



Original researches

Calculation of Moisture in Various Soil Layers under Corn Crops According to the Agrohydrometeorological Data

V. I. Dotsenko, T. I. Tkachuk

*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*Received: 30 July 2019
Revised: 05 August 2019
Accepted: 06 August 2019Dnipro State Agrarian and Economic
University, Serhii Efremov Str., 25, 49000,
Dnipro, UkraineTel.: +38-067-957-90-08
E-mail: meliorddaeu@gmail.com**Cite this article:** Dotsenko, V. I., &
Tkachuk, T. I. (2019). Calculation of moisture
in various soil layers under corn crops
according to the agrohydrometeorological data.
Agrology, 2(3), 181–188. doi: 10.32819/019026

Abstract. Agricultural crops during the growing season use moisture from various layers of soil. The root-bearing layer of corn varies from 10 cm in the period of sowing to 70–80 cm in the period of ripeness. It raises the question of determining the soil moisture for every day of vegetation at any depth. It is proved that now the agrohydrometeorological method for determining the moisture reserves in the meter and half-meter soil layers yields good results. Therefore, in this work, the use of this method for calculating soil moisture throughout the soil profile with an interval of 10 cm is substantiated. The proposed model for the formation of moisture reserves yields good results both in natural moisture and in the case of irrigation. The use of this model for soil moisture formation according to seven meteorological stations in Dnipropetrovsk region is explored. As an example, the results of the meteorological station Gubinicha are presented. The results obtained in this way can be presented in the form of moisture content as a percentage of the mass of dry soil or as a fraction of the lowest moisture content in depth during the vegetation. The method allows the use of meteorological values, measured directly on the studied areas. This is especially true of rainfall and irrigation. The application of research results will help to more accurately determine the moisture reserves in the roots of the soil layer, to plan the optimal timing of sowing crops, to effectively carry out care activities, to target mineral fertilizers, and to maintain soil moisture in the required limits for irrigation.

Keywords: soil moisture; method of calculation of soil moisture reserves; indicator of previous weather conditions; irrigation regime; root-bearing layer; phases of corn development.

Розрахунок вологості в різних шарах ґрунту під посівами кукурудзи за агрогідрометеорологічними даними

В. І. Доценко, Т. І. Ткачук

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

Анотація. Сільськогосподарські культури протягом вегетаційного періоду використовують вологу з різних шарів ґрунту. Кореневмісний шар кукурудзи змінюється від 10 см у період сівби до 70–80 см у проміжок стиглості. Постає питання про визначення вологості ґрунту на кожен день вегетації за будь-якої глибини. Доведено, що натепер агрогідрометеорологічний метод визначення запасів вологи в метровому і півметровому шарах ґрунту дає добрі результати. Тому в даній роботі обґрунтовано застосування цього методу для розрахунку вологості ґрунту по всьому ґрунтовому профілю з інтервалом 10 см. Запропонована модель формування запасів вологи дає добрі результати як за природного зволоження, так і у випадку зрошення. Досліджено використання цієї моделі щодо формування ґрунтової вологи за даними семи метеостанцій Дніпропетровської області. Як приклад представлено результати по метеостанції Губинича. Отримані в такий спосіб результати можна представити у вигляді вологості у відсотках від маси сухого ґрунту або у вигляді частки від найменшої вологості по глибині протягом вегетації. Методика дозволяє використовувати метеорологічні величини, виміряні безпосередньо на досліджуваних територіях. Особливо це стосується атмосферних опадів і поливів. Застосування результатів досліджень сприятиме більш точному визначенню запасів вологи в кореневмісному шарі ґрунту, плануванню оптимальних строків сівби сільськогосподарських культур, ефективному проведенню заходів по догляду за ними, цілеспрямованому внесенню мінеральних добрив, а також підтриманню вологості ґрунту в потрібних межах при зрошенні.

Ключові слова: вологість ґрунту; методика розрахунку запасів ґрунтової вологи; показник попередніх погодних умов; режим зрошення; кореневмісний шар; фази розвитку кукурудзи.

Вступ

Відновлення зрошення в Україні є перспективним у контексті сталого розвитку країни, перетворення її на потужну

аграрну державу. Оптимізація режимів зрошення передбачає розробку таких режимів, які забезпечили б оптимальний рівень вологості в кореневмісному шарі ґрунту протягом усього періоду вегетації в погодних умовах конкретного року.

Грунтова волога, як одна з найважливіших складових частин ґрунту, відіграє виняткову роль у перенесенні різних речовин у ґрунтовій товщі і постачанні поживних речовин до рослин. Тобто ці речовини пересуваються з рідкою ґрунтовою вологою (Rode, 2008).

Волога в ґрунті визначає рівень його ефективної родючості. Від вологості ґрунту залежить більшість його агрофізичних властивостей: щільність, липкість, здатність утворювати агрегати і крихкість, а також готовність ґрунту до початку весняних польових робіт. Грунтова волога слугує і терморегулятором, впливаючи на його тепловий баланс (Vetrenko, 2014), визначає стійкість ґрунту до водної і вітрової ерозії.

Погоджуючись з думкою О. А. Роде, що управління водним режимом ґрунту – один із важливих, а часто і найважливіший прийом підвищення родючості сільськогосподарських земель, наші дослідження були спрямовані на вивчення водного режиму ґрунту і можливість його регулювання поливами.

У сучасних умовах для розрахунку вологозапасів використовують водно-балансовий метод, за якого вимірюють запаси вологи в початковий період. Для наступних періодів додають приходну частину (атмосферні опади і поливи) та віднімають витратну (сумарне випаровування). Існуючі методи розрахунку вологозапасів різняться лише способом обчислення сумарного випаровування, тому розробки останнього часу направлені здебільшого на вдосконалення розрахунку саме цієї величини водного балансу. Сьогодні найдосконалішим є спосіб ФАО для визначення сумарного випаровування, який пов'язаний з розрахунком еталонного випаровування з поля, зайнятого травостоєм висотою 15 см і зволоженого до оптимального рівня. В основу цього способу покладено вдосконалений метод Монтейна-Пенмана (Allen et al., 1998), який використовує розв'язок сумісних рівнянь водного і теплового балансів. Одним із елементів, що використовується для розрахунку сумарного випаровування з еталонної ділянки, є величина сонячної радіації, яка для більшості метеостанцій України не вимірюється. Виміряні на сучасних дистанційних метеостанціях дані сонячної радіації, які часто використовуються в дослідках, потребують додаткового тарування. Запропоновані емпіричні формули для визначення сонячної радіації через метеорологічні величини (температура і вологість повітря) дають великі похибки (Allen et al., 1998). Вони пов'язані з визначенням метеорологічних величин і використанням зональних емпіричних коефіцієнтів, які для умов України не розроблялися.

Для переходу від еталонної культури до реальної застосовують перехідні коефіцієнти, які змінюються для кожної культури за специфічною закономірністю. Методики в основному пов'язані саме з визначенням закономірності, що залежить від самої культури, сорту і гібриду, фази розвитку, місцевих особливостей. На жаль, надійних даних з цих коефіцієнтів для умов України немає, тому в більшості випадків розробки для розрахунку вологозапасів стосуються встановлення емпіричних коефіцієнтів для різних регіонів, сільськогосподарських культур і методів їх вирощування. Крім того, метод ФАО, як і будь-який водно-балансовий метод, має недоліки, пов'язані з необхідністю вимірювання початкових і контрольних вологозапасів. За подальших розрахунків від декади до декади похибки в обчисленнях можуть накопичуватися і суттєво впливати на кінцевий результат.

Агрогидрометеорологічний метод, розроблений у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ) використовує лише стандартні виміряні метеорологічні величини протягом вегетаційного періоду, не потребує ані початкових, ані контрольних вимірювань запасів вологи (Lytovchenko, 2011). Точність розрахунку вологозапасів за цим методом протягом вегетації однакова.

Мета наших досліджень полягала в установленні закономірностей формування запасів вологи в різних шарах ґрунту з градацією 10 см посівів кукурудзи під дією основних агрогидрометеорологічних умов і поливів.

Матеріал і методи досліджень

У роботі використаний агрогидрометеорологічний метод розрахунку вологозапасів у метровому і півметровому шарах ґрунту, розроблений під керівництвом професора О. Ф. Литовченка. В основу методу покладено залежність запасів вологи від показника попередніх погодних умов, на який впливають сума атмосферних опадів і поливів, дефіцит вологості і температури повітря. При цьому сума атмосферних опадів і поливних норм враховується і ваговим коефіцієнтом, який включає час їх випадіння відносно розрахункової дати.

Такі розрахунки дають добрі результати під час визначення запасів вологи в метровому (W_{0-100}) і півметровому (W_{0-50}) шарах. Однак обчислюючи оптимальні умови росту і розвитку сільськогосподарських культур, необхідно мати відомості про запаси вологи і в інших шарах ґрунту. Так для визначення запасів вологи в орному шарі 0–20 см (W_{0-20}) автор методу запропонував використовувати лінійний зв'язок запасів вологи в 50- і 20-сантиметрових шарах, який апроксимується формулою (Lytovchenko, 2011),

$$W_{0-20} = k_1 \cdot W_{0-50} + k_2, \quad (1)$$

де k_1 та k_2 – емпіричні коефіцієнти.

За більш детального аналізу кореневмісного шару необхідно було б мати відомості і в інших шарах.

Результати

Агрогидрометеорологічна служба вологість ґрунту під посівами кукурудзи щодавно визначає термостатно-ваговим способом через кожні 10 см до глибини 1 м. Результати вимірювань за 22-річний репрезентативний період (1966–1987 рр.), опубліковані в Агрометеорологічних щорічниках, було покладено в основу розробки методики (Lytovchenko et al., 2001; Kovalenko et al., 2014, 2015).

Вологість ґрунту розподіляється за глибиною нерівномірно, що підтверджують дані метеостанції Губиниха. в різні періоди вегетації по роках під посівами кукурудзи (рис. 1). Тут підібрані роки, різні за зволоженістю. Підкреслимо, що вологість ґрунту в різних шарах змінюється у великих межах. Причому верхні шари мають більшу амплітуду мінливості, а глибші – меншу. Це пояснюється насамперед тим, що за атмосферних опадів і поливів зволоження ґрунту починається з верхніх шарів, які зволожуються більше, але зволоження не завжди доходить до нижніх шарів. Одночасно і випаровування вологи відбувається з верхніх шарів ґрунту, які підсихають швидше. Нижні шари ґрунтового профілю зволожуються за рахунок перетікання гравітаційно вільної вологи і вологопереносу, тобто в період переміщення вологи від більш вологих шарів до більш сухих. Зволоження нижніх шарів реєструється здебільшого в осінньо-зимовий період, коли атмосферні опади перевищують випаровування. Тому у весняний період вологість ґрунту нижніх шарів завжди більша і поступово знижується протягом вегетації.

Припустимо, що вологість ґрунту в різних шарах буде змінюватися пропорційно показнику попередніх погодних умов, який використовується для визначення запасів вологи в метровому і півметровому шарах ґрунту (Lytovchenko, 2011). Для такого припущення побудовані залежності вологості ґрунту в різних шарах від показника попередніх погодних умов (рис. 2).

Дані залежності апроксимовані експоненціальною функцією, аналогічною функції агрогидрометеорологічного методу,

$$\beta_i = c - a \cdot e^{-b \cdot P}, \quad (2)$$

де β_i – вологість ґрунту в розрахунковому і шарі ґрунту, %;

P – показник попередніх погодних умов;

a , b і c – емпіричні коефіцієнти, які залежать від сільськогосподарської культури і розрахункової глибини.

Для визначення параметрів a , b та c застосований метод ітерацій (послідовних наближень), оскільки метод найменших

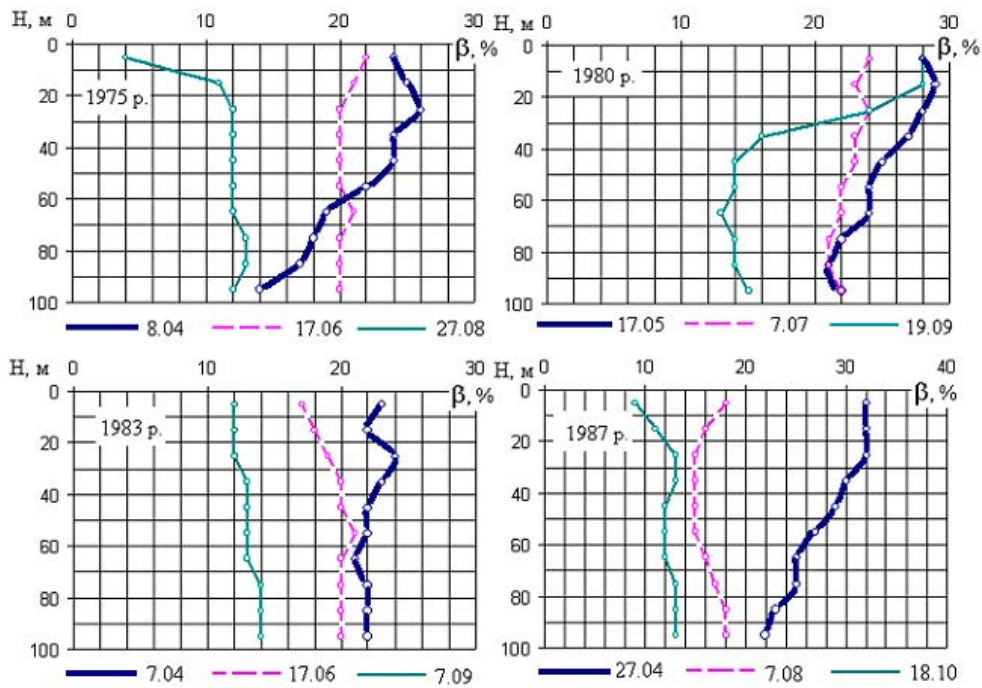


Рис. 1. Розподіл вологості за глибиною ґрунту в різні періоди вегетації (дані метеостанції Губиниха)

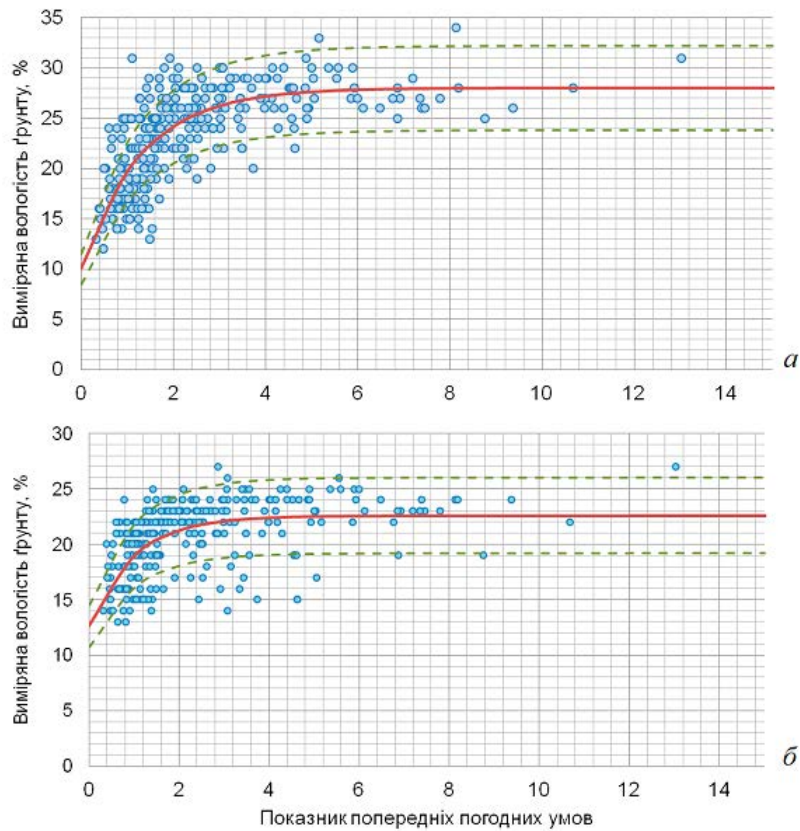


Рис. 2. Залежність вологості ґрунту від показника попередніх погодних умов:
 а – шар ґрунту 0–20 см; б – шар ґрунту 90–100 см
 (дані метеостанції Губиниха)

квадратів у даному випадку прийняти неможливо через те, що у випадку приведення функції до лінійного вигляду її необхідно логарифмувати, а інакше деякі складові даного ряду набудуть від'ємних значень (Galik & Docenko, 1997; Docenko, 1998). Як приклад отримано коефіцієнти a , b та c у рівнянні (2) для десяти шарів ґрунту на полях, зайнятих кукурудзою (таблиця).

Абсолютні середньоквадратичні відхилення розрахованих значень вологості ґрунту від вимірених у відсотках від маси сухого ґрунту становили 2,4–3,4%, відносні – 11,0–14,2%. Коефіцієнт парної кореляції між розрахованими значеннями вологості ґрунту за формулою (2) та виміряною вологістю дорівнював 0,55–0,76, що є придатним для практичного використання.

Отже, запропонована методика дає можливість вести розрахунок вологості ґрунту на кожен день і на будь-якій глибині (рис. 3).

Більш наочно можна представити просторово-часовий графік розподілу вологості ґрунту протягом вегетації по глибині (Н, м) з нанесеними глибині, поширення кореневої системи і датою настання основних фаз розвитку культур, (рис. 4).

У весняний період (на початку вегетації) вологість ґрунту значно вища у верхніх шарах (20–26% і більше), що дає можливість рослинам добре проростати (рис. 1). Миттєве підвищення вологості ґрунту у верхніх шарах відбувається в періоди випадіння нечастих атмосферних опадів. Наприкінці вегетації (кінець серпня–початок вересня вологість ґрунту знижується до 12%). У нижніх шарах вологість ґрунту на початку вегетації поступово зменшується від 20% (березень–перша половина

квітня) до 16% (серпень–вересень). 2007 рік необхідно віднести до посушливих і несприятливих для вирощування кукурудзи в даному регіоні.

Для визначення оптимальної вологості ґрунту під сільськогосподарські культури і призначення поливів розподіл вологи по глибині краще виражати як частку від найменшої вологості (% НВ) – рис. 5.

Так, у період вегетації сімба–сходи (18.04–12.05) вологість ґрунту повинна бути 75% від НВ у шарі ґрунту 0–20 см; у період сходи–5-й листок (12.05–5.06) – 75% НВ у шарі 0–50 см; 5–7-й листки (5.06–12.06) – 80% НВ у шарі 0–70 см; викидання волоті (12.07) – 80 % НВ в шарі 0–80 см; молочна стиглість (7.08) – 75% НВ у шарі 0–80 см; у пізніший період вологість ґрунту більш не впливає на формування врожаю і може знижуватися (Shpak, 1987).

Аналогічні дані можна отримати, визначивши запаси вологи в кореневмісному шарі ґрунту будь-якої потужності, за формулою

$$W_p = \sum(\beta_i \cdot \gamma_i), \quad (3)$$

де W_p – запаси вологи в розрахунковому шарі ґрунту (рис. 5), мм;

β_i – вологість ґрунту в 10-сантиметровому кореневмісному шарі ґрунту (рис. 4), % від маси сухого ґрунту;

γ_i – щільність того ж шару ґрунту, г/см³.

Запаси вологи в кореневмісному шарі ґрунту, який змінюється згодом, задовольняє потреби тільки в початковий період (від висіву до 7-го листка) – рис. 5. У подальшому запаси вологи весь час стають меншими на нижню границю зволоження.

Таблиця. Значення показників a , b та c розраховані за даними метеос-танції Губиниха та показники точності розрахунків

Розрахунковий шар, см	a	b	c	Середньоквадратичне відхилення		Коефіцієнт кореляції між виміреними і розрахованими за вологопасами
				абсолютні	відносні	
0–10	18,36	0,570	28,49	3,36	14,21	0,743
10–20	17,62	0,540	28,06	3,10	13,40	0,762
20–30	16,62	0,601	27,28	2,78	12,02	0,766
30–40	14,78	0,656	26,13	2,56	11,27	0,742
40–50	12,67	0,682	24,88	2,44	11,02	0,701
50–60	11,74	0,716	24,08	2,39	11,05	0,671
60–70	11,08	0,819	23,19	2,35	11,06	0,628
70–80	10,32	0,821	22,74	2,39	11,43	0,593
80–90	9,79	0,785	20,84	2,59	12,43	0,553
90–100	8,98	0,711	22,68	2,49	11,96	0,556

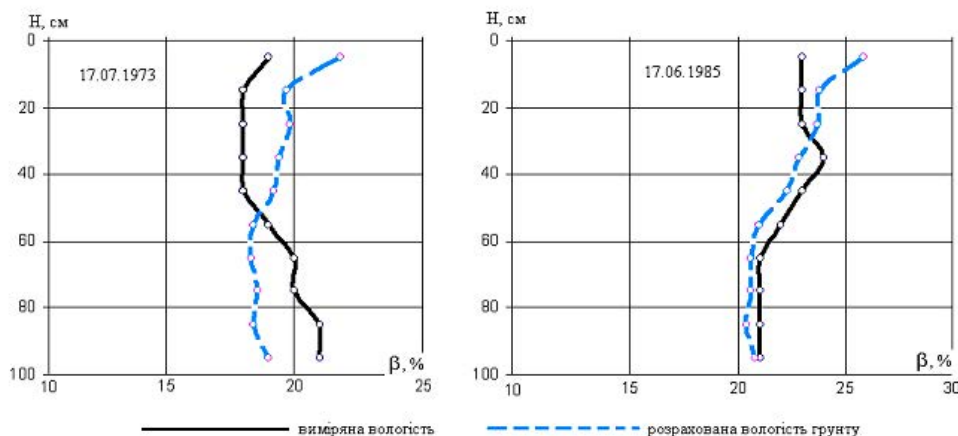


Рис. 3. Приклад розрахунку розподілу вологості ґрунту по глибині на певні дати (дані метеостанції Губиниха)

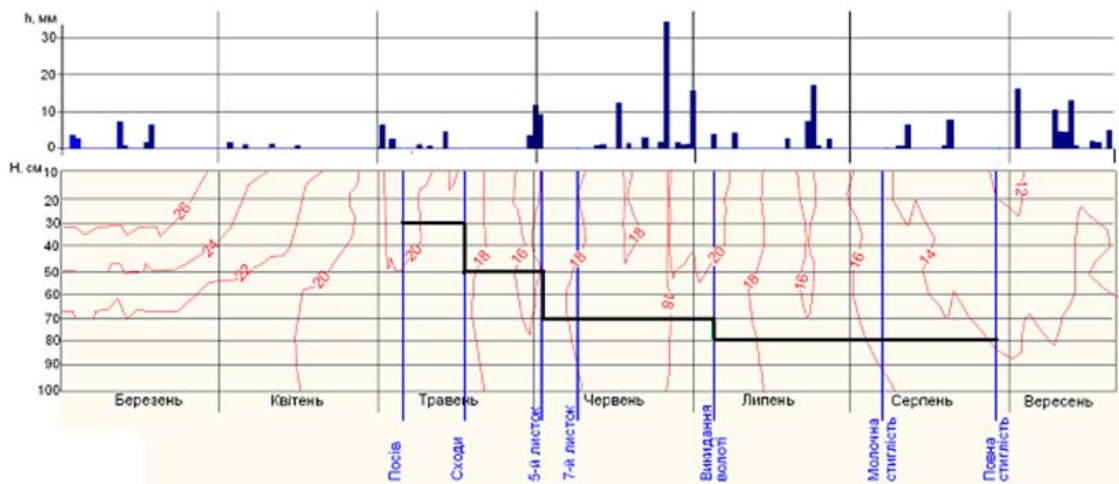


Рис. 4. Графік ходу вологості ґрунту за вегетаційний період у 2007 році під посівами кукурудзи (дані метеостанції Губиниха)

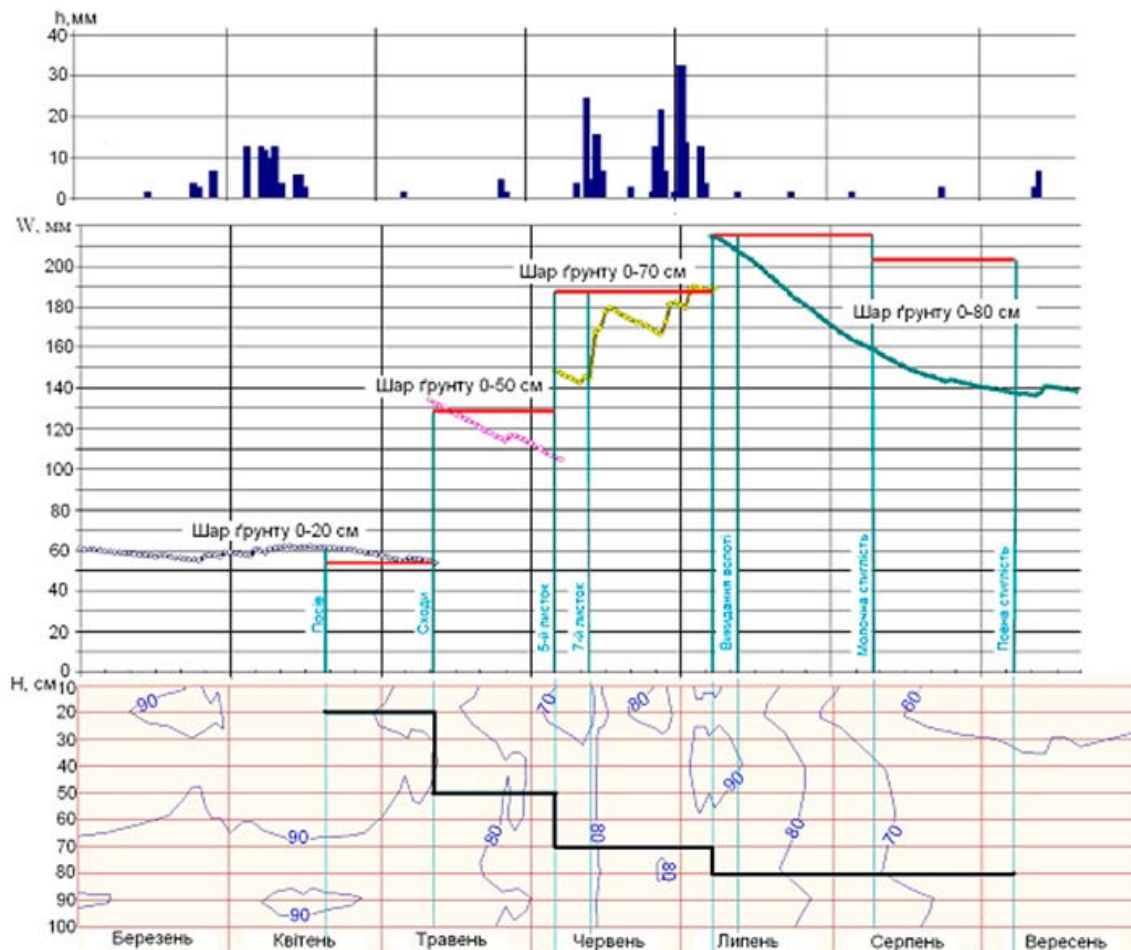


Рис. 5. Графік ходу запасів води (W) у кореневмісному шарі та вологості ґрунту (дані метеостанції Губиниха, 2011 рік)

Рясні дощі другої половини червня–початок липня піднімуть запаси води на короткий час до оптимального рівня. Потім вони розпочнуть поступово знижуватися значно нижче оптимального рівня. Для підтримання запасів води в оптимальних умовах необхідне додаткове зволоження.

Оптимальний рівень в розглянутому кореневмісному шарі ґрунту становить 75% від НВ у період сівби до критичного рівня, 80% у критичний період і 75%-у фазу досягання (рис. 6). Для підтримання такого режиму води необхідно здійснити 5 поливів (8.05; 26.05; 22.06; 15.0 і 30.07) нормою 30 мм.

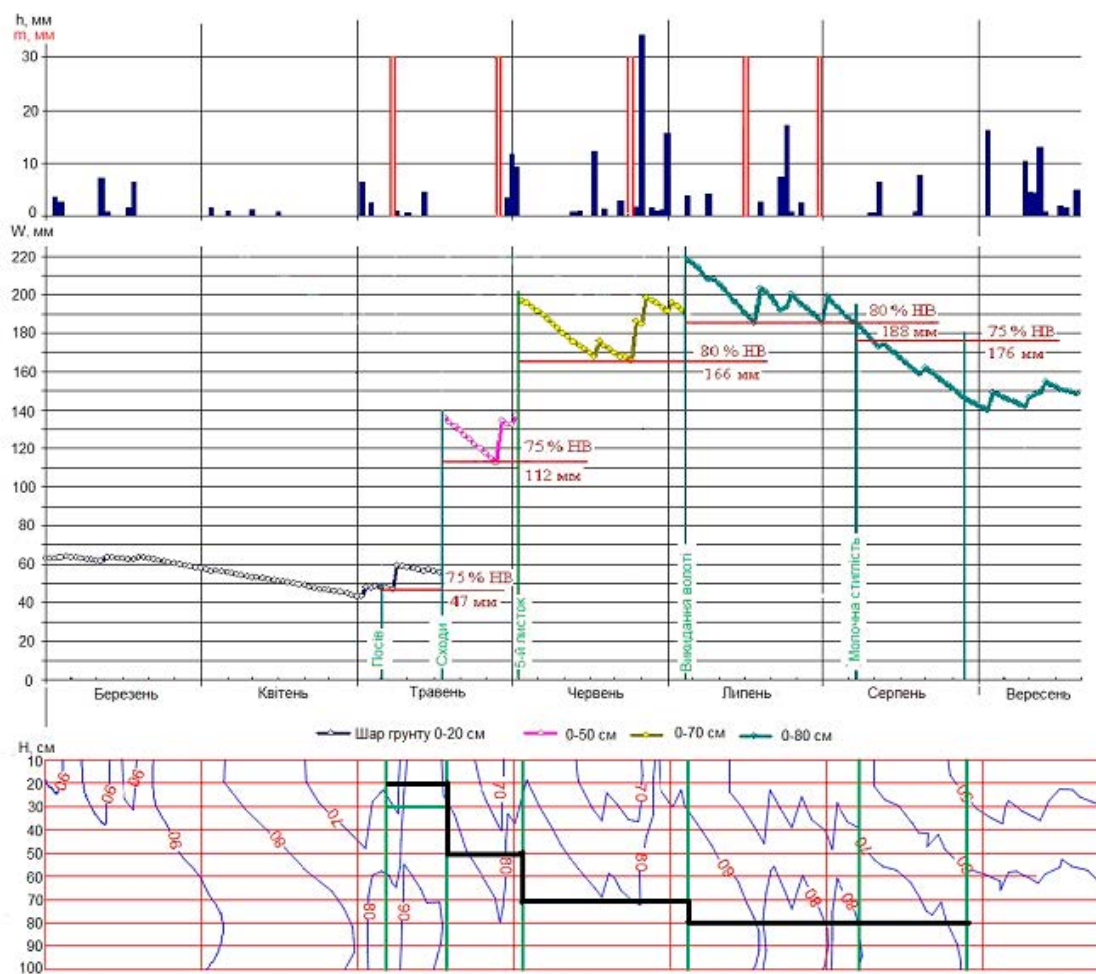


Рис. 6. Графік ходу вологозапасів у кореневмісному шарі ґрунту під посівами кукурудзи і режим зрошення (дані метеостанції Губиниха, 2007 рік)

Обговорення

Розподіл води в ґрунтовому профілі (вимірний чи розрахований) протягом вегетації цікавить багатьох учених. Цей процес дуже складний, і його можна описати, наприклад, диференціальним рівнянням Букінгема-Річардса, яке характеризує рух води в пористому середовищі (Kashenko, 2010). Задане рівняння використовується в багатьох дослідженнях, присвячених питанням гідротехніки, меліорації, екології, оскільки воно описує потік на границі підземних і поверхневих вод (атмосферних опадів, водойм, річок і т. д.), що є надзвичайно важливим при моделюванні міграції різних компонентів. Таке рівняння розглядають і в суто математичних журналах, бо його розв'язок нетривіальний.

Чисельний розв'язок рівняння вологопереносу Річардса піддавався критиці за великі обчислювальні затрати і непередбачуваність, зумовлені відсутністю гарантії, що обчислювальний комплекс отримає розв'язок для конкретних ґрунтових характеристик. Підкреслювалися перебільшена роль капілярних сил і деякою мірою надмірна простота методу. При моделюванні одновимірного вологопереносу метод вимагає розбивки високої дискретності для області, що межує з поверхнею (величина дискретизації повинна бути не більше одного сантиметра). За тривимірного моделювання чисельний розв'язок рівняння Річардса визначається співвідношенням сторін, де відношен-

ня горизонтального і вертикального розмірів осередку моделі в розрахунковій області має бути не більше 7 (Vetrenko, 2014).

Проведена низка досліджень зі спрощення рівняння переносу ґрунтової води з глибиною інтеграції (Parlange et al., 1993), які призводять до стохастичного рівняння, де випаровування пов'язане з накопиченою вологою за допомогою функції нелінійної дифузійності води. З отриманого рівняння функцію дифузії оцінювали з добових вимірів накопиченої води, отриманих на полі з використанням теорії нелінійної фільтрації протягом 100 діб. Порівняння зі щодобовим випаровуванням, вимірним за допомогою чутливого 50-тонного лізиметра, показало, що запропонований метод може бути використаний для визначення функції дифузійності ґрунтової води в масштабі поля в природних умовах, коли застосована вода і випаровування є головними фізичними механізмами керування в гідрологічному режимі.

Аналогічні дослідження були проведені на полях південно-західної Франції (Pargens et al., 2014). У дослідженні використана схема взаємодії між поверхнею, біосферою та атмосферою (ISBA) з дифузійною ґрунтовою водою (з 11 представленими шарами ґрунту).

У сучасних умовах залишаються питання визначення запасів води в ґрунті балансовим способом, де основним і складним компонентом є оцінка евапотранспірації (ЕТ). Методами поліпшення розуміння просторових варіацій застосування ЕТ

та іригації присвячені роботи (Gowda et al., 2008). Дослідження націлені на виявлення компонентів водного балансу в типовому зрошуваному землеробстві, на інтеграцію різних сенсорних технологій у моделі планування іригації та вдосконалення технології датчиків, на інтеграцію обмежень якості води і контроль зрошення.

Розробляються також нові прилади для швидкого визначення вологості ґрунту в полі на основі закономірностей вологості ґрунту від його діелектричної проникності (Dean et al., 1987). Ці датчики вдосконалюються на основі більш чутливих елементів і застосування електронних носіїв інформації. Датчик ємності, що працює на частоті 150 МГц, використовує досягнення в області електронних компонентних технологій, щоб дати стабільний і чутливий зонд для вимірювань на місцях. Датчик був розроблений як частина інтегрованої системи вимірювання вологості ґрунту, що включає й методику встановлення трубки доступу та відповідність у калібруванні.

Електромагнітні або діелектричні методи отримали значне поширення (Stacheder et al., 2009) і використовують переваги високої діелектричної проникності води порівняно зі сухими матеріалами. У роботі представлені чотири нових діелектричних датчики для визначення вмісту вологи в ґрунті (GPR).

Прогресивними методами встановлення ґрунтової вологи є дистанційні методи, засновані на використанні вимірювань ґрунтово-проникаючої радіолокації (Huisman et al., 2001). Для вимірювання вмісту ґрунтової вологи за допомогою GPR використовували випромінювання земної хвилі, які є сигналом, що прямує від джерела до приймальної антени через верхні шари ґрунту. Для оцінки продуктивності GPR, агрегатована рефлектометрія (TDR) і гравіметричні вимірювання вмісту вологи в ґрунті для підтримки вимірювань GPR. Недоліком цих методів є складність тарування, пов'язана з обмеженою наявністю наземних вимірювань. Тому проведені дослідження (Uniyal et al., 2017), які оцінюють просторові та часові закономірності щоденної вологості ґрунту, що імітуються інструментом оцінки ґрунтового випромінювання та вологи (SWAT) для верхнього 30-сантиметрового профілю ґрунту з непрямыми оцінками вологості ґрунту від Landsat за 2016 рік., розрахований на основі індексу нормованої різниці рослин (NDVI) і яскравості (BT) за допомогою зображень Landsat, з яких регресійні моделі підготовлені за допомогою польових вимірювань від рефлектометра Time Domain (TDR) для розрахунку вологості ґрунту.

Дослідження дистанційними методами дають підстави до використання віддаленої зондувальної вологості ґрунту для перевірки гідрологічних результатів моделювання та для оптимізації параметризації ґрунтів, що може перекрити розрив між глобальними, регіональними та польовими дослідженнями у сфері землеробства.

Проведено дослідження напівемпіричних параметрів шорсткості в L-діапазоні мікрохвильової емісії біосфери, які є форвардною моделлю вологості ґрунту (Mialon et al., 2012). У розробці моделей ґрунтової вологи задіяні і дистанційне зондування поверхні землі за допомогою супутників (Das & Paul, 2015).

Дистанційне зондування дає відносно добрі результати для оцінки запасів вологи на великих територіях, де відносне зволоження змінюється в невеликих межах по території й викликається атмосферними опадами. Вимірювання запасів вологи на зрошуваних землях призводить до значних похибок через строкатість зволоження, пов'язану зі зрошенням окремих ділянок різними поливними нормами і строками поливів.

Висновки

Досліджувана методика, на відміну від розглянутих зарубіжних, дає можливість розрахувати вологість ґрунту в різних шарах ґрунту і визначити закономірності її розподілу по глибині з достатньою для практичного використання точністю. За-

стосування диференційних рівнянь не враховує всіх факторів формування ґрунтової вологи, чого потребують початкові умови. Електромагнітні та електроємні датчики обмежуються точками вимірювань. Для уявлення більш реальної інформації необхідно застосовувати велику їх кількість по глибині і площі. До того ж використання непрямої інформації дає похибку тарування. Застосування дистанційних вимірювань різних випромінювань земної поверхні не дають точних відомостей про вологу саме на досліджуваних полях, оскільки на зовнішнє випромінювання впливають прилеглі території, особливо якщо на них є водні об'єкти.

Запропонована методика вологості ґрунту в різних шарах ґрунту дозволяє використовувати стандартні метеорологічні величини, виміряні безпосередньо на досліджуваних територіях. Особливо це стосується атмосферних опадів і поливів. Ця інформація дасть можливість більш точно визначити запаси вологи і розподіл її в кореневмісному шарі ґрунту, призначити більш оптимальні дати сівби сільськогосподарських культур, заходи по догляду за ними, вносити мінеральні добрива, а також планувати поливи для підтримання вологості ґрунту в оптимальних межах для розрахункового шару.

Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення закономірностей формування вологозапасів в різних шарах ґрунту під іншими сільськогосподарськими культурами, та адаптацію розрахункової моделі до умов конкретних господарств.

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Das, K., & Paul, P. K. (2015). Present status of soil moisture estimation by microwave remote sensing. *Cogent Geoscience*, 1(1). doi: [10.1080/23312041.2015.1084669](https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1084669)
- Dean, T. J., Bell, J. P., & Baty, A. J. B. (1987). Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, 93(1–2), 67–78. doi: [10.1016/0022-1694\(87\)90194-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90194-6)
- Docenko, V. I. (1998). Vykorystannja rozrahunkovyh zapasiv g'runtovoi' vology dlja optymizacij' rezhymu zroshennja kukurudzy v umovah Dnipropetrovs'koi' oblasti [Use of calculated soil moisture reserves to optimize the corn irrigation regime in the Dnipropetrovsk region]. *News of Dnipropetrovsk State Agrarian University*, 1–2, 78–82 (in Ukrainian).
- Galik, O., I., & Docenko, V., I. (1997). Ocinka umov zvolozhennja g'runtiv ta optymizacija zroshuvaj'nyh norm osnovnyh sil's'kogospodars'kyh kul'tur Dnipropetrovs'koi' oblasti [Assessment of soil moisture conditions and optimization of irrigation norms of main crops in Dnipropetrovsk region]. *Taurian Scientific Bulletin*, 5, 70–75 (in Ukrainian).
- Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evette, S. R., Howell, T. A., & Tolk, J. A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science*, 26, 223–237.
- Huisman, J. A., Sperl, C., Bouten, W., & Verstraten, J. M. (2001). Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 245(1–4), 48–58. doi: [10.1016/S0022-1694\(01\)00336-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00336-5)
- Kashenko, N. M. (2010). Processy vlagoperenosa v poristyh sredah [Water transfer processes in porous media]. *Bulletin of the Immanuel Kant Russian State University*, 10, 56–58 (in Russian).
- Kovalenko, V. V., Docenko, V. I., Rudakov, L. M., & Bugajova, I. J. (2015). Optymizacija agrogidrometeorologichnogo metodu v zadachah rozrahunku rezhymu g'runtovoi' vology [Optimization of the agrohydrometeorological method in the problems of calculating the soil moisture regime]. *Bulletin of the National*

- University of Water Management and Nature Management, 2. 139–141 (in Ukrainian).
- Kovalenko, V. V., Rudakov, L. M., Docenko, V. I., & Bugajova, I. J. (2014). Vid rozrahunku vologozapasiv do stvorennja geoinformacijnoi' systemy rezhymu g'runtovoi' vology [From the calculation of moisture storage to the creation of a geoinformation system of soil moisture regime]. *News of Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University*, 2. 139–141 (in Ukrainian).
- Lytovchenko, A. F., Docenko, V. I., Rudakov, L. N., & Tkachuk, A. V. (2001). Vybory peryoda nabljudenyj dlja rascheta normy zapasov pochvennoj vlagy pod posevamy sel'skohozjajstvennyh kul'tur v Stepnoj zone Ukrainy [Selection of the observation period for calculating the norm of soil moisture reserves under crops of crops in the Steppe Zone of Ukraine]. *News of Dnipropetrovsk State Agrarian University*, 1, 78–84 (in Ukrainian).
- Lytovchenko, A. F. (2011). Agrogidrometeorologicheskij metod rascheta vlazhnosti pochvy i vodosberegajushhij rezhimov uvlazhnenija oroshaemyh kul'tur v Stepi i Lesostepi Ukrainy: monografija [Agrohydrometeorological method for calculating soil moisture and water-saving moisture regimes of irrigated crops in Steppe and Forest-Steppe of Ukraine: monograph]. Publishing house Svidler A. L., Dnepropetrovsk (in Russian).
- Mialon, A., Wigneron, J.-P., de Rosnay, P., Escorihuela, M. J., & Kerr, Y. H. (2012). Evaluating the L-MEB model from long-term microwave measurements over a rough field, SMOSREX 2006. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), 1458–1467. doi: [10.1109/TGRS.2011.2178421](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2178421)
- Parlange, M. B., Katul, G. G., Folegatti, M. V., & Nielsen, D. R. (1993). Evaporation and the field scale soil water diffusivity function. *Water Resources Research*, 29(4), 1279–1286. doi: [10.1029/93WR00094](https://doi.org/10.1029/93WR00094)
- Parrens, M., Mahfouf, J.-F., Barbu, A., & Calvet, J.-C. (2014). Assimilation of surface soil moisture into a multilayer soil model: design and evaluation at local scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(7), 9645–9688. doi: [10.5194/hessd-10-9645-2013](https://doi.org/10.5194/hessd-10-9645-2013)
- Rode, A. A. (2008). *Osnovy uchenija o pochvennoj vlage: izbrannye trudy* [Fundamentals of soil moisture theory: selected works]. V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Rossel'hozcademija, Moscow (in Russian).
- Shpak, I. S. (1987). Raschet vlagi iz razlichnyh sloev pochvogrunta na isparenije pri oroshenii [Moisture consumption from different layers of soil to evaporation during irrigation]. *Soil Science*, 8, 56–68 (in Russian).
- Stacheder, M., Koeniger, F., & Schuhmann, R. (2009). New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements. *Sensors*, 9(4), 2951–2967. doi: [10.3390/s90402951](https://doi.org/10.3390/s90402951)
- Uniyal, B., Dietrich, J., Vasilakos, C., & Tzoraki, O. (2017). Evaluation of SWAT simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices. *Agricultural Water Management*, 193, 55–70. doi: [10.1016/j.agwat.2017.08.002](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.002)
- Vetrenko, E. A. (2014). Obosnovanie vybora matematicheskoj modeli vlagoperenosa v nenasyshennyh pochvogruntah [Substantiation of the selection of the mathematic model for moisture transfer in the unsaturated soil]. *Agricultural Journal in the Far East Federal District*, 4(32), 21–24 (in Russian).