

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-18>

УДК 004.94 (072):004.2

ДЯЧЕНКО Григорій

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-9105-1951>

[diachenko.g@nmu.one](mailto:diachenko.g@nmu.one)

КРЕМНЬОВ Володимир

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0005-1149-2017>

[kremnov.vo.v@nmu.one](mailto:kremnov.vo.v@nmu.one)

## МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ ҐРУНТУ ПІД ЧАС ВИРОЩУВАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

У теперішній в Україні значної актуальності набули питання, що пов'язані з забезпеченням базових продовольчих потреб населення та підтримання національної економіки. Рослинництво відкритого ґрунту є однією з основних галузей національного сільського господарства та відноситься до переліку стратегічних, адже вносить значний вклад у формування національної продовольчої безпеки, економіки та експортного потенціалу. В свою чергу, ця галузь потребує технологічного переоснащення та програмно-технічної модернізації, в тому числі, завдяки розробці й упровадженню високоефективних інформаційних і комп'ютерних технологій контролю агротехнічних процесів. Основна мета статті полягає в обґрунтуванні підходів до підвищення ефективності агротехнічних процесів вирощування зернових культур за рахунок розробки та дослідження математичної й комп'ютерної моделей процесу комп'ютеризованого предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. Об'єкт дослідження процеси комп'ютерної обробки та аналізу даних щодо динаміки вологи в ґрунті під час вирощування зернових культур. Предмет дослідження методи та моделі побудови комп'ютерних технологій предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. В цій статті отримано та висвітлено наступні науково-практичні результати: запропоновано та алгоритмізовано математичний опис процесу динаміки вологи в різних типах ґрунту з урахуванням специфічних агрокліматичних зон України; методами комп'ютерного експерименту оцінено параметри і характеристики динаміки вологи в різних типах ґрунту за періоди, що дорівнюють одній годині та добі; доведено, що отримані результати можуть бути використані в якості програмно-алгоритмічного та структурно-функціонального базису під час подальших розробок і досліджень з проектування та тестування інтелектуальної комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зрошення зернових культур у різних агрокліматичних зонах України.

Ключові слова: вологість, зернові культури, математична модель, комп'ютерний експеримент, контроль.

DIACHENKO Grygorii, KREMNOV Volodymyr

Dnipro University of Technology

## MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF THE PROCESS OF COMPUTERISED PREDICTIVE CONTROL OF SOIL IRRIGATION MODES DURING GRAIN CROPS CULTIVATION

Nowadays, issues related to ensuring the basic food needs of the population and supporting the national economy have become of significant relevance in Ukraine. Open-air crop production is one of the key areas of national agriculture and is classified as a strategic sector, since it significantly contributes to national food security, economy and export potential. In turn, this production area requires technological re-equipment, as well as software and hardware modernisation, including through the development and implementation of highly efficient information and computer technologies for monitoring agricultural processes. The aim of the article is to substantiate approaches to improving the efficiency of agrotechnical processes of growing grain crops by developing and studying mathematical and computer models of the process of computerised predictive control of soil irrigation modes when cultivating grain crops. The object of the research is the processes of computer processing and analysis of data on the dynamics of soil moisture when cultivating grain crops. The subject of the research is methods and models of creating computer technologies for predictive control of soil irrigation modes when cultivating grain crops. The following scientific and practical results have been obtained and presented in the article: a mathematical description of the process of moisture dynamics in different types of soil has been proposed and algorithmised, taking into account the specific agroclimatic zones of Ukraine; the parameters and characteristics of moisture dynamics in different types of soil for periods equal to one hour and one day have been estimated by computer experiment; it has been proved that the obtained results can be used as a software and algorithmic, as well as a structural and functional basis for further development and research on the design and testing of an intelligent computer technology for predictive control of irrigation modes in different agroclimatic zones of Ukraine.

Keywords: moisture, grain crops, mathematical model, computer experiment, monitoring.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

#### ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Через війну в Україні значної актуальності та важливості набувають питання, що пов'язані з забезпеченням базових продовольчих потреб населення та підтримання національної економіки. Сільське господарство (с/г), а саме, рослинництво відкритого ґрунту, є галуззю, що відноситься до переліку

стратегічних, адже вносить значний вклад у формування національної економіки та експортного потенціалу. В той самий час земельні ресурси є обмеженими для цілей масштабування під час вирощування зернових культур, отже зростає потреба в розробці та впровадженні високоефективних підходів до забезпечення необхідних показників обсягів і якості виробництва с/г продукції рослинництва. В свою чергу, глобальна світова практика країн із розвиненими аграрними технологіями доводить, що використання інформаційних і комп'ютерних технологій моніторингу й контролю стану посівів і земельних ресурсів обумовлює значний позитивний ефект провадження с/г діяльності рослинництва відкритого ґрунту у коротко- та середньостроковій перспективі.

В Україні стратегічне значення під час формування національної економіки та забезпечення продовольчої безпеки мають такі типи зернових культур: пшениця, ячмінь, кукурудза, жито й просо [1, 2]. Результати графічної інтерпретації апріорних статистичних показників динаміки обсягів вирощування цих зернових культур в різних агрокліматичних зонах України (з 2018 по 2022 рр.) наведено на рис. 1 (2022 р. – остання актуалізація даних).

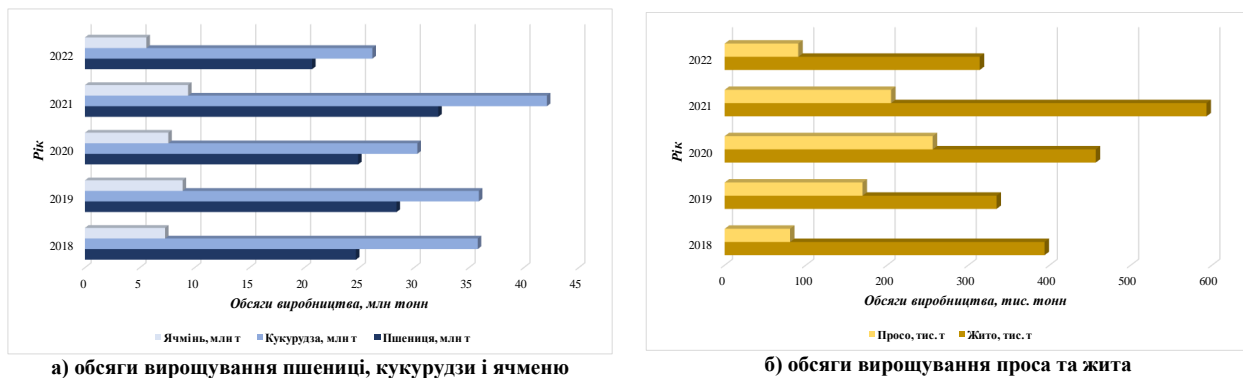


Рис. 1. Графічна інтерпретація статистичних показників вирощування основних зернових культур в Україні з 2018 по 2022 рр.

В результаті аналізу даних, які наведено на рис. 1, встановлено наступне: пшениця (середній обсяг вирощування за період із 2018 по 2022 рр. становить 26,2 млн т), кукурудза (34,1 млн га) і ячмінь (7,8 млн га) вносять основний вклад до загальних обсягів виробництва с/г продукції рослинництва; через повномасштабну війну в Україні обсяги вирощування зазначених с/г культур значно зменшились: як результат порівняння показників за 2022 р. та 2021 р. у відсотках встановлено, що показник зменшення є наступним: просо (–55,6 %), жито (–47,1 %), ячмінь (–40,4 %), кукурудза (–37,8 %) і пшениця (–35,7 %).

Отже, основна мета статті полягає в обґрунтуванні підходів до підвищення ефективності агротехнічних процесів вирощування зернових культур за рахунок розробки та дослідження математичної й комп'ютерної моделей процесу комп'ютеризованого предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. Об'єкт дослідження процесу комп'ютерної обробки та аналізу даних щодо динаміки вологи в ґрунті під час вирощування зернових культур. Предмет дослідження методи та моделі побудови комп'ютерних технологій предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. Таким чином, можна констатувати факт того, що науково-практична задача розробки, дослідження та впровадження високоефективних комп'ютерних і інформаційних технологій агротехнічного призначення є важливою і актуальною в Україні і світі, а також її розв'язання дозволить обґрунтувати техніко-функціональні підходи до раціонального використання земельних та матеріальних, у тому числі, водних ресурсів під час ведення с/г діяльності рослинництва відкритого ґрунту.

### ПІДХОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Процес розробки та подальшого використання комп'ютерної технології інтелектуального контролю режимів зрошення зернових культур потребує синтезу, дослідження та валідації відповідної математичної моделі, що описує динаміку вологи в різних типах ґрунтів на різних глибинах. В свою чергу, основним призначенням цієї моделі є обґрунтування функціонально-алгоритмічного базису програмних компонент досліджуваної комп'ютерної технології. Інформаційно-алгоритмічною основою зазначеної моделі є формалізований опис явища гідрологічного балансу, що ґрунтується на закономірностях динаміки об'ємного вмісту вологи в шарах ґрунту протягом аналізованого періоду часу. Гідрологічний баланс ґрунту обумовлено фізичними процесами надходження (примусове зрошення, підйом ґрунтових вод, опади та ін.) та відтоку (випаровування, поверхневий стік, інфільтрація та ін.) ґрунтової вологи [3, 4], а також біологічними явищами споживання вологи рослинами з ґрунту. На підставі вищенаведеного опису було запропоновано схему гідрологічного балансу ґрунту, як у графічному вигляді наведено на рис. 2.

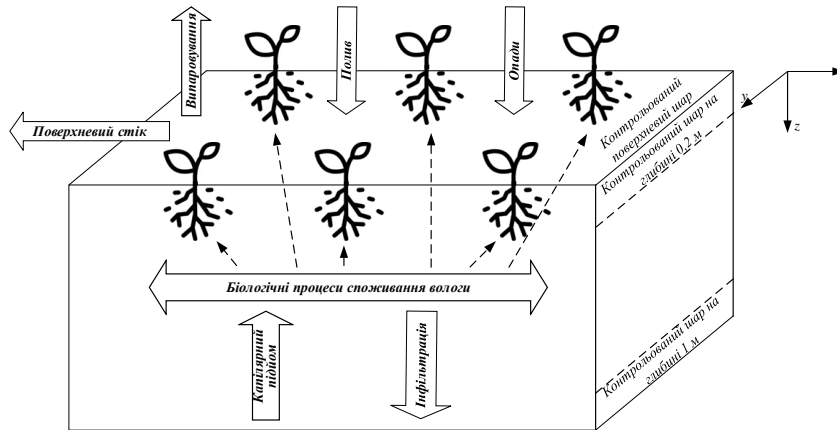


Рис. 2. Графічна інтерпретація процесу гідрологічного балансу ґрунту

Рівняння водного балансу ґрунту в загальному вигляді з урахуванням основних впливних біологічних і фізичних процесів (див. рис. 2) має наступний вигляд [3, 4]:

$$W_{start} + W_{gw} + W_{pr} + W_{irr} = W_{end} + W_{ev} + W_{inf} + W_{dr} + W_{crop}, \quad (1)$$

де  $W_{start}$  – запас вологи в шарі ґрунту, що аналізується, на момент початку детектування;  $W_{gw}$  – волога, яка надходить через процес капілярного підйому підземних ґрунтових вод;  $W_{pr}$  – волога, яка надходить через опади;  $W_{irr}$  – притік вологи через полив;  $W_{end}$  – запас вологи в шарі ґрунту, що аналізується, на момент закінчення детектування;  $W_{ev}$  – волога, яка випаровується;  $W_{inf}$  – волога, яка втрачається через процес інфільтрації ґрунту;  $W_{dr}$  – волога, яка втрачається через поверхневий стік;  $W_{crop}$  – волога, яка споживається рослинами.

Під час досліджень варто прийняти до уваги той факт, що фізико-математичною основою формалізованого опису процесу розповсюдження вологи в аналізованих шарах ґрунту є рівняння Річардса в одновимірній формі (за глибиною), яке визначає закономірності перенесення вологи в аераційній зоні ґрунту з обліком джерел надходження й відтоку води (див. рис. 2) [5–7]:

$$\frac{\partial W_{soil}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(W_{soil}) \frac{\partial \psi(W_{soil})}{\partial z} \right) + S_{in}(z, t) - S_{out}(z, t), \quad (2)$$

де  $W_{soil}$  – вологість ґрунту (об’ємна);  $z$  – аналізована координата (глибина);  $t$  – час;  $K(W_{soil})$  – гідрравлічна провідність ґрунту;  $\psi(W_{soil})$  – потенціал ґрунтової вологи;  $S_{in}$  – функція джерел надходження вологи;  $S_{out}$  – функція джерел відтоку (споживання та випаровування) вологи.

Гідрравлічна провідність ґрунту, яка входить до формули (2), з обліком масштабованої області застосування від максимальної гігроскопічності до повного насичення ґрунту водою обчислюється за такою формулою [7]:

$$K(W_{soil}) = K_f \left( \frac{W_{soil} - W_{max}}{m - W_{max}} \right)^5, \quad (3)$$

де  $K(W_{soil})$  – гідрравлічна провідність ґрунту;  $K_f$  – коефіцієнт, що визначає фільтраційні властивості ґрунту;  $W_{soil}$  – вологість ґрунту;  $W_{max}$  – максимальна гігроскопічність ґрунту;  $m$  – параметр, що відповідає за пористість ґрунту.

Потенціал вологи в ґрунті  $\psi(W_{soil})$  може змінюватись у значному динамічному діапазоні, який обумовлено поточною вологістю ґрунту й типом ґрунту: від значно негативного (-1500 кПа – для посушливих умов) до позитивного потенціалу (+10 кПа – для ґрунтів, які значно перенасичено вологою) [8, 9].

З урахуванням зазначеного вище розв’язання рівняння (2) виконано методами комп’ютерного моделювання на основі чисельного інтегрування в онлайн-середовищі Jupyter Notebook із використанням розробленої програми мовою Python. Під час розв’язання диференційного рівняння (2) враховано чисельні характеристики, умови та обмеження, які зазначено в табл. 1.

Таблиця 1.

Характеристики, параметри, умови та обмеження під час комп'ютерного моделювання динаміки вологи в ґрунті

Враховані характеристики, параметри, умови та обмеження	Прийняті значення
Шари ґрунту, що аналізуються	Координата глибини ( $z$ ) варіюється від 0 м до 1 м з кроком 0,01 м.
Період часу аналізу	Параметр $t$ (час) варіюється в діапазоні від 0 год. до 1 год. з кроком 1 хв.
Початкові умови	Дискретизований діапазон значень об'ємної вологи $W_{soil}(z,0)$ варіюється від 50 % до 100 % з кроком 10 %.
Граничні умови	На верхній межі (поверхневий шар ґрунту $z=0$ м): дискретизований діапазон даних від 50 % до 100 %; на нижній межі (кореневий шар ґрунту $z=1$ м): в початковий момент часу вологість дорівнює 0 %.
Джерела надходження вологи до ґрунту	Полив, капілярний підйом вологи та опади. Враховується через чисельні значення граничних і початкових умов: $S_m(t,z)=0$ .
Джерела втрат вологи з ґрунту	Випаровування в умовах вологості, напівпосушливої й посушливої зон, відповідно рівні: 0,08 мм/год; 0,16 мм/год та 0,32 мм/год [10].
Провідність ґрунту (гідравлічна)	Обчислюється за формулою (3) з обліком різних типів ґрунту: 8,1 мм/год. (чорнозем потужний), 10,8 мм/год. (чорнозем звичайний) та 12,6 мм/год. (чорнозем південний) [11] з показником пористості аерації для різного гранулометричного складу (осереднено дорівнює 0,3) [12].
Потенціал вологи в ґрунті	Варіюється в динамічному діапазоні від 0 до -100 кПа.

Таким чином, математичний опис динаміки об'ємної вологи ґрунту на основі рівнянь (1)–(3) та прийняті умови й обмеження (див. табл. 1) дозволили провести серію комп'ютерних експериментів із обґрунтування вимог до комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зрошення зернових культур.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані методами комп'ютерного моделювання результати розв'язання диференційного рівняння (2) щодо аналізу динаміки вологи в ґрунті за період часу 1 год. з урахування прийнятих чисельних параметрів, обмежень і умов, а також визначених агрокліматичних зон і типів ґрунту (див. табл. 1) наведено на рис. 3–5.

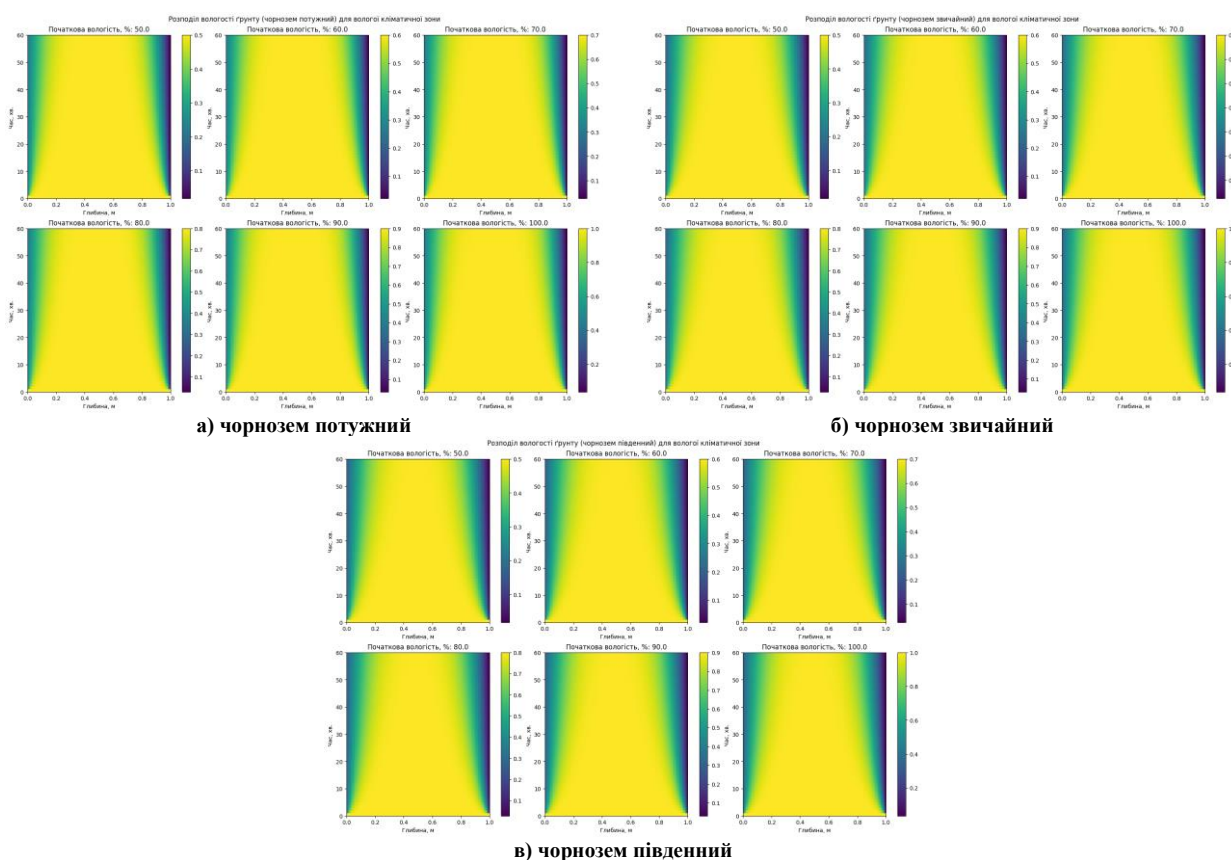


Рис. 3. Графічна інтерпретація розповсюдження вологи в ґрунті в умовах вологості агрокліматичної зони за годину

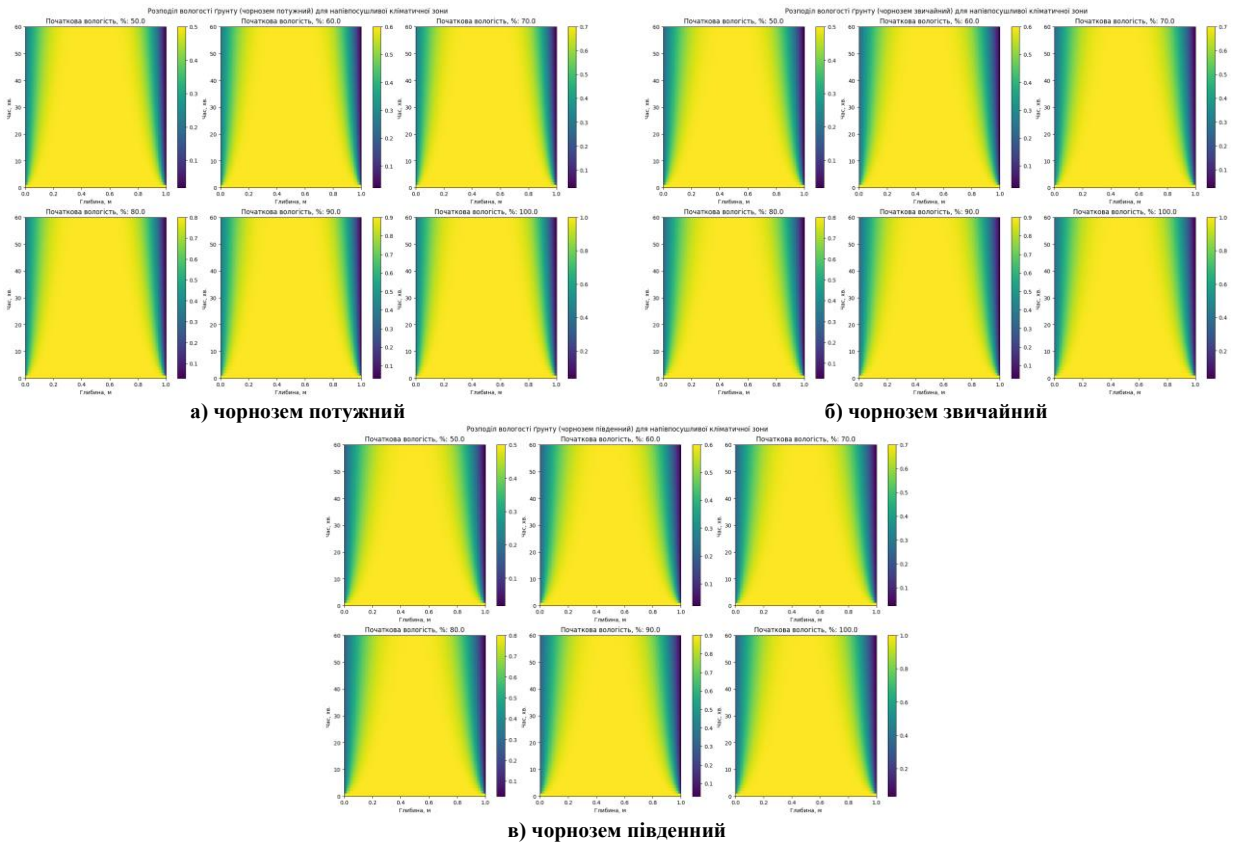


Рис. 4. Графічна інтерпретація розповсюдження вологи в ґрунті в умовах напівпосушливої агрокліматичної зони за годину

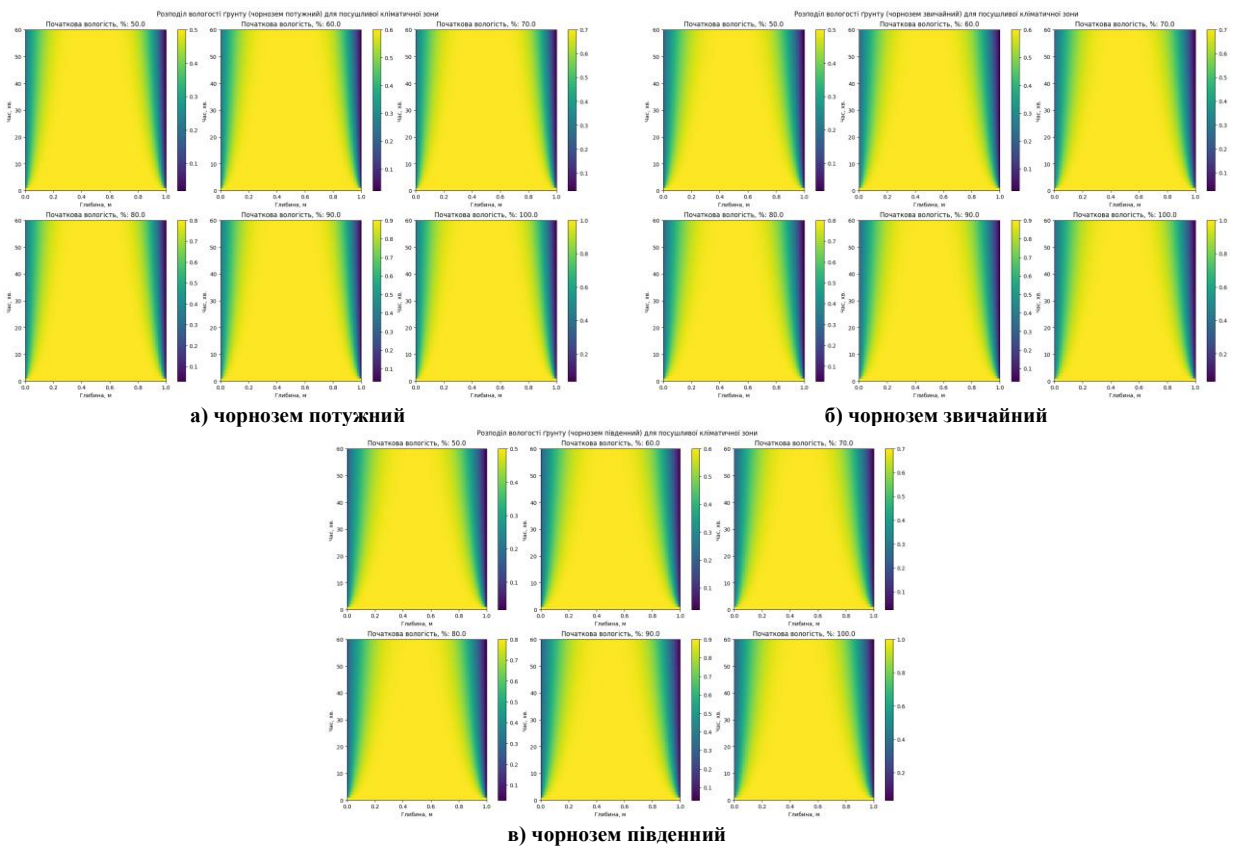


Рис. 5. Графічна інтерпретація розповсюдження вологи в ґрунті в умовах посушливої агрокліматичної зони за годину

Отримані результати досліджень (див. рис. 3–5) дозволили оцінити якісні та кількісні показники процесу розповсюдження ґрунтової вологи в залежності від аналізованого шару на короткотривалому (1

год.) проміжку часу: для чорнозему потужного значення об'ємної вологості, яке було встановлено в початковий момент аналізу на поверхневому шарі, через годину спостерігається на глибині від 0,17 м до 0,83 м для всіх агрокліматичних зон, що аналізуються; для чорнозему звичайного значення об'ємної вологості, яке було встановлено в початковий момент аналізу на поверхневому шарі, через годину спостерігається на глибині від 0,22 м до 0,78 м для всіх агрокліматичних зон, що аналізуються; для чорнозему південного значення об'ємної вологості, яке було встановлено в початковий момент аналізу на поверхневому шарі, через годину спостерігається на глибині від 0,26 м до 0,74 м для всіх агрокліматичних зон, що аналізуються.

Варто зазначити, що отримані результати досліджень (див. рис. 3–5) не дозволили проаналізувати вплив процесів споживання та відтоку ґрунтової вологи через недостатній проміжок часу аналізу. Таким чином, авторами було встановлено необхідність проведення додаткових комп'ютерних експериментів для масштабованого періоду часу, рівного одній добі. Отримані графічні результати комп'ютерного експерименту наведено на рис. 6–8.

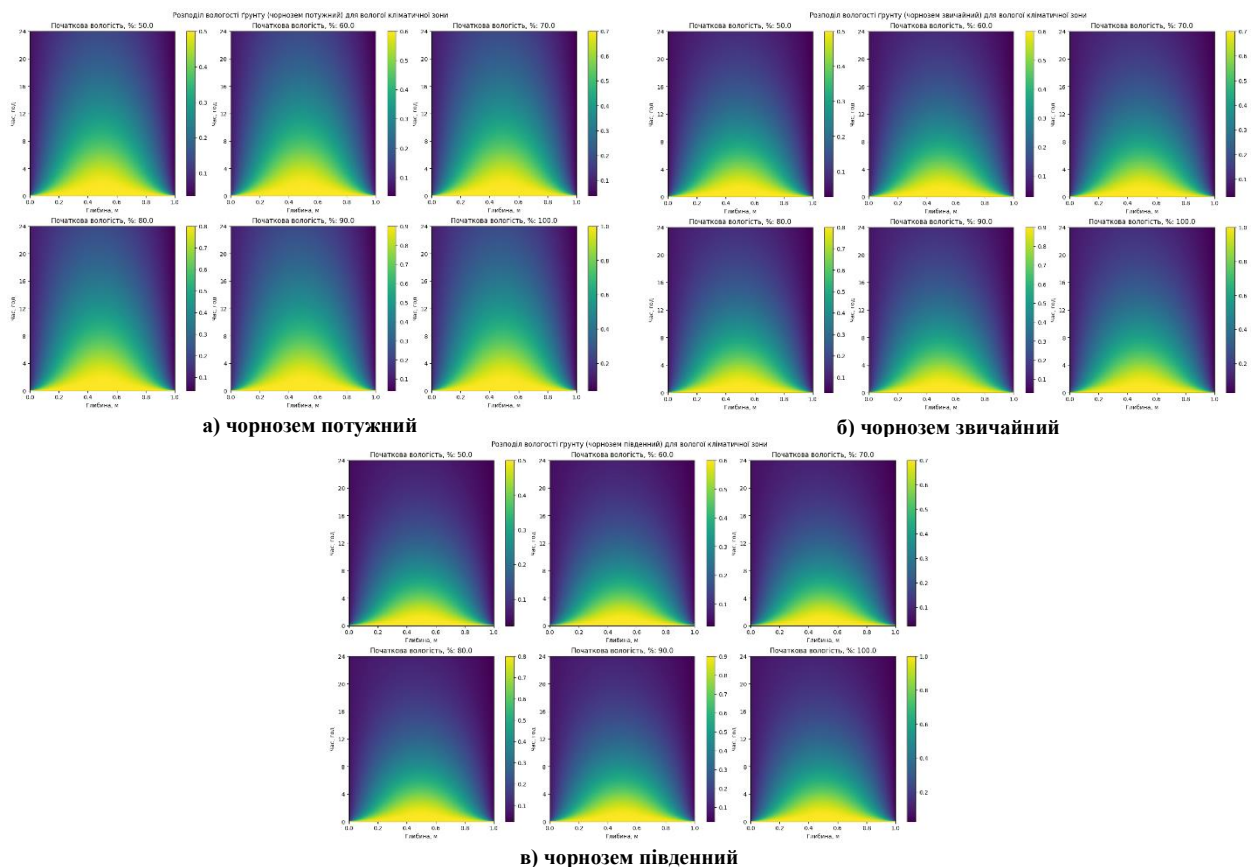
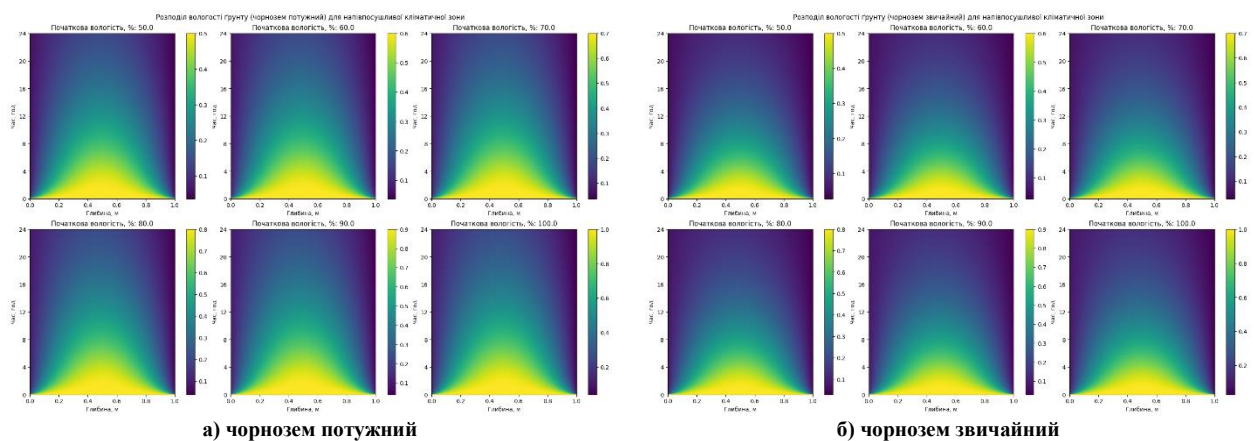


Рис. 6. Графічна інтерпретація розповсюдження вологи в ґрунті в умовах вологій агрокліматичної зони за добу





в якості функціонально-алгоритмічного базису під час подальших перспективних досліджень із розробки, проєктування та валідації програмних компонент комп'ютерної інтелектуальної технології предикативного контролю режимів зрошення зернових культур.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

На основі проведених досліджень в цій статті було досягнуто її основу мету, а саме, розроблено та валідовано математичну та комп'ютерну моделі процесу комп'ютеризованого предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур у агрокліматичних умовах України. Основні кількісні та якісні результати розробки та досліджень статті полягають у наступному:

1. Запропоновано та алгоритмізовано математичний опис процесу динаміки вологи в різних типах ґрунту з урахуванням специфічних агрокліматичних зон України, у яких може бути використана інтелектуальна комп'ютерна технологія предикативного контролю режимів зволоження. Одержані результати досліджень дозволили оцінити характеристики та параметру процесу розповсюдження вологи за шарами ґрунту в часовому діапазоні, що дорівнює одній годині, а саме: для чорнозему потужного значення об'ємної вологості, яке було встановлено в початковий момент аналізу на поверхневому шарі, через годину спостерігається на глибині від 0,17 м до 0,83 м для всіх агрокліматичних зон, що аналізувалися; для чорнозему звичайного значення об'ємної вологості, яке було встановлено в початковий момент аналізу на поверхневому шарі, через годину спостерігається на глибині від 0,22 м до 0,78 м для всіх агрокліматичних зон, що аналізувалися; для чорнозему південного значення об'ємної вологості, яке було встановлено в початковий момент аналізу на поверхневому шарі, через годину спостерігається на глибині від 0,26 м до 0,74 м для всіх агрокліматичних зон, що аналізувалися.

2. Методами комп'ютерного експерименту оцінено параметри й характеристики процесу добової динаміки вологи в різних типах ґрунту, що дозволило обґрунтувати необхідність врахування факторів агрокліматичної зони вирощування зернових культур та типу ґрунту, а саме: граничне значення об'ємної вологості для чорнозему потужного як функції початкової вологості поверхневого шару ґрунту (варіюється від 50 % до 100 %) детектується на глибині 0,5 м через 3,5–4,0 год. для вологої агрокліматичної зони й через 2,5–3,0 год. для посушливої та напівпосушливої агрокліматичних зон; граничне значення об'ємної вологості для чорнозему звичайного як функції початкової вологості поверхневого шару ґрунту (варіюється від 50 % до 100 %) детектується на глибині 0,5 м через 2,0–2,5 год. для всіх аналізованих агрокліматичних зон; граничне значення об'ємної вологості для чорнозему південного як функції початкової вологості поверхневого шару ґрунту (варіюється від 50 % до 100 %) детектується на глибині 0,5 м через 2,0 год. для вологої агрокліматичної зони й через 1,5–2,0 год. для посушливої та напівпосушливої агрокліматичних зон.

3. Отримані результати математичного та комп'ютерного моделювання довели, що вони можуть бути використані в якості програмно-алгоритмічного та структурно-функціонального базису під час подальших розробок і досліджень з проєктування та тестування інтелектуальної комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зрошення зернових культур у різних агрокліматичних зонах України.

### ВПРОВАДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження статті виконані в рамках науково-дослідної теми «Розвиток програмно-апаратного забезпечення інтелектуальних технологій для сталого вирощування сільськогосподарських культур у воєнний та повоєнний час» (номер держреєстрації 0124U000289).

### Література

1. FAOSTAT: Food and agriculture organization of the united nations. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (дата звернення 05.06.2024).

2. АГРОСЕПМАШ: Зернові культури – основні види, популярні сорти та умови вирощування. URL: <https://agrosepmash.ua/uk/zemovi-kulturi-osnovni-vidi-populyarni-sorti-ta-umovi-viroshhuvannya/> (дата звернення 05.06.2024).

3. Лозовіцький П.С. Водні та хімічні меліорації ґрунтів. Навчальний посібник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2010. 276 с.

4. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного: Лекція. Водні властивості та водний режим ґрунту. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/rosl/wp-content/uploads/sites/20/lekcija-9.vodni-vlastyvoli-ta-vodnyj-rezhym-hruntu.pdf> (дата звернення 25.07.2024).

5. Tracy F.T. Analytical and Numerical Solutions of Richards' Equation with Discussions on Relative Hydraulic Conductivity. *Hydraulic Conductivity – Issues, Determination and Applications*. InTech, 2011. P. 203–222.

6. Колесников В.А., Ляшко С.І. Стійкість розв'язків рівняння Річардса–Клюта. *Доповіді Національної академії наук України*. 2023. № 6. С. 12–18.

7. Солоня О.В., Ковбаса В.П. Обґрунтування параметрів робочих органів для укладання



внутрішньогрунтових зрошувачів: монографія. Вінниця, 2020. 155 с.

8. Brady N.C., Weil R.R. *The Nature and Properties of Soils: 14<sup>th</sup> edition*. Columbus: Pearson Education, 2008. 965 p.

9. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: FAO, 1998. 300 p.

10. EOS DATA ANALYTICS: Евапотранспірація як процес та методи її вимірювання. URL: <https://eos.com/uk/blog/evapotranspiratsiia/> (дата звернення 31.07.2024).

11. Карти України: Фільтрація ґрунтів. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/soil-6.html> (дата звернення 31.07.2024).

12. Велика Українська Енциклопедія: Аерація ґрунту. URL: [https://vue.gov.ua/Аерація\\_ґрунту](https://vue.gov.ua/Аерація_ґрунту) (дата звернення 31.07.2024).

### References

1. FAOSTAT: Food and agriculture organization of the united nations. Retrieved from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

2. AGROSEPMASH: Cereals - main types, popular varieties and growing conditions. Retrieved from: <https://agrosepmash.ua/uk/zernovi-kulturi-osnovni-vidi-populyarni-sorti-ta-umovi-viroshhuvannya/> [in Ukrainian].

3. Lozovitskyi, P.S. (2010). *Vodni ta khimichni melioratsii ґруntiv. Navchalnyi posibnyk [Water and chemical soil reclamation. Textbook]*. Kyiv. 276 p.

4. Tavriiskiy derzhavnyi ahrotekhnolohichnyi universytet imeni Dmytra Motornoho: Lektsiia. *Vodni vlastyvoli ta vodnyi rezhym ґруntu [Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University: Lecture. Water properties and water regime of soil]*. Retrieved from: <http://www.tsatu.edu.ua/ros/ wp-content/uploads/sites/20/lekcija-9.vodni-vlastyvoli-ta-vodnyj-rezhym-hruntu.pdf> [in Ukrainian].

5. Tracy, F.T. (2011). Analytical and Numerical Solutions of Richards' Equation with Discussions on Relative Hydraulic Conductivity. *Hydraulic Conductivity – Issues, Determination and Applications*, 203–222.

6. Kolesnykov, V.A., & Liashko, S.I. (2023). Stійkist rozviazkiv rivniannia Richardsa–Kliuta [Stability of solutions to the Richards-Kluyt equation]. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 6, 12–18.

7. Solona, O.V., & Kovbasa, V.P. (2020) *Obgruntuvannia parametriv robochykh orhaniv dlia ukladannia vnutrishnogruntovykh zroshuvachiv: monohrafiia [Substantiation of parameters of working bodies for laying in-soil irrigators: monograph]*. Vinnytsia. 155 p.

8. Brady, N.C., & Weil, R.R. (2008). *The Nature and Properties of Soils: 14<sup>th</sup> edition*. Columbus. 965 p.

9. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome. 300 p.

10. EOS DATA ANALYTICS: Евапотранспірація як процес та методи її вимірювання [Evapotranspiration as a process and methods of its measurement]. Retrieved from: <https://eos.com/uk/blog/evapotranspiratsiia/> [in Ukrainian].

11. Karty Ukrainy: Filtratsiia ґруntiv [Maps of Ukraine: Soil filtration]. Retrieved from: <https://geomap.land.kiev.ua/soil-6.html> [in Ukrainian].

12. Velyka Ukrainська Entsyklopediia: Аерація ґрунту [The Great Ukrainian Encyclopedia: Soil aeration]. Retrieved from: [https://vue.gov.ua/Аерація\\_ґрунту](https://vue.gov.ua/Аерація_ґрунту) [in Ukrainian].