекомендацій щодо використання цифрових технологій у системах краплинного зрошення ягідних культур.

Результати досліджень. Ягідні культури характеризуються підвищеною чутливістю до змін водного режиму ґрунту, що зумовлено морфологічними особливостями її кореневої системи та високою інтенсивністю транспірації протягом вегетаційного періоду [3, 4]. Основна маса кореневої системи таких рослин розміщується

у верхньому шарі ґрунту на глибині 0–30 см, що обмежує можливість використання глибших запасів ґрунтової вологи та зумовлює необхідність підтримання стабільної вологості саме в цьому горизонті [15].

Найбільш критичними щодо дефіциту вологи є періоди бутонізації, цвітіння і формування ягід. У зазначені фази навіть короткочасне зниження вологості ґрунту за межі оптимального (табл. 3) призводить до зменшення маси ягід, зниження кількості зав'язі і погіршення товарних показників продукції [9]. Згідно з результатами досліджень, евапотранспірація ягідних культур залежно від погодних умов та технології вирощування становить від 350 до 550 мм за вегетаційний період залежно від ґрунтово-кліматичної зони, погодних умов, сортових особливостей та агротехнології вирощування [10].

За цього коефіцієнт водоспоживання культури варіюється залежно від фази розвитку:

- початок вегетації: 0,4–0,6;
- цвітіння: 0,7–0,9;
- формування ягід: 1,0–1,2;
- післязбиральний період: 0,5–0,7 [11].

Особливістю формування водного режиму ґрунту під насадженнями ягідних культур є його значна варіабельність у межах кореневмісного шару, що обумовлено локальним характером краплинного зволоження, неоднорідністю гранулометричного складу ґрунтів, впливом мульчування, мікрорельєфом ділянки [12]. В умовах Лісостепу України додатковим фактором ризику є нерівномірність атмосферного зволоження протягом вегетаційного періоду, що підсилює необхідність застосування систем оперативного моніторингу вологості ґрунту [5]. Таким чином, підтримання оптимального водного

Таблиця 3

Оптимальні параметри вологості ґрунту ягідних культур за фазами розвитку рослин [3, 4, 9, 15]

Фаза розвитку	Глибина контролю, см	Оптимальна вологість, % НВ	Особливості водоспоживання
Початок вегетації	0–20	65–70	активізація коренеутворення
Бутонізація	0–30	70–75	формування генеративних органів
Цвітіння	0–30	75–80	критичний період
Формування ягід	0–40	75–80	максимальна евапотранспірація
Дозрівання	0–40	70–75	стабілізація водного режиму
Післязбиральний період	0–30	65–70	відновлення рослин

режиму ґрунту є ключовим чинником формування високої продуктивності ягідних культур, що зумовлює необхідність застосування сучасних методів контролю та управління процесами зволоження.

У практиці вирощування ягідних культур для визначення строків проведення поливів традиційно використовуються лабораторні, польові та розрахункові методи контролю вологості ґрунту [6]. Найбільш поширеним є термостатно-ваговий метод визначення вологості ґрунту, який характеризується високою точністю результатів вимірювань, однак має значну трудомісткість і не забезпечує оперативності отримання інформації [16]. Для оперативного контролю вологості ґрунту широко застосовуються тензіометричні методи, що дозволяють визначати потенціал ґрунтової вологи безпосередньо в польових умовах [17]. Розрахункові методи визначення строків проведення поливів базуються на використанні показників евапотранспірації рослин, що визначаються за даними метеорологічних спостережень [12].

До основних розрахункових підходів належать:

- метод водного балансу;
- біокліматичний та біофізичний методи;
- метод коефіцієнтів водоспоживання;
- метод евапотранспірації.

Зазначені методи (табл. 4) широко використовують у виробничій практиці завдяки простоті застосування, проте вони не враховують просторову неоднорідність зволоження ґрунту в межах поля, що обмежує їх ефективність за використання локальних способів зрошення, зокрема – краплинного [18].

Крім того, класичні методи не дозволяють здійснювати безперервний моніторинг стану вологості ґрунту в режимі реального часу, що ускладнює оперативне прийняття управлінських рішень щодо оптимізації режимів зрошення [7].

У зв'язку з цим, у сучасних умовах розвитку точного землеробства значного поширення набувають цифрові технології контролю водного режиму ґрунту, що забезпечують підвищення ефективності використання поливної води та стабілізацію продуктивності ягідних культур.

Одним із ключових напрямів підвищення ефективності управління водним режимом ґрунту за вирощування ягідних культур є використання цифрових сенсорних систем моніторингу вологості ґрунту, які забезпечують можливість оперативного отримання інформації про стан кореневмісного шару в режимі реального часу [7, 11].

Сучасні цифрові системи контролю вологості ґрунту базуються на визначенні діелектричної провідності, капілярного (всисного тиску) ґрунту, як параметрів, які тісно корелюють з умістом доступної води та дозволяють здійснювати безперервний моніторинг водного режиму на різних глибинах кореневмісного шару [19].

Найбільш поширеними в практиці точного землеробства є сенсори таких типів:

- TDR (Time Domain Reflectometry);
- FDR (Frequency Domain Reflectometry);
- ємнісні сенсори;
- цифрові автоматизовані тензіометри;
- сенсори матричного потенціалу ґрунтової вологи типу Watermark.

Сенсори типу TDR забезпечують високу точність визначення об'ємної вологості ґрунту незалежно від його гранулометричного складу, що робить їх ефективними для використання в системах управління краплинним зрошенням ягідних культур [11]. Сенсори типу FDR характеризуються високою швидкістю вимірювання та можливістю інтеграції в автоматизовані системи управління поливами, що дозволяє використовувати їх у складі інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень щодо проведення поливів [20]. Ємнісні сенсори вологості ґрунту мають нижчу вартість порівняно з TDR та FDR, що забезпечує їх широке використання у виробничих умовах середніх та малих господарств [23]. Перспективним напрямом цифрового моніторингу є застосування сенсорів матричного потенціалу ґрунтової вологи типу Watermark, які дозволяють визначати доступність води для рослин та ефективно використовуються при управлінні режимами краплинного зрошення ягідних культур [22].

Результати досліджень свідчать, що використання цифрових сенсорних систем моніторингу вологості ґрунту дозволяє:

- зменшити витрати поливної води на 20–35%;
- підвищити врожайність ягідних культур на 15–25%;
- забезпечити стабільність водного режиму кореневмісного шару ґрунту;
- знизити витрати електроенергії на проведення поливів [12, 19].

Особливо ефективним є використання сенсорів вологості ґрунту у поєднанні з автоматизованими системами управління зрошенням, що дозволяє реалізувати принципи точного землеробства за вирощування ягідних культур в умовах Лісостепу України [7].

Таблиця 4

Порівняльна характеристика традиційних методів контролю вологості ґрунту [6, 12, 16–18]

Метод	Точність	Оперативність	Трудомісткість	Можливість автоматизації	Використання за краплинного зрошення
Термостатно-ваговий	висока	низька	висока	відсутня	обмежене
Тензіометричний	середня	середня	середня	часткова	ефективне
Метод водного балансу	середня	середня	низька	часткова	ефективне
Біокліматичний метод	середня	середня	низька	часткова	ефективне
Розрахунковий метод визначення евапотранспірації	висока	висока	низька	висока	високоефективне

Таблиця 5

Порівняльна характеристика цифрових сенсорів вологості ґрунту [11, 19–22]

Тип сенсора	Принцип роботи	Точність	Вартість	Автоматизація	Доцільність використання
TDR	час проходження електро-магнітного імпульсу	дуже висока	висока	повна	висока
FDR	частотний аналіз діелектричної проникності	висока	середня	повна	висока
Ємнісний	зміна ємності середовища	середня	низька	повна	середня
Watermark	матричний потенціал	середня	низька	часткова	висока
Цифровий тензіометр	потенціал ґрунтової вологи	висока	середня	часткова	висока

Важливим елементом цифрового управління режимами зрошення є використання моделей розрахунку евапотранспірації рослин за даними автоматизованих інтернет-метеостанцій [12]. Найбільш поширеною у світовій практиці є модель розрахунку референтної евапотранспірації за методом Penman–Monteith, рекомендована FAO як базова для планування режимів зрошення. У цифрових системах управління поливами зазначену модель використовують для прогнозування потреби рослин у воді з урахуванням:

- температури повітря;
- швидкості вітру;
- відносної вологості повітря;
- сонячної радіації.

У практиці вирощування ягідних культур використання моделей прогнозування евапотранспірації дозволяє оптимізувати строки проведення поливів та підвищити ефективність використання водних ресурсів на 18–30% [12].

Використання методу Penman–Monteith для розрахунку евапотранспірації у поєднанні з коефіцієнтами водоспоживання культури дозволяє визначати фактичну потребу ягідних культур у зрошувальній воді на різних етапах її розвитку та формувати оптимальний графік проведення поливів. Особливо ефективним є поєднання розрахункових моделей евапотранспірації з даними сенсорного моніторингу вологості ґрунту, що забезпечує підвищення точності управління водним режимом кореневмісного шару ґрунту в умовах нестійкого зволоження Лісостепу України.

Одним із перспективних напрямів цифровізації управління водним режимом ґрунту є застосування технологій дистанційного зондування Землі, що дозволяють здійснювати оперативний контроль фізіологічного стану рослин на основі аналізу спектральних характеристик рослинного покриву [13].

Найбільш інформативним показником оцінювання стану посівів є нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI, який використовується для визначення інтенсивності фотосинтетичної активності рослин та їх забезпеченості водою. Результати досліджень свідчать, що зниження значень NDVI до рівня нижче 0,65 у період формування ягід може свідчити про розвиток водного стресу рослин ягідних культур та необхідність проведення коригувальних поливів [22]. Використання супутникових даних програм спостереження Землі дозволяє здійснювати просторовий моніторинг стану насаджень із високою періодичністю та

забезпечує можливість своєчасного прийняття управлінських рішень щодо оптимізації режимів зрошення [13]. Особливо ефективним є використання супутникових платформ програми European Space Agency, зокрема супутників Sentinel-2, які забезпечують отримання мультиспектральних зображень із просторовою роздільною здатністю до 10 м та періодичністю повторного покриття території 5 діб. Використання супутникових індексів рослинності дозволяє:

- визначати просторову неоднорідність водозабезпечення рослин;
- оцінювати ефективність проведених поливів;
- прогнозувати розвиток водного стресу;
- оптимізувати графіки проведення поливів [22].

Таким чином, інтеграція супутникового моніторингу у систему управління водним режимом ґрунту забезпечує підвищення точності прийняття управлінських рішень за вирощування ягідних культур.

Подальший розвиток систем управління водним режимом ґрунту пов'язаний із впровадженням технологій Інтернету речей (IoT), що забезпечують інтеграцію сенсорних систем моніторингу, автоматизованих метеостанцій та програмного забезпечення підтримки прийняття рішень у єдину цифрову платформу управління зрошенням [20]. IoT-системи управління зрошенням функціонують за принципом безперервного збору, передачі та аналізу інформації щодо:

- вологості ґрунту;
- температури повітря;
- відносної вологості повітря;
- швидкості вітру;
- сонячної радіації.

У результаті інтеграції зазначених параметрів формується автоматизований алгоритм визначення строків проведення вегетаційних поливів, що дозволяє забезпечити підтримання оптимального водного режиму ґрунту протягом усього періоду вегетації ягідних культур [19]. За результатами узагальнення матеріалів міжнародних досліджень встановлено, що використання IoT-систем управління зрошенням дозволяє:

- зменшити витрати води на 20–40%;
- знизити витрати електроенергії на 15–25%;
- підвищити врожайність культури на 12–28%;
- зменшити трудові витрати на управління поливами.

Особливо ефективним є використання IoT-рішень при впровадженні систем краплинного зрошення, що забезпечує локалізацію зволоження кореневмісного

шару ґрунту та підвищення ефективності використання зрошувальної води [10].

Економічна доцільність використання цифрових систем управління зрошенням визначається зниженням витрат поливної води, оптимізацією енергоспоживання та суттєвим підвищенням урожайності ягідних культур.

За результатами узагальнення матеріалів наукових досліджень встановлено, що впровадження цифрових систем управління зрошенням за вирощування ягідних культур дозволяє:

- зменшити витрати зрошувальної води на 18–35%;
- підвищити врожайність ягід на 12–28%;
- знизити витрати електроенергії на 15–22%;
- скоротити витрати ручної праці на 20–30% [12].

В умовах Лісостепу України використання цифрових систем управління зрошенням є особливо актуальним у зв'язку з нерівномірністю атмосферного зволоження та високою варіабельністю температурного режиму протягом вегетаційного періоду [5]. За результатами досліджень встановлено, що строк окупності сенсорних систем управління поливами становить у середньому 2–3 роки залежно від площі насаджень та рівня автоматизації системи [19]. Таким чином, застосування цифрових технологій управління водним режимом ґрунту забезпечує підвищення ефективності використання водних ресурсів та стабілізацію продуктивності насаджень ягідних культур в умовах Лісостепу України.

Висновки. Встановлено, що ягідні культури характеризуються підвищеною чутливістю до змін водного режиму ґрунту внаслідок поверхневого розміщення кореневої системи та високої інтенсивності транспіраційних процесів. Підтримання вологості кореневмісного шару ґрунту на рівні 85–90% від НВ у критичний період розвитку рослин забезпечує формування високого рівня продуктивності культур. Використання цифрових сенсорних систем моніторингу вологості ґрунту дозволяє підвищити точність управління режимами зрошення та зменшити витрати поливної води на 20–35%. Застосування моделей прогнозування евапотранспірації забезпечує оптимізацію строків проведення поливів та підвищує ефективність використання водних ресурсів. Використання супутникового моніторингу дозволяє здійснювати оперативний контроль водного статусу насаджень ягідних культур та своєчасно виявляти ознаки водного стресу рослин. Інтеграція IoT-систем управління поливами забезпечує автоматизацію процесів прийняття рішень щодо проведення поливів та зниження трудових витрат.

Визначено, що в умовах Лісостепу України застосування цифрових технологій управління водним режимом ґрунту забезпечує підвищення врожайності ягідних культур на 12–28% та скорочення витрат водних ресурсів на 18–35%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56 / Allen R.G. et al. Rome: FAO, 1986. 333 p.
2. Doorenbos J., Pruitt W.O. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: FAO, 1992. 156 p.
3. Hoppula K., Salo T. Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. *Irrigation Science*. 2007. Vol. 25. P. 401–409. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0055-7>
4. Hanson B., Bendixen W. Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. *California Agriculture*. 2004. Vol. 58. № 1. P. 48–53. <https://doi.org/10.3733/ca.v058n01p48>
5. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво. Ромащенко М. І. та ін. *Меліорація та водне господарство*. 2020. № 1. С. 5–22.
6. Лозовицький П.С. Водні та хімічні меліорації ґрунтів : навчальний посібник. Київ: Київський університет, 2010. 276 с.
7. Jones H. G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*. 2004. Vol. 55. № 407. P. 2427–2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
8. Impacts of deficit irrigation on strawberry physiology, water productivity, quality and yield. Pingguo Y. et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. №2. P. 675–686. <https://doi.org/10.3390/su17020675>
9. Розрахунок режимів зрошення сільськогосподарських культур: Навчальний посібник / Доценко В.І. та ін. Дніпро: ДДАЕУ, 2023. 356 с.
10. Keller J., Bliesner R. D. Sprinkle and drip irrigation. New York : Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.
11. Soil water sensing for water balance, ET, and WUE. Evett S. R. et al. *Agricultural Water Management*. 2012. Vol. 104. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002>
12. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. Pereira L. S. et al. *Agricultural Water Management*. 2015. Vol. 147. P. 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
13. Bastiaanssen W. G. M., Molden D. J., Makin I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*. 2000. Vol. 46. № 2. P. 137–155. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00080-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00080-9)
14. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding : state-of-the art and future directions. Dorigo W. A. et al. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 203. P. 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
15. Létourneau G., Caron J. Irrigation Management Scale and Water Application Method to Improve Yield and Water Productivity of Field-Grown Strawberries. *Agronomy*. 2019. Vol. 9 (6). 286 P. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060286>
16. Розвиток інтенсивних систем землеробства на зрошуваних землях України: науково-технологічне забезпечення : методичні рекомендації / Вожегова Р. А. та ін. Херсон : «Олді-Плюс», 2020. 254 с.
17. Shock C. C., Barnum J. M., Seddigh M. Calibration of watermark soil moisture sensors for irrigation management. Proceedings of the International Irrigation Show, San Diego, 1998. P. 139–146.
18. Dukes M. D., Zotarelli L., Morgan K. T. Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida. *HortTechnology*. 2010. Vol. 20 (1). P. 133–142. <https://doi.org/10.21273/horttech.20.1.133>

19. Kim Y., Evans R. G., Iversen W. M. Remote sensing and control of irrigation systems using wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. Vol. 57 (7). P. 1379–138. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.917198>
20. Zhang N., Wang M., Wang N. Precision agriculture: a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2002. Vol. 36. P. 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)
21. Muñoz-Carpena R., Dukes M. D. Automatic irrigation based on soil moisture sensors for vegetable crops. *EDIS*. 2019. Vol. 2005 (8). <https://doi.org/10.32473/edis-ae354-2005>
22. Thompson R. B., Gallardo M., Valdez L. C. Using plant water status to define irrigation scheduling thresholds. *Agricultural Water Management*. 2007. Vol. 88 (1). P. 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.007>
23. Response of Two Inexpensive Commercially Produced Soil Moisture Sensors to Changes in Water Content and Soil Texture. Raper T. B. et al. *Agricultural Sciences*. 2015. Vol.6 (10). <http://doi.org/10.4236/as.2015.610110>
12. Pereira, L. S. et al. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*. Vol. 147. P. 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
13. Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., & Makin, I. W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*. Vol. 46. № 2. P. 137–155. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00080-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00080-9)
14. Dorigo W. A. et al. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: state-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 203. P. 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
15. Létourneau, G., & Caron, J. (2019). Irrigation Management Scale and Water Application Method to Improve Yield and Water Productivity of Field-Grown Strawberries. *Agronomy*. Vol. 9(6). 286 P. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060286>
16. Vozhehova, R. A. et al. (2020). Rozvytok intensyvykh system zemlerobstva na zroshuvanykh zemliakh Ukrainy: naukovo-tekhnologichne zabezpechennia [Development of intensive farming systems on irrigated lands in Ukraine: Scientific and Technological Support]. Kherson: «Oldi-Plus», 254 [in Ukrainian].
17. Shock, C. C., Barnum, J. M., & Seddigh, M. (1998). Calibration of watermark soil moisture sensors for irrigation management. Proceedings of the International Irrigation Show, San Diego. P. 139-146.
18. Dukes, M. D., Zotarelli, L., & Morgan, K. T. (2010). Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida. *HortTechnology*. Vol. 20 (1). P. 133–142. <https://doi.org/10.21273/horttech.20.1.133>
19. Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2008). Remote sensing and control of irrigation systems using wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 57 (7). P. 1379–138. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.917198>
20. Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture: a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 36. P. 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)
21. Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. D. (2019). Automatic irrigation based on soil moisture sensors for vegetable crops. *EDIS*. Vol. 2005 (8). <https://doi.org/10.32473/edis-ae354-2005>
22. Thompson, R. B., Gallardo, M., & Valdez, L. C. (2007). Using plant water status to define irrigation scheduling thresholds. *Agricultural Water Management*. Vol. 88 (1). P. 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.007>
23. Raper, T. B. et al. (2015). Response of Two Inexpensive Commercially Produced Soil Moisture Sensors to Changes in Water Content and Soil Texture. *Agricultural Sciences*. Vol.6 (10). <http://doi.org/10.4236/as.2015.610110>

REFERENCES:

1. Allen, R.G. et al. (1986). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 333 p.
2. Doorenbos, J., & Pruitt, W.O. (1992). Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: FAO, 156 p.
3. Hoppula, K., & Salo, T. (2007). Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. *Irrigation Science*, 25. P. 401–409. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0055-7>
4. Hanson, B., & Bendixen, W. (2004). Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. *California Agriculture*, 58, 1. P. 48–53. <https://doi.org/10.3733/ca.v058n01p48>
5. Romashchenko, M. I. et al. (2020). Vplyv suchasnykh klimatychnykh zmin na vodni resursy ta silskohospodarske vyrobnytstvo [The impact of current climate change on water resources and agricultural production]. *Melioratsiia ta vodne hospodarstvo*, 1, 5–22 [in Ukrainian].
6. Lozovitskyi, P.S. (2010). Vodni ta khimichni melioratsii gruntiv [Hydrological and chemical soil improvement]. Kyiv : Kyiv University, 276 [in Ukrainian].
7. Jones, H.G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 55. № 407. P. 2427–2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
8. Pingguo, Y. et al. (2025). Impacts of deficit irrigation on strawberry physiology, water productivity, quality and yield. *Sustainability*. Vol. 17. № 2. P. 675–686. <https://doi.org/10.3390/su17020675>
9. Dotsenko B.I. et al. (2023). Rozrakhunok rezhymiv zroshennia silskohospodarskykh kultur [Calculation of irrigation regimes for agricultural crops]. Dnipro : DDAEU, 356 [in Ukrainian].
10. Keller, J., & Bliesner, R. D. (1990). Sprinkle and drip irrigation. New York : Van Nostrand Reinhold, 652 p.
11. Evett, S. R. et al. (2012). Soil water sensing for water balance, ET, and WUE. *Agricultural Water Management*. Vol. 104. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002>
12. Каруна В.В., Шатковський А.П. Цифрові підходи до управління водним режимом ґрунту за краплиного зрошення ягідних культур в умовах Лісостепу України
13. Мета статті – дослідження сучасних наукових підходів до підвищення ефективності управління водним

режимом ґрунту за вирощування ягідних культур в умовах Лісостепу України із застосуванням цифрових технологій моніторингу та автоматизації поливів, а також оцінка їх впливу на оптимізацію водоспоживання, стабільність продуктивності насаджень і раціональне використання поливної води в системах краплинного зрошення. Особливу увагу приділено аналізу сучасних інструментів дистанційного контролю стану рослин і ґрунту, сенсорних систем визначення вологості, моделей планування режимів зрошення та інформаційно-аналітичних платформ підтримки прийняття рішень. **Методи дослідження.** У процесі досліджень використано методи системного аналізу, узагальнення, порівняння та інтерпретації результатів вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій щодо управління водним режимом ґрунту ягідних культур. Проведено оцінку ефективності застосування сенсорів вологості ґрунту різних типів, супутникових індексів рослинності (NDVI), моделей розрахунку евапотранспірації культур за методикою FAO-56, а також автоматизованих систем керування поливами на основі IoT – технологій. Здійснено порівняльний аналіз показників водоспоживання, водопроductивності та урожайності ягідних культур за різних режимів зрошення та рівнів цифровізації технологічних процесів. **Результати дослідження.** Встановлено, що застосування цифрових підходів до управління водним режимом ґрунту забезпечує підвищення ефективності використання поливної води на 20–35%, зменшення непродуктивних втрат вологи та стабілізацію вологості кореневмісного шару ґрунту протягом критичних фаз розвитку рослин. Обґрунтовано доцільність використання сенсорних систем контролю вологості ґрунту, супутникового моніторингу стану посівів і програмних моделей планування режимів зрошення для підвищення точності визначення строків і норм поливу. Показано, що інтеграція цифрових інструментів у технології краплинного зрошення сприяє підвищенню водопроductивності насаджень ягідних культур, оптимізації режимів водоспоживання та зниженню енергетичних витрат на проведення поливів. **Висновки.** Узагальнення результатів досліджень свідчить про високу ефективність використання цифрових технологій моніторингу та управління водним режимом ґрунту у системах краплинного зрошення ягідних культур в умовах Лісостепу України. Використання сенсорних систем, супутникових індексів рослинності та автоматизованих алгоритмів керування поливами забезпечує підвищення рівня ресурсозбереження, стабільності урожайності та покращення екологічної ефективності технологій вирощування ягідних культур. Запровадження зазначених підходів доцільно розглядати як один із ключових напрямів удосконалення сучасних систем управління водними ресурсами в ягідництві. Отримані результати можуть бути використані при розробці рекомендацій щодо цифровізації управління зрошенням ягідних культур у господарствах Лісостепу України.

Ключові слова: вегетаційний індекс NDVI, IoT – системи управління зрошенням, дистанційний моніторинг, евапотранспірація, точне землеробство.

Karuna V.V., Shatkovskiy A.P. Digital approaches to soil water regime management under drip irrigation of berry crops in the Forest-Steppe conditions of Ukraine

The purpose of the article is to examine modern scientific approaches to improving the efficiency of soil water management in berry crops cultivation in the Forest-Steppe region of Ukraine through the use of digital technologies for monitoring and automating irrigation, as well as to assess their impact on optimizing water consumption, ensuring stable crop yields, and promoting the rational use of irrigation water in drip irrigation systems. Particular attention is paid to the analysis of modern tools for remote monitoring of plant and soil conditions, sensor systems for determining moisture content, models for planning irrigation regimes, and information-analytical platforms for decision support.

Research methods. The research utilized methods of systematic analysis, generalization, comparison, and interpretation of results from domestic and international scientific publications on soil water management for berry crops. An assessment was conducted of the effectiveness of using various types of soil moisture sensors, satellite vegetation indices (NDVI), crop evapotranspiration calculation models based on the FAO-56 methodology, as well as automated irrigation control systems based on IoT technologies. A comparative analysis was conducted of water consumption, water productivity, and yield of garden berry crops under different irrigation regimes and levels of digitalization of technological processes. **Research results.** It has been established that the application of digital approaches to soil moisture management increases the efficiency of irrigation water use by 20–35%, reduces non-productive moisture losses, and stabilizes the moisture content of the root zone during critical phases of plant development. The feasibility of using sensor-based soil moisture monitoring systems, satellite crop condition monitoring, and software models for irrigation planning to improve the accuracy of determining irrigation timing and rates has been substantiated. It has been shown that the integration of digital tools into drip irrigation technology contributes to increased water productivity of berry crops plantings, optimization of water consumption regimes, and reduced energy costs for irrigation. **Conclusions.** A synthesis of the research results indicates the high effectiveness of using digital technologies for monitoring and managing soil water regimes in berry crops drip irrigation systems under the conditions of the Ukrainian Forest-Steppe. The use of sensor systems, satellite vegetation indices, and automated irrigation control algorithms ensures increased resource conservation, stable yields, and improved environmental efficiency of berry crop cultivation technologies. The implementation of these approaches should be considered one of the key directions for improving modern water resource management systems in berry cultivation. The results obtained can be used in developing recommendations for the digitalization of irrigation management for berry crops on farms in the Forest-Steppe region of Ukraine.

Key words: NDVI vegetation index, IoT irrigation control systems, remote monitoring, evapotranspiration, precision agriculture.

Дата першого надходження статті до видання: 08.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.09.2026