

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ВОДНИХ ПРОБЛЕМ І МЕЛІОРАЦІЇ

ISSN 2616-5562 (Online)

ISSN 2616-5643 (Print)

# МЕЛІОРАЦІЯ І ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО

*№ 1 • 2022*

журнал

*(випуск 115)*

Київ  
2022

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201>

**Засновник** – Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України. Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 24001-13841Р.

Журнал включено до «Переліку наукових фахових видань України» (категорія «Б») за спеціальностями: 201 – Агронімія, 208 – Агроінженерія, 101 – Екологія, 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології на підставі наказів Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. та № 320 від 07.04.2022 р.

У журналі відображено результати теоретичних та експериментальних досліджень із пріоритетних напрямів: агроресурси, водні ресурси, зрошення, осушення, гідрологія, екологія, гідротехніка, агроінженерія тощо. Журнал розрахований та буде корисним для науковців, фахівців водного та сільського господарства. Два видання журналу за рік публікують оригінальні наукові статті, а також огляди, пов'язані з профілем журналу.

Журнал включено до міжнародних та національних інформаційних та наукометричних баз, репозитаріїв і пошукових систем:

*The International System  
for Agricultural Science  
and Technology (FAO)*



*DOAJ (Directory of Open  
Access Journals)*



*Open Ukrainian Citation  
Index (OUCI) (Ukraine)*



*Research Bib Journal  
Database (Японія)*



*CrossRef  
(США)*



*CIARD RING  
(Італія)*



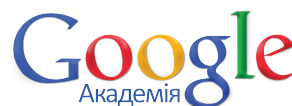
*BASE – Bielefeld  
Academic Search Engine  
(Німеччина)*



*Національна бібліотека України  
ім. В.І. Вернадського*



*Google Scholar (США)*



Пристатейний список літератури продубльовано відповідно до вимог міжнародних систем транслітерації (зокрема наукометричної бази SCOPUS)

**Рекомендовано до друку вченою радою Інституту водних проблем і меліорації НААН 17 червня 2022 року (протокол № 6).**

**Адреса редакції:**

Інститут водних проблем і меліорації НААН  
вул. Васильківська, 37, Київ, 03022  
Тел. (044) 257-40-30, 067 791 67 11  
<http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg>

ISSN 2616-5562 (Online)  
ISSN 2616-5643 (Print)

© Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2022

JOURNAL  
“LAND RECLAMATION AND WATER MANAGEMENT”

№ 1 • 2022

«МЕЛІОРАЦІЯ І ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО»

**EDITORIAL BOARD:**

**M. ROMASHCHENKO**, Doctor of Engineering Sciences, Prof, Academician of NAAS (*Editor-in-Chief*)

**T. TROSHYNA, N. LOGUNOVA, K. SHATKOVSKA, O. VOITOVYCH** (*Executive Editors*)

**TECHNICAL SCIENCES**

(192 – Construction and civil engineering,  
194 – Hydraulic engineering, water engineering  
and water technologies):

**B. FAYBISHENKO**,  
*Doctor of Engineering Sciences, Prof. (USA)*

**V. ADAMCHUK**,  
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.,  
Academician of NAAS of Ukraine*

**V. BULGAKOV**,  
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.  
Academician of NAAS of Ukraine*

**A. ROKOCHYNSKIY**,  
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.*

**D. CHARNYI**,  
*Doctor of Engineering Sciences*

**V. KOVALCHUK**,  
*Doctor of Engineering Sciences*

**V. BOHAIENKO**,  
*Ph.D. in Engineering Sciences*

**P. KOVALCHUK**,  
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.*

**P. KOVALENKO**,  
*Doctor of Engineering Sciences, Prof., Academician of  
NAAS, RAS (Russia) and IAA Georgofili (Italy)*

**V. KRAVCHUK**,  
*Doctor of Engineering Sc.s, Prof.,  
Academician of NAAS of Ukraine*

**Y. MYKHAILOV**,  
*Doctor of Engineering Sciences*

**V. POPOV**,  
*Doctor of Engineering Sciences*

**P. KHORUZHYI**,  
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.*

**V. VYSHNEVSKIY**,  
*Doctor of Science in Geography, Prof.*

**M. YATSIUK**,  
*Ph.D. in Geography*

**O. MUZYKA**,  
*Ph.D. in Engineering Sciences*

**S. SHEVCHUK**,  
*Ph.D. in Engineering Sciences*

**AGRICULTURAL SCIENCES**

(201 – Agronomy, 208 – Agroengineering,  
101 – Ecology):

**B. SCHULTZ**,  
*Dr. habil., Prof. (The Netherlands)*

**R. ISLAM**,  
*Ph.D. (USA)*

**V. USHKARENKO**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,  
Academician of NAAS of Ukraine*

**O. TARARIKO**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,  
Academician of NAAS of Ukraine*

**S. BALIUK**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,  
Academician of NAAS of Ukraine*

**V. PICHURA**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.*

**V. MOSHYNSKIY**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.*

**O. TONKHA**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.*

**A. SHATKOVSKIY**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,  
Corresponding Member of NAAS of Ukraine*

**V. VERGUNOV**,  
*Doctor of Agricultural Sciences,  
Prof., Academician of NAAS of Ukraine*

**Y. TARARIKO**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,  
Academician of NAAS of Ukraine*

**I. SLIUSAR**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,  
Corresponding Member of NAAS of Ukraine*

**O. ZHOVTONOG**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.*

**V. VASIUTA**,  
*Doctor of Agricultural Sciences*

**M. MALYARCHUK**,  
*Doctor of Agricultural Sciences*

**L. SHAWN**,  
*Ph.D. (USA)*

**S. RETMAN**,  
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.*

KYIV • 2022

ЖУРНАЛ  
«МЕЛІОРАЦІЯ І ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО»

№ 1 • 2022

“LAND RECLAMATION AND WATER MANAGEMENT”

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

**М.І. РОМАШЕНКО**, д.т.н., проф., акад. НААН (*головний редактор*)  
**Т.І. ТРОШИНА, Н.В. ЛОГУНОВА, К.Б. ШАТКОВСЬКА, О.П. ВОЙТОВИЧ** (*виконавчі редактори*)

**ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

(192 – Будівництво та цивільна інженерія,  
194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія  
та водні технології):

**Б.О. ФАЙБИШЕНКО**,  
д. т. н., професор (США)

**В.В. АДАМЧУК**,  
д. т. н., професор, академік НААН

**В.М. БУЛГАКОВ**,  
д. т. н., професор, академік НААН

**А.М. РОКОЧИНСЬКИЙ**,  
д. т. н., професор

**Д.В. ЧАРНИЙ**,  
д. т. н., с.н.с.

**В.П. КОВАЛЬЧУК**,  
д. т. н., с.н.с.

**В.О. БОГАСНКО**,  
к. т. н.

**П.І. КОВАЛЬЧУК**,  
д. т. н., професор

**П.І. КОВАЛЕНКО**,  
д. т. н., професор, академік НААН,  
член РАН, член IAA Geographili

**В.І. КРАВЧУК**,  
д. т. н., професор, академік НААН

**Ю.О. МИХАЙЛОВ**,  
д. т. н., с.н.с.

**В.М. ПОПОВ**,  
д. т. н., с.н.с.

**П.Д. ХОРУЖИЙ**,  
д. т. н., професор

**В.І. ВИШНЕВСЬКИЙ**,  
д. геогр. н., професор

**М.В. ЯЦЮК**,  
к. геогр. н.

**О.П. МУЗИКА**,  
к. т. н., с.н.с.

**С.А. ШЕВЧУК**,  
к. т. н., с.н.с.

**СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ НАУКИ**

(201 – Агрономія, 208 – Агроінженерія,  
101 – Екологія):

**Б. ШУЛЬЦ**,  
д.н., професор (Нідерланди)

**Р. ІСЛАМ**,  
Ph. D. (США)

**В.О. УШКАРЕНКО**,  
д. с.-г. н., професор, академік НААН

**О.Г. ТАРАРІКО**,  
д. с.-г. н., професор, академік НААН

**С.А. БАЛЮК**,  
д. с.-г. н., професор, академік НААН

**В.І. ПІЧУРА**,  
д. с.-г. н., професор

**В.С. МОШИНСЬКИЙ**,  
д. с.-г. н., професор

**О.Л. ТОНХА**,  
д. с.-г. н., професор

**А.П. ШАТКОВСЬКИЙ**,  
д. с.-г. н., професор, чл.-кор. НААН

**В.А. ВЕРГУНОВ**,  
д. с.-г. н., професор, академік НААН

**Ю.О. ТАРАРІКО**,  
д. с.-г. н., професор, академік НААН

**І.Т. СЛЮСАР**,  
д. с.-г. н., професор, чл.-кор. НААН

**О.І. ЖОВТОНОГ**,  
д. с.-г. н., професор

**В.В. ВАСЮТА**,  
д. с.-г. н., с.н.с.

**М.П. МАЛЯРЧУК**,  
д. с.-г. н., с.н.с.

**Л. ШОВН**,  
Ph. D. (США)

**С. В. РЕТЬМАН**,  
д. с.-г. н., професор

КИЇВ • 2022

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-328>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/328>

УДК 631.675

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ПОЛИВАМИ ПРИ ЗРОШЕННІ

**М.І. Ромащенко<sup>1</sup>, докт. техн. наук, В.О. Богаєнко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, А.П. Шатковський<sup>3</sup>, докт. с.-г. наук, Т.В. Матяш<sup>4</sup>, канд. техн. наук, С.С. Коломієць<sup>5</sup>, канд. с.-г. наук, С.А. Шевчук<sup>6</sup>, канд. техн. наук, Ю.Ю. Даниленко<sup>7</sup>, канд. техн. наук, А.С. Сардак<sup>8</sup>**

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

<sup>2</sup> Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-3317-9022>; e-mail: [sevab@ukr.net](mailto:sevab@ukr.net)

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-4366-0397>; e-mail: [andriy-1804@ukr.net](mailto:andriy-1804@ukr.net)

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-1225-086X>; e-mail: [t.v.matiash@gmail.com](mailto:t.v.matiash@gmail.com)

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-4329-4382>; e-mail: [kss2006@ukr.net](mailto:kss2006@ukr.net)

<sup>6</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-5844-4980>; e-mail: [sergey\\_shevchuk@ukr.net](mailto:sergey_shevchuk@ukr.net)

<sup>7</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-6778-5039>; e-mail: [iuliia.danylenko@gmail.com](mailto:iuliia.danylenko@gmail.com)

<sup>8</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0540-9492>; e-mail: [anastasiabilobrova1993@gmail.com](mailto:anastasiabilobrova1993@gmail.com)

**Анотація.** Викладено концептуальні засади управління поливами при зрошенні з використанням систем підтримки прийняття рішень. На основі аналізу та досліджень закордонних та вітчизняних авторів доведено, що ефективність управління поливами визначальною мірою залежить від методологічних підходів, які використовують для визначення строків і норм поливу в різноманітних системах підтримки прийняття рішень. Показано, що найповніше потенціал сортів і гібридів різних видів сільськогосподарських культур в умовах зрошення може бути реалізований за умови формування та реалізації режимів зрошення, якими забезпечується підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту у вузькому діапазоні високої вологості (близькому до НВ) протягом всього періоду вегетації. Обґрунтовано, що реалізувати такі режими зрошення можливо лише за умови застосування систем підтримки прийняття рішень із використанням ГІС технологій, в яких поєднані гідрогеологічні моделі розрахунку та прогнозування строків і норм поливу, що базуються на використанні потенціалу ґрунтової вологи як критерію рівня вологозабезпечення та її доступності для рослин і даних дистанційного зондування землі (ДЗЗ). Таке поєднання дає можливість аналізу та розповсюдження даних вимірювань та прогнозування на ділянки, які не охоплено наземними спостереженнями та забезпечує можливість високоефективного еколого-безпечного зрошення за максимального рівня продуктивності поливної води та екологічної безпеки зрошення. Реалізація зазначених принципів у практику управління зрошенням забезпечує отримання врожайності зрошуваних сільськогосподарських культур на рівні 0,85–0,90 від потенціалу сучасних сортів та гібридів за одночасного зниження витрат поливної води на одиницю врожаю, а також мінімізацію або повне виключення втрат поливної води на інфільтрацію, розвитку процесів підтоплення, вторинного осолоцювання та засолення ґрунтів.

**Ключові слова:** зрошення, управління поливами, концептуальні засади, системи підтримки прийняття рішень.

**Актуальність дослідження.** Кліматичні зміни, наявність яких ускладнює умови ведення сільськогосподарського виробництва у більшості регіонів земної кулі, для України є особливо значущим чинником негативного впливу на умови природного вологозабезпечення, адже вони характеризуються найшвидшими для Європи темпами (понад +0,6 °C за останні

10 років) зростання середньорічної температури повітря [1], і, відповідно, посушливості клімату, що унеможлиблює стаке ведення землеробства у більшості регіонів України без застосування зрошення [2].

Як свідчать результати раніше виконаних в Інституті водних проблем і меліорації НААН досліджень [2], уже сьогодні вирощування

сільськогосподарських культур на всій території степової і на більшій частині лісостепової зони ведеться в умовах значного (від 150 до 450–500 мм і більше) дефіциту кліматичного водного балансу, що зумовлює необхідність суттєвого розширення обсягів застосування зрошення як обов'язкового елемента технологій високоефективного та сталого вирощування більшості сільськогосподарських культур.

Вирішення завдання нарощування обсягів зрошення передбачено схваленими Кабінетом Міністрів України «Стратегією зрошення і дренажу в Україні на період до 2030 року» [3] та «Планом заходів із реалізації Стратегії зрошення і дренажу в Україні на період до 2030 р.» [4]. Виконання завдань «Стратегії...» в частині збільшення площ поливу до 2030 року на 1,0–1,2 млн га буде вимагати залучення значних (не менше 4,0–4,5 млрд м<sup>3</sup>) додаткових обсягів води. Зважаючи на те, що зміна клімату негативно впливає не тільки на умови природного вологозабезпечення, а й на стан забезпечення придатними до використання водними ресурсами [5], раціональне та ефективне використання води за зрошення є важливою умовою нарощування потенціалу зрошення і від рівня його розв'язання значною мірою буде залежати можливість та обсяги вирішення завдання розширення площ поливу.

У свою чергу, аналіз тенденцій розвитку зрошення на сучасному етапі свідчить, що головними складовими розв'язання завдання ефективного використання води при зрошенні є застосування водозберігаючих способів зрошення (різновиди краплинної та низько-напірного дощування) та використання систем підтримки прийняття рішень при управлінні поливами [6].

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) у зрошенні є інструментами, які застосовують при управлінні технологічними процесами поливу з метою отримання найвищих урожаїв шляхом регулювання подачі води рослинам відповідно до їх водопотреби протягом усього періоду вегетації. На сучасному етапі розвитку СППР потребують використання ГІС технологій [7], які суттєво полегшують введення даних, інтерпретацію та розуміння результатів.

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** Як свідчить аналіз наявних публікацій [8], в основі СППР у зрошенні зазвичай лежать моделі накопичення біомаси та моделі евапотранспірації. За цього найпоширенішим є підхід, заснований на наявності взаємозв'язку між сезонною транспірацією культур за оптимального вологозабезпечення та їх біомасою [9].

Забезпечення необхідного режиму водоподачі при зрошенні здійснюється із застосуванням різноманітних методів [10–14], серед яких виокремлюють підхід, що базується на оцінюванні стану рослин [14] та підхід, заснований на контролюванні вологозабезпечення кореневого шару ґрунту [10–13].

Відомо, що технологічною основою реалізації необхідного режиму подачі води рослинам є режим зрошення [15]. Саме методологічний рівень формування режиму зрошення буде визначати основні можливості та складові ефективного та еколого-безпечного використання та продуктивність поливної води при управлінні поливами з допомогою СППР.

Результати багаторічних та різнопланових досліджень і розробок з питань формування режимів зрошення та управління поливами, зокрема й з використанням автоматизованих інформаційних, інформаційно-аналітичних та інформаційно-дорадчих систем управління зрошенням, що виконані в Інституті водних проблем і меліорації НААН протягом декількох десятиліть, у тому числі й за участю та безпосередньо авторами цієї статті [16; 17; 18], стали основою формування системного бачення концептуальних засад управління поливами у складі СППР. Їх застосування дозволяє найбільш повно використовувати потенціал сортів та гібридів різноманітних сільськогосподарських культур за мінімальних витрат поливної води на одиницю врожаю і практично повному виключенні втрат води на інфільтрацію, а отже – за мінімальних ризиків розвитку процесів підтоплення та вторинного засолення зрошуваних земель.

**Метою досліджень** є визначення концептуальних засад управління поливами з використанням систем підтримки прийняття рішень для підвищення ефективності та екологічної безпеки зрошення.

**Матеріали і методи досліджень.** Дослідження проведено із використанням інформаційно-аналітичного методу для аналізу результатів з питань обґрунтування режимів зрошення та управління поливами, які висвітлено у вітчизняних та закордонних публікаціях: експериментального обґрунтування діапазону оптимального вологозабезпечення кореневого шару ґрунту, НВ та передполивного порога для різних ґрунтів та видів сільськогосподарських культур, математичного моделювання для прогностичних розрахунків стану вологозабезпечення кореневого шару ґрунту та визначення строків і норм поливу [19]. Величину евапотранспірації визначали [20] розрахунками для конкретних видів сільськогосподарських

культур із використанням моделей Пенмана-Монтейта [21], Штойка [22] та Іванова [23], а також із використанням алгоритму SEBAL [24] при обробці даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Дані ДЗЗ використовували також для оцінювання стану рослин та якості проведення поливів.

#### Результати досліджень та їх обговорення.

В узагальненому вигляді концептуальні засади управління поливами при зрошенні можливо звести до таких положень. Проведення поливів має забезпечувати підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту протягом усього періоду вегетації в оптимальному для росту та розвитку сільськогосподарських культур діапазоні. Під оптимальним розуміється такий рівень вологозабезпечення, за підтримання якого евапотранспірація культур є рівною або близькою до потенційно можливої за конкретних погодних умов [13].

Ця умова може бути означена виразом

$$\frac{E_f}{E_{п.м.}} \leq 1,$$

де  $E_f$  – фактична, а  $E_{п.м.}$  – потенційно можлива евапотранспірація за конкретних погодних умов.

За цього як верхня межа оптимального діапазону вологозабезпечення (ПДВ) кореневого шару ґрунту згідно з результатами абсолютної більшості досліджень приймається найменша вологоємність (НВ) ґрунту [13], а як нижня – так званий передполивний поріг [13], величина якого на відміну від НВ є динамічним показником, що змінюється залежно від виду та фази розвитку зрошуваної сільськогосподарської культури, а також властивостей ґрунту [25].

Саме величина оптимального діапазону вологозабезпечення (ОДВ) кореневого шару ґрунту є показником, який безпосередньо впливає на величину норми поливу, тому підхід до його визначення потребує, на наше переконання, значних уточнень порівняно з класичними підходами [13].

Насамперед, це стосується визначення НВ. Класичні та найбільш поширені методи визначення НВ (методом заливу площадок), за результатами наших досліджень [26], завищують величину НВ, провокуючи тим самим вищий рівень зволоження ґрунтів при поливах і, відповідно, спричиняючи формування в кореневому шарі ґрунту надлишкових запасів легкорухомої вологи, що створює передумови для втрат поливної води на інфільтрацію за межі кореневого шару ґрунту. Тому в ІВПіМ розроблено та апробовано методику лабораторного визначення НВ на монолітах ґрунту в дослідах із визначення основної гідрофізичної характеристики (ОГХ) ґрунтів [27].

Як показали результати визначень НВ з використанням цієї методики, параметри, що встановлюються за критерієм інтенсивності гравітаційного стікання вологи [27], як правило, на декілька відсотків об'єму менші за величини НВ для цих же ґрунтів, що визначені методом заливу площадок (табл. 1).

Тому нами в практиці управління поливами, як верхня межа ОДВ кореневого шару ґрунту рекомендується використовувати величини НВ, що визначають за методикою, яка викладена в [27], і характеризувати їх відповідними значеннями всмоктувального тиску (капілярного потенціалу), а не вологості ґрунту.

#### 1. Співставлення польових і лабораторних визначень найменшої вологомісткості (НВ) (с. Небелиця Макарівського району Київської області)

Ділянка	Інтервал, м	Літологія	НВ, % об'єму		Різниця значень НВ, %
			після наливу	лабораторні	
Точка 1	0,05–0,20	суглинки легкі	33,38	27,53	-5,63
	0,25–0,40		30,48	30,66	+0,18
	0,65–0,80		28,87	24,7	-4,17
Точка 2	0,05–0,20	суглинки середні	37,56	36,41	-1,11
	0,25–0,40	суглинки легкі	36,84	31,8	-5,04
	0,55–0,70		36,26	33,59	-2,67
Точка 3	0,05–0,20	пісок	14,99	11,56	-3,45
	0,30–0,45		14,33	7,83	-6,50
	0,55–0,70		15,5	5,0	-10,5
Точка 4	0,05–0,20	субстрат (суглинки легкі)	33,55	26,3	-7,25
	0,45–0,60	суглинки середні	27,61	25,5	-2,29
	0,65–0,80		28,63	26,33	-2,30

Стосовно ж нижньої межі ОДВ кореневого шару ґрунту, то протягом тривалого часу його значення встановлювались за результатами експериментальних польових досліджень і для різних сільськогосподарських культур за їх вирощування на різних ґрунтах пропонувалось використовувати величини вологості ґрунту в межах від 0,6 до 0,9 НВ, залежно від властивостей ґрунту, виду сільськогосподарської культури та фази її розвитку [28]. Надалі дослідження багатьох учених, зокрема й авторів цієї статті, засвідчили [29; 30], що у разі підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту у вузькому діапазоні високої (як правило вище 80% від НВ) вологості, завжди витримується умова забезпечення фактичної евапотранспірації рослин рівним або близьким до потенційно можливого за даних погодних умов та врожайність, близька до генетичного потенціалу сорту або гібриду (рис. 1).

Але найбільш істотні зміни щодо підходів у визначенні нижньої межі ОДВ кореневого шару ґрунту пов'язані з початком використання для цієї мети основної гідрофізичної характеристики (кривої рівноважної сорбції) ґрунту з одночасним використанням як показника вологозабезпечення не вологості ґрунту, а всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи [13]. Використання ОГХ дозволило розглядати вологоємність ґрунту, зокрема для цілей визначення меж ОДВ в поєднанні зі структурою пор, і, як уже зазначалось, визначати як НВ (верхню межу

ОДВ), так і величину передполивного порога, не в показниках вологості ґрунту, а величиною всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи [13]. За цього величину всмоктувального тиску, що відповідає передполивному порогу, пропонуємо визначати з урахуванням резервування в кореновому шарі ґрунту запасів легкодоступної вологи як мінімум на одну добу евапотранспірації на рівні потенційно можливого споживання вологи (рис. 2).

Такий підхід зумовив значне звуження ОДВ та дав можливість обґрунтувати перехід на проведення поливів значно (у 1,5–2,0 раза) меншими нормами порівняно з тими, що застосовували у попередні роки [32]. Технологічно це узгоджується з продуктивністю дощувальних машин нового покоління та дає можливість реалізовувати еколого-безпечні технології поливу за одночасного підтримання фактичної евапотранспірації зрошуваних сільськогосподарських культур на рівні потенційно можливого і, відповідно, отримувати врожаї сільськогосподарських культур близькими до максимально можливих за прийнятого рівня агротехнологій та одночасного скорочення витрат поливної води на формування одиниці врожаю [32–34].

Не менш важливим для формування та реалізації режимів зрошення є визначення та прогнозування величини евапотранспірації. Точність оцінок евапотранспірації є одним із визначальних чинників точності моделю-

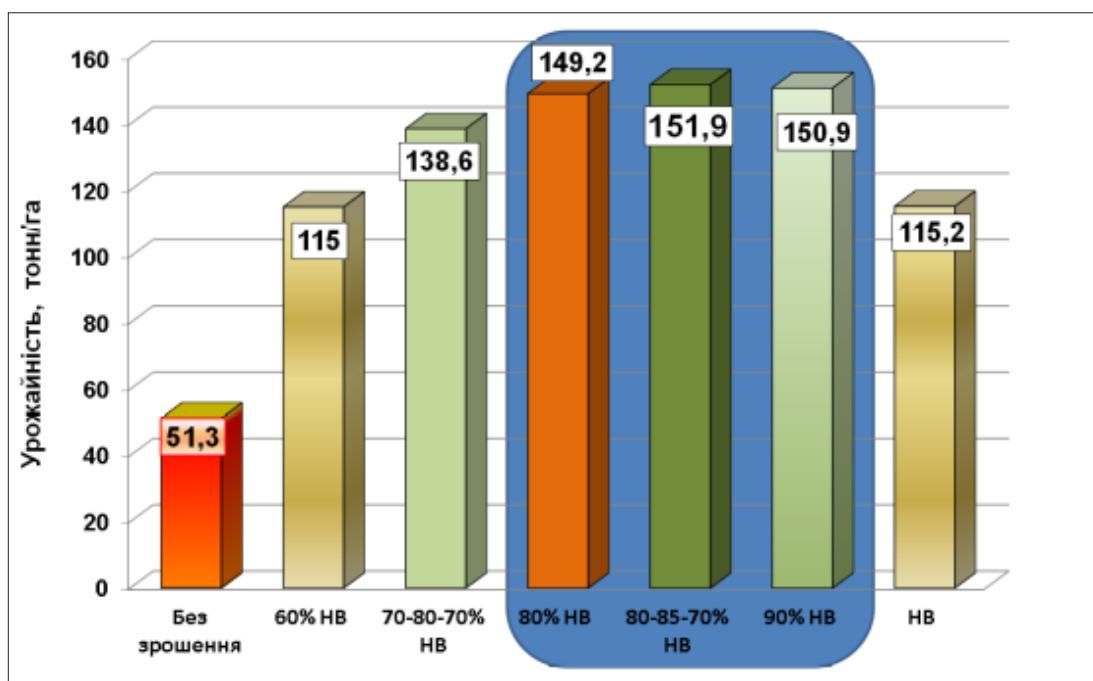


Рис. 1. Урожайність томата розсадного залежно від передполивної вологості ґрунту [31]



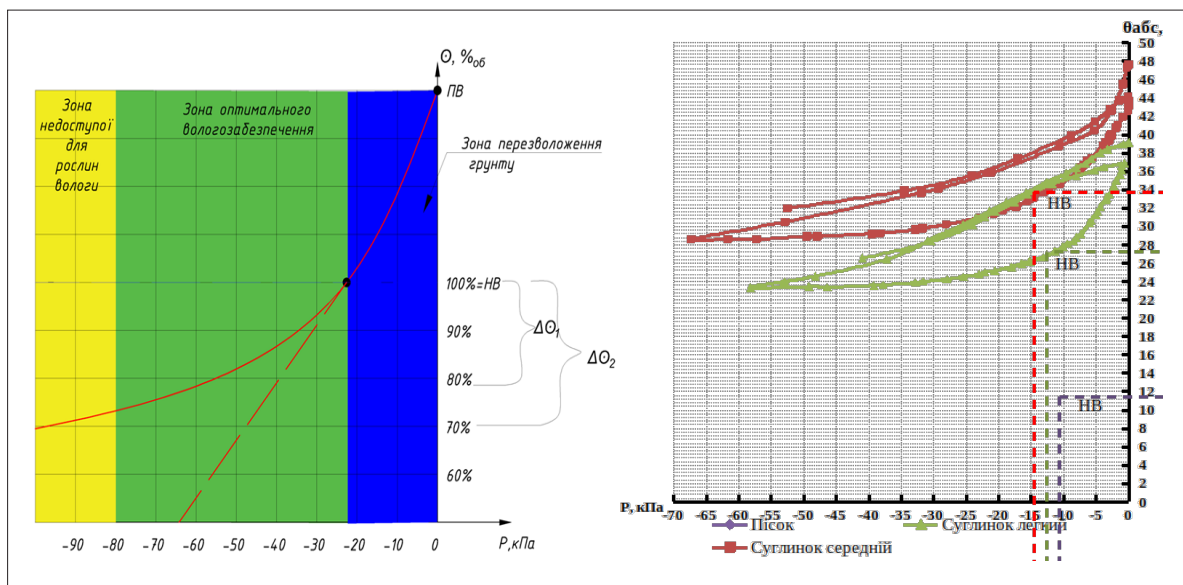


Рис. 2. Використання ОГХ для визначення НВ та передполивного порога

вання стану вологозабезпечення кореневого шару ґрунтів в процесі управління поливами. З одного боку, для кількісного визначення інтенсивності евапотранспірації та більш точного моделювання вологоперенесення в системі «ґрунт-рослина-атмосфера» потрібні інтегровані моделі, що враховують фізику ґрунтів та атмосфери і фізіологію рослин [35], наприклад моделі Пенмана-Монтейта [21], Шатлворта-Уолеса [36] і Прістлі-Тейлора [37]. З іншого боку, існує великий масив емпіричних методів, ефективність яких обмежено конкретними агрокліматичними умовами. Такими методами, що найбільше використовують в умовах України, є методи А.М. Алпатьєва та С.М. Алпатьєва [38], Д.А. Штойка [22], М.І. Будика [39] та М.М. Іванова [23].

Для дослідження процесів вирощування сільськогосподарських культур за даними робіт [40, 41] найкраще використовувати методи, що враховують найбільшу кількість вхідних параметрів. За цього питання визначення точності параметрів евапотранспірації залишається актуальним для кожного окремого випадку [20]. Це витікає з того, що в умовах зрошення, підтримувані діапазони вологості кореневого шару ґрунту суттєво впливають на доступність вологи рослинам [13]. Тому точність визначення інтенсивності евапотранспірації безпосередньо впливає на точність визначення строків і норм поливу.

Враховуючи, що на сьогодні не існує універсального, придатного для будь-яких агрокліматичних умов, методу визначення інтенсивності евапотранспірації в СППР при управлінні

поливами на підставі проведених досліджень [20] рекомендується поєднувати одночасне використання інтегрованих моделей з максимальною кількістю параметрів, насамперед Пенмана-Монтейта та моделей, які розроблено для конкретних агрокліматичних умов України, насамперед – методів Д.А. Штойка та М.М. Іванова.

Слід зауважити, що використання методу Пенмана-Монтейта рекомендується з урахуванням рекомендацій ФАО [42] та його використанням у сучасних інтернет-метеостанціях типу iMetos, але з обов'язковим уточненням коефіцієнтів культур  $K_c$  для різних ґрунтово-кліматичних зон України [43]. Доповнення методу Пенмана-Монтейта методами Д.А. Штойка та М.М. Іванова, як показали результати наших досліджень [20], дає можливість більш точного визначення параметрів евапотранспірації в окремі фази розвитку сільськогосподарських культур.

Іншою, вкрай важливою, складовою сучасних СППР при управлінні поливами є методика прогнозування вологозабезпечення ґрунтів. Зараз найбільш використовуваним для вказаних цілей є диференціальне рівняння Річардса [44], яке описує вологоперенесення в ґрунтових середовищах із властивостями, незалежними від масштабу. Нами, для підвищення точності моделювання процесів масоперенесення в пористих середовищах фрактальної структури, можуть бути використані дробово-диференціальні рівняння [45–48]. За цього рекомендується використовувати рівняння, які описують процеси масоперенесення в термінах

потенціалу ґрунтової вологи, а не у вологості ґрунту.

Прогнозування зміни стану вологозабезпечення кореневмісного шару ґрунту пропонується, зокрема, здійснювати використовуючи одновимірне дробово-диференціальне за часовою та просторовою змінними рівняння вологоперенесення, що має вигляд [48] та є узагальненнями класичного рівняння Річардса для функцій напору:

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

$$0 \leq z \leq L, t \geq 0, \quad (1)$$

де  $H$  – напір,  $C^{-1}(H) = \frac{\partial H}{\partial \theta}$ ,  $\theta$  – об’ємна воло-

гість ґрунту (%),  $k(H)$  – коефіцієнт вологоперенесення,  $S$  – функція екстракції, що моделює взаємодію кореневої системи рослин з ґрунтом,  $D_t^{(\beta)}$  – дробова похідна Капуто-Герасимова за часовою змінною виду,

$$D_t^{(\beta)} H(t, z) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^t H'(t, z) (t-\tau)^{-\beta} d\tau$$

$D_z^{(\alpha)}$  – аналогічна похідна за просторовою змінною,  $0 < \alpha, \beta \leq 1$ .

Використання моделей, заснованих на рівнянні (1) та подібних дробово-диференціальних рівняннях, дозволяє підвищити точність моделювання у складних геогідрологічних умовах завдяки врахуванню нелокальних ефектів у часі та просторі. Окрім цього, такі моделі можна розглядати як напівемпіричні, де порядки дробових похідних є додатковими параметрами, значення яких ідентифікуються в процесі адаптації моделі до конкретних умов вирощування культури. Зауважимо, що одним із критичних ефектів за цього, які мають розпізнаватись та враховуватись, є можливе перенавчання (*overfitting*) моделі.

Крім підвищення точності моделювання, використання таких рівнянь дає можливість розглядати зону аерації в одній гідродинамічній схемі з горизонтами ґрунтових вод, а водотрив водоносного горизонту може використовуватись як гранична умова другого ряду в крайовій задачі моделювання процесів вологоперенесення з метою прогнозування рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту та визначення строків і норм поливу.

Звичайно ж, що сучасні СППР за визначення строків і норм поливу, мають використовувати

не тільки розрахункові методи, а й мати можливість корегування розрахунків за даними прямих вимірювань рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту. За цього важливим є вибір параметра, інструментальні вимірювання якого буде використано в якості контрольних для корегування цих розрахунків і рівня вологозабезпечення кореневого шару, а також строків та норм поливу.

Враховуючи, що нами для прогнозних розрахунків рівня вологозабезпечення, строків та норм поливу використано рівняння вологоперенесення в термінах потенціалу вологи, а величини НВ і передполивного порога характеризуються відповідними значеннями всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи, логічним і послідовним є використання саме всмоктувального тиску (капілярного потенціалу) в якості параметра, що інструментально контролюється на реперних полях для корегування прогнозних розрахунків. За цього для його вимірювання використовують тензіометричні датчики Watermark 200 SS у складі автоматичних інтернет-метеостанцій типу iMetos або Devis. Кількість точок вимірювань визначається виходячи з необхідності мати як мінімум одну точку інструментальних вимірювань для кожної пари «ґрунт-рослина» з вимірюванням всмоктувального тиску як мінімум на двох глибинах ґрунтового профілю.

Зрозуміло, що поступова відмова від використання вологості ґрунту в якості параметра (індикатора) рівня вологозабезпечення ґрунтів і перехід на використання для цього параметра потенціалу ґрунтової вологи зумовлено перш за все тим, що саме потенціал ґрунтової вологи або його складові – всмоктувальний тиск чи капілярний потенціал – на відміну від вологості ґрунту є прямими показниками, які характеризують силу, з якою ґрунтова волога утримується в порах ґрунту і не залежать від його властивостей. Його використання не вимагає прив’язки до НВ. Крім того, саме градієнт потенціалу ґрунтової вологи визначає напрямок руху вологи в ґрунтовому профілі [49]. Крім чисто фізичних переваг, використання потенціалу ґрунтової вологи значно, мінімум на порядок, підвищує точність визначення стану вологозабезпечення та доступність ґрунтової вологи для рослин через вищу роздільну здатність та точність приладів вимірювання тензіометричного тиску порівняно з датчиками вимірювання об’ємної вологості ґрунту [50].

Важливими аспектами методів управління зрошенням є прогнозування погодних умов, які використовують для прогнозних розрахунків евапотранспірації та вологозапасів

кореневого шару ґрунту за визначення строків і норм поливу. Досвід виконання цих робіт [18] свідчить, що з достатньою для практики управління поливами точністю можна використовувати усереднені дані прогнозів погоди декількох (не менше трьох) найпоширеніших сайтів погоди [51]. Враховуючи, що прогнозування строків і норм поливу в СППР, як правило, проводиться превентивно на строк не більше 5 діб, тому і прогнози погоди на такий термін можна вважати більш-менш достовірними [18; 51] і використовувати їх для розрахунку параметрів евапотранспірації, величина якої потім використовується при прогнозних розрахунках строків і норм поливу.

Іншим важливим аспектом сучасних підходів до управління зрошенням є використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Поєднання в СППР гідрологічних моделей та даних ДЗЗ дозволяє нівелювати багато недоліків, пов'язаних із низькою часовою роздільною здатністю ДЗЗ [52]. Таке комбінування полегшує часовий аналіз для оцінювання ефективності зрошення [53; 54]. ДЗЗ також можливо використовувати для ідентифікації ділянок, у межах яких необхідне вдосконалення управління зрошенням [55]. Іншим важливим аспектом використання даних ДЗЗ є те, що дистанційна оцінка вологості ґрунту [56; 57] та наближення рослин до стану водного стресу [58] дозволяє проводити управління зрошенням на полях, не покритих наземними засобами моніторингу, використовуючи наземні дані з інших полів для калібрування відповідних моделей.

Крім наведеного, ефективне управління зрошенням потребує також повного врахування всіх процесів в системі «ґрунт-рослина-повітря». СППР у зрошенні також часто моделюють процеси, пов'язані з режимами живлення рослин, зокрема цикли азоту [59; 60], забруднення поверхневих та підземних вод [61], містять модулі оцінки ризиків та економічного моделювання [62].

В Інституті водних проблем і меліорації НААН з використанням викладених вище концептуальних засад розроблена та пройшла успішну апробацію «Інформаційно-аналітична система (ІАС) управління поливами «Полив-онлайн». Результати впровадження ІАС «Полив-онлайн» у різних природно-кліматичних зонах України для управління поливами різних видів сільськогосподарських культур [18] засвідчили високу ефективність зрошення, що є комплексним результатом із реалізації режимів

зрошення, сформованих відповідно до концептуальних підходів, які викладено у цій статті.

**Висновки.** Прогресуюче погіршення природного вологозабезпечення внаслідок глобального потепління потребує розширення застосування зрошення як основного технологічного прийому забезпечення сталості землеробства в умовах змін клімату. В цих умовах найвища ефективність та екологічна безпечність зрошення досягається за умови використання для управління поливами систем підтримки прийняття рішень, які реалізують такі концептуальні засади:

- проведення поливів має забезпечувати підтримання вологозабезпечення кореневого шару ґрунту у вузькому діапазоні високої вологості ( $0,80-0,85 \text{ НВ} \div 0,95 \text{ НВ}$ );
- використання тензіометричного тиску (капілярного потенціалу) ґрунтової вологи в якості критерію рівня вологозабезпечення та доступності ґрунтової вологи для рослин;
- використання основної гідрофізичної характеристики (кривої водозатримувальної здатності для визначення НВ, передполивного порога та оптимального діапазону вологозабезпечення кореневого шару ґрунту);
- використання для розрахунків евапотранспірації декількох методів, передбачаючи поєднання інтегрованих та емпіричних моделей;
- використання рівняння неусталеного вологоперенесення в ненасичено-насичених ґрунтах зони аерації в термінах напорів для прогнозних розрахунків стану вологозабезпечення кореневого шару ґрунту та строків і норм поливу;
- поєднання даних прогнозних розрахунків та експериментальних вимірювань рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту за допомогою тензіометричних датчиків;
- використання даних ДЗЗ для визначення строків і норм поливу на ділянках, не охоплених інструментальними моніторинговими спостереженнями.

Введення зазначених принципів у практику управління зрошенням забезпечує:

- отримання врожайності зрошуваних сільськогосподарських культур на рівні  $0,85-0,90$  від потенціалу сортів і гібридів за одночасного зниження витрат поливної води на одиницю врожаю;
- мінімізацію або повне виключення втрат поливної води на інфільтрацію, розвиток процесів підтоплення та вторинного засолення.

Отже, реалізація зазначених принципів у повному обсязі можлива лише за умови застосування сучасних систем підтримки прийняття рішень.

## Бібліографія

1. Projections of air temperature and relative humidity in Ukraine regions to the middle of the 21st century based on regional climate model ensembles / Krakovska S.V. et al. *Heoinformatyka*. 2018. № 3(67). Pp. 62–77.
2. Наукові засади розвитку систем землеробства в зоні Українського Степу / Ромащенко М.І. та ін. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 10. С. 5–9.
3. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> (дата звернення: 24.05.2022).
4. План заходів з реалізації Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 р. № 1567-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npras/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-z-realizaciyi-strategiyi-zroshennya-ta-drenazhu-s211020> (дата звернення: 24.05.2022).
5. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / Ромащенко, М.І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 1. С. 5–22.
6. Rinaldi M., He Z. Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. *Advances in Agronomy*. 2014. № 123. Pp. 229–279.
7. Mainaa M.M., Amina M.S.M., Yazidb M.A. Web geographic information system decision support system for irrigation water management: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 2014. № 64(4). Pp. 283–293.
8. Досвід розробки та шляхи удосконалення систем управління зрошенням / Ромащенко М.І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2019. № 2. С. 17–30.
9. de Wit C.T. Transpiration and crop yields. Versl. Landbouwk. Onderz. 64.6 Institute of Biological Chemistry Research on Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands. 1958
10. Root Zone Water Quality Model (RZWQM2): Model Use, Calibration, and Validation. Ma, L. et al. *Transactions of the ASABE*. 2012. № 55(4). Pp. 1425–1446.
11. Muñoz-Carpena R., Dukes M. Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops. University of Florida: Gainesville, FL, USA. 2005.
12. Sharma N., Hakkim A., Singh A.K. Development and field evaluation of a low-cost automated drip irrigation system. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2021. № 20(2). Pp. 188–194.
13. Campbell G. S., Campbell M.D., Hillel D. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in irrigation*. 1982. № 1. Pp. 25–42.
14. Jones H.J. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*. 2004. № 55(407). Pp. 2427–2436.
15. Режими і способи зрошення / Ромащенко М.І. та ін. *Аграрна наука*. 2009. С. 313–350.
16. Bohaienko V., Matiash T., Krucheniuk A. Decision Support System in Sprinkler Irrigation Based on a Fractional Moisture Transport Model. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEEA 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 83. Springer, Cham.
17. New planning technique to master the future of water on local and regional level in Ukraine / Zhovtonog O. et al. *Journal of Water and Climate Change*. 2011. № 2(2–3). Pp. 189–200.
18. Using smart technologies in irrigation management. In International Commission on Irrigation and Drainage / Gadzalo Ya. et al. // 3rd World Irrigation Forum (WIF3). 2019. Pp. 1–6. (Id: W.1.3.02).
19. Ромащенко М.І., Мистецкий Г.Е., Ключин Д.А. Математическая модель внутривлажного влаго-, соле- и теплопереноса при микроорошении. *Меліорація і водне господарство*. 1991. № 7. С. 51–53.
20. Influence of evapotranspiration assessment on the accuracy of moisture transport modeling under the conditions of sprinkling irrigation in the south of Ukraine / Romashchenko M.I. et al. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2020. № 66(10). Pp. 1424–1435.
21. Monteith J.L. Evaporation and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symposium of the Society for Experimental Biology. Fogg G.E. (ed). 8–12 September 1964, Swansea. The Company of Biologists: Cambridge, 1965. Pp. 205–234.
22. Розрахункові методи визначення сумарного випаровування і строків поливу с.-г. культур / Штойко Д.А. та ін. *Зрошувальне землеробство*. 1977. С. 3–8.
23. Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости. Москва, 1954. С. 189–196.
24. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) / Bastiaanssen W.G.M. et al. *Formulation. J. Hydrol.* 1988. № 212–213. Pp. 198–212.

25. Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China / Wang F.X. et al. *Field Crops Research*. 2011. № 122(1). Pp. 78–84.
26. Муромцев Н.Н., Ромащенко М.И., Панасенко И.И. Определение параметров влагопереноса в полевых условиях. *Мелиорация и водное хозяйство*. 1982. № 56. С. 11–14.
27. Ромащенко М.И., Коломієць С.С., Білоброва А.С. Система лабораторного діагностування водно-фізичних властивостей ґрунтів. *Мелиорация і водне господарство*. 2019. № 2. С. 199–208.
28. Шатковський А.П., Черевичний Ю.О., Чабанов А.С. Закономірності формування режиму краплинного зрошення просапних культур. *Мелиорация і водне господарство*. 2011. № 99. С. 25–32.
29. Особливості режимів краплинного зрошення просапних культур / Ромащенко М.И. та ін. *Вісник аграрної науки*. № 93(2). С. 51–56.
30. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions / Shahnazari A. et al. *Field Crops Research*. 2007. № 100(1). Pp. 117–124.
31. Шатковський А.П., Черевичний Ю.О. Водоспоживання та врожайність пасльонових культур за краплинного зрошення в умовах Степу України. *Мелиорация і водне господарство*. 2013. № 100(1). С. 27–33.
32. Ромащенко М.И. Некоторые аспекты обоснования уменьшения оросительных норм. *Вісник аграрної науки*. 1992. С. 35–39.
33. Ромащенко М.И., Балюк С.А., Жовтоног О.І. Науково-методичні основи та система ґрунтового-екологічного забезпечення режимів зрошення. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 1998. Спец.випуск част. 1. С. 38–43.
34. Ромащенко М.И., Жовтоног О.І., Філіпенко Л.А. Обґрунтування екологічно безпечних поливних норм. *Аграрна наука*. 1999. № 11. С. 56–61.
35. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M.B. Land-surface modelling in hydrological perspective – a review. *Biogeosciences*. 2006. № 3(2). Pp. 229–241.
36. Shuttleworth W.J., Wallace J.S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1985. № 111. Pp. 839–855.
37. Priestley C.H.B., Taylor R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. 1972. № 100. Pp. 81–92.
38. Алпатьев А.М. О методах расчёта потребностей в воде культурных фитоценозов в связи с развитием орошения в СССР. Биологические основы орошаемого земледелия. Москва : Наука. 1974. С.85–89.
39. Budyko M.I. *Climate and Life*; Academic Press: New York, NY, USA. 1974.
40. Faybishenko B. Climatic Forecasting of Net Infiltration at Yucca Mountain Using Analogue Meteorological Data. *Vadose Zone Journal*. 2007. № 6. Pp. 77–92.
41. Faybishenko B. Fuzzy-probabilistic calculations of water-balance uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2010. № 24(6). Pp. 939–952.
42. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions / Allen R.G. et al. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 2005. № 131 (1). Pp. 2–13.
43. Ромащенко М.И., Шатковський А.П., Журавльов О.В. Особливості застосування методу «Penman-Monteith» в умовах краплинного зрошення Степу України (на прикладі зернової кукурудзи). *Вісник аграрної науки*. 2016. № 5. С. 55–59.
44. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1931. 1(5). Pp. 318–333.
45. Pachepsky Y., Benson D., Rawls W. Simulating Scale-Dependent Solute Transport in Soils with the Fractional Advective-Dispersive Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2010. № 64. Pp. 1234–1243.
46. Fractional governing equations of transient groundwater flow in confined aquifers with multi-fractional dimensions in fractional time / Kavvas, M.L. et al. *Earth Syst. Dynam.* 2017. № 8, pp. 921–929.
47. Kavvas M.L., Ercan A., Polsinelli J. Governing equations of transient soil water flow and soil water flux in multi-dimensional fractional anisotropic media and fractional time. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. № 21. Pp. 1547–1557.
48. Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation / Romashchenko, M.I. et al. *Irrigation Science*. 2021. № 39(3). Pp. 385–396.
49. Ромащенко М.И. Исследование влагопереноса с целью регулирования режима капельного орошения садов : автореф. дис. ... канд. тех. наук. Киев, 1981. 25 с.

50. Рекомендації з оперативного контролю та управління режимом зрошення сільськогосподарських культур із застосуванням тензіометричного методу / Ромашенко М.І. та ін. Київ : ІВПіМ НААН. 2020. 71 с.

51. Data mining for a model of irrigation control using weather web-services / Kovalchuk V. et al. *In International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications*. 2018. (pp. 133–143). Springer, Cham.

52. Droogers P., Bastiaanssen W. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2002. № 128 (1). Pp. 11–18.

53. Kite G.W., Droogers P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J. Hydrol.* 2000. № 229 (1–2). Pp. 3–18.

54. Kite G.W. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *J. Hydrol.* 2000. № 229 (1–2). Pp. 59–69.

55. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level / Santos C. et al. *Irrig. Sci.* 2008. № 26 (3). Pp. 277–288.

56. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture / Babaeian E. et al. *Reviews of Geophysics*. 2019. № 57. Pp. 530–616.

57. Danylenko Iu., Bohaienko V. Monitoring of soil moisture in the south of Ukraine using active and passive remote sensing data. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXII*. 2020. 11528. 1152807.

58. Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review / Virnodkar, S.S. et al. *Precision Agric.* 2020. № 21. Pp. 1121–1155.

59. Williams J.R., Izaurralde R.C. The APEX model. BRC Report 2005–02. Blackland Research and Extension Center. Blackland/

60. Sediment and nutrient modeling for TMDL development and implementation / Borah D.K. et al. *Trans. ASABE*. 2006. № 49 (4). Pp. 967–986.

61. Panagopoulos Y., Makropoulos C., Mimikou M. Decision support for diffuse pollution management. *Environ. Model Softw.* 2012. № 30. Pp. 57–70.

62. Management model for decision support when applying low quality water in irrigation / Styczen M. et al. *Agric. Water Manage.* 2010. № 98. Pp. 472–781.

### References

1. Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Gnatiuk, N.V., & Shpytal, T.M. (2018). Projections of air temperature and relative humidity in Ukraine regions to the middle of the 21st century based on regional climate model ensembles. *Heoinformatyka*, 3(67), 62–77.

2. Romashchenko, M., Tarariko, Yu., Shatkovskiy, A., Saydak, R., & Soroka, Yu. (2015). *Naukovi zasady rozvytku system zemlerobstva v zoni Ukrainiskoho Stepu [Scientific principles of the development of farming agriculture systems in the zone of Ukrainian Steppe (in Ukrainian)]*. *Bulletin of Agrarian Science*, 10, 5–9. [in Ukrainian].

3. *Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku. Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 14.08.2019 r. № 688-r [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 14, 2019 № 688-r]*, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> [in Ukrainian].

4. *Plan zahodiv z realizatsii Stratehii zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku. Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21.10.2020 r. № 1567-r [Action plan for the implementation of the Irrigation and Drainage Strategy in Ukraine until 2030. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 21.10.2020 № 1567-r]*, available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-z-realizatsiyi-strategiyi-zroshennia-ta-drenazhu-s211020> [in Ukrainian].

5. Romashchenko, M.I., Husiev, Yu.V., Shatkovskiy, A.P., Saidak, R.V., Yatsiuk, M.V., Shevchenko, A.M., & Matiash, T.V. (2020). *Vplyv suchasnykh klimatychnykh zmin na vodni resursy ta silskohospodarske vyrobnytstvo [Impact of modern climate change on water resources and agricultural production]*. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 1, 5–22. [in Ukrainian].

6. Rinaldi, M., & He, Z. (2014). Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. *Advances in Agronomy*, 123, 229–279.

7. Mainaa, M.M., Amina, M.S.M., & Yazidb, M.A. (2014). Web geographic information system decision support system for irrigation water management: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 64(4), 283–293.

8. Romashchenko, M., Matiash, T., Bohaienko, V., Kovalchuk, V., Voitovich, O., Krucheniuk, A., Knysh, V., & Shlikhta, V. (2019). Development experience and ways of improvement of irrigation management systems. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 2, 17–30.
9. de Wit, C.T. (1958). Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 64.6 Institute of Biological Chemistry Research on Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands.
10. Ma, L., Ahuja, L.R., Nolan, B.T., Malone, R.W., Trout, T.J., & Qi, Z. (2012). Root Zone Water Quality Model (RZWQM2): Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1425–1446.
11. Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. (2005). Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops. University of Florida: Gainesville, FL, USA.
12. Sharma, N., Hakkim, A., & Singh, A.K. (2021). Development and field evaluation of a low-cost automated drip irrigation system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(2), 188–194.
13. Campbell, G. S., Campbell, M. D., & Hillel, D. (1982). Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in irrigation*, 1, 25–42.
14. Jones, H.J. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436.
15. Romashchenko, M.I., Pysarenko, A.V., Pysarenko, P.V., Baliuk, S.A., Shatkovskiy A.P. et al. (2009). *Rezhymy i sposoby zroshennia [Modes and methods of irrigation]*. Kyiv : Ahrarna nauka, 313–350.
16. Bohaienko, V., Matiash, T., & Krucheniuk, A. (2021). Decision Support System in Sprinkler Irrigation Based on a Fractional Moisture Transport Model. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 83. Springer, Cham.
17. Zhovtonog, O., Hoffmann, M., Polishchuk, V., & Dubel, A. (2011). New planning technique to master the future of water on local and regional level in Ukraine. *Journal of Water and Climate Change*, 2(2–3), 189–200.
18. Gadzalo, Ya., Romashchenko, M., Kovalchuk, V., Matiash, T., & Voitovich O. (2019). Using smart technologies in irrigation management. In *International Commission on Irrigation and Drainage, 3rd World Irrigation Forum (WIF3)* (pp. 1–6). Id: W.1.3.02.
19. Romashchenko, M.Y., Mystetskyi, H.E., & Kliushyn, D.A. (1991). Matematycheskaia model vnutrypochvennoho vlaho-, sole- y teploperenosa pry mykrooroshenny [Mathematical model of intrasoil moisture, salt and heat transfer during microirrigation]. *Melyoratsiia y vodnoe khoziaistvo*, 7, 51–53.
20. Romashchenko, M.I., Bohaienko, V.O., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., & Danylenko, Iu. Iu. (2020). Influence of evapotranspiration assessment on the accuracy of moisture transport modeling under the conditions of sprinkling irrigation in the south of Ukraine. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(10), 1424–1435.
21. Monteith, J.L. (1965). Evaporation and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symposium of the Society for Experimental Biology. Fogg G.E. (ed). 8–12 September 1964, Swansea. The Company of Biologists: Cambridge, 205–234.
22. Shtoiiko, D.A., Pysarenko, V.A., Bychko, O.S., & Yelazhenko, L.I. (1977). Rozrakhunkovi metody vyznachennia sumarnoho vyparovuvannia i strokiv polyvu s.-h. kultur [Estimated methods for determining the total evaporation and watering dates of agricultural cultures]. *Zroshuvalne zemlerobstvo*, 3–8. [in Ukrainian].
23. Yvanov, N. N. (1954). Ob opredeleny velychyn yspariaemosti [On the determination of volatility values]. Moskva. [in Russian].
24. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A.A.M., (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *J. Hydrol.*, 212–213, 198–212.
25. Wang, F.X., Wu, X.X., Shock, C.C., Chu, L.Y., Gu, X.X., & Xue, X. (2011). Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China. *Field Crops Research*, 122(1), 78–84.
26. Muromtsev, N.N., Romashchenko, M.Y., & Panasenko, Y.Y. (1982). Opredelenye parametrov vlahoperenosa v polevykh usloviakh [Determination of moisture transfer parameters in the field]. *Melyoratsiia y vodnoe khoziaistvo*, 56, 11–14. [in Ukrainian].
27. Romashchenko, M.I., Kolomiets, S.S., & Bilobrova, A.S. (2019). Systema laboratornoho diahnostuvannia vodno-fizychnykh vlastyvostei gruntiv [System of laboratory diagnostics of water-physical properties of soils]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 2, 199–208. [in Ukrainian].

28. Shatkovskiy, A.P., Cherevychnyi, Yu.O., & Chabanov, A.S. (2011). Zakonomirnosti formuvannya rezhymu kraplynnoho zroshennia prosapnykh kultur [Regularities of formation of the regime of drip irrigation of row crops]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 99, 25–32. [in Ukrainian].
29. Romashchenko, M., Shatkovskiy, A., Zhuravlev, A., & Cherevichny, Yu. (2015). Osoblyvosti rezhymiv kraplynnoho zroshennia prosapnykh kultur [Features of regimens of drip irrigation of cultivated crops]. *Visnyk agrarnoi nauky*, 93(2), 51–56. [in Ukrainian].
30. Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E., & Jensen, C.R. (2007). Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*, 100(1), 117–124.
31. Shatkovskiy, A.P., & Cherevychnyi, Yu. O. (2013). Vodospozhyvannia ta vrozhaunist paslonovykh kultur za kraplynnoho zroshennia v umovakh Stepu Ukrainy [Water consumption and yield of nightshade crops under drip irrigation in the steppe of Ukraine]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 100(1), 27–33. [in Ukrainian].
32. Romashchenko M.Y. (1992). Nekotorye aspekty obosnovanyia umenshenyia orosytelnykh norm [Some Aspects of the Justification for Reducing Irrigation Norms]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 35–39. [in Ukrainian].
33. Romashchenko, M.I., Baliuk, S.A., & Zhovtonoh O.I. (1998). Naukovo-metodychni osnovy ta systema gruntovo-ekolohichnoho zabezpechennia rezhymiv zroshennia [Scientific and methodological bases and system of soil and ecological support of irrigation regimes]. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo. Spets.vypusk chast, 1*, 38–43. [in Ukrainian].
34. Romashchenko, M.I., Zhovtonoh, O.I., & Filipenko, L.A. (1999). Obgruntuvannia ekolohichno bezpechnykh polyvnykh norm [Substantiation of ecologically safe irrigation norms]. *Ahrarna nauka*, 11, 56–61. [in Ukrainian].
35. Overgaard, J., Rosbjerg, D., & Butts, M.B. (2006). Land-surface modelling in hydrological perspective – a review. *Biogeosciences*, 3(2), 229–241.
36. Shuttleworth, W.J., & Wallace, J.S. (1985). Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, 839–855.
37. Priestley, C.H.B., & Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81–92.
38. Alpatev, A.M. (1974). O metodakh rascheta potrebnosti v vode kulturnykh fytoocenozov v svyazy s razvytyem orosheniya v SSSR [On methods for calculating the water needs of cultural phytocenoses in connection with the development of irrigation in the USSR]. *Byolohycheskye osnovy oroshaemoho zemledelyia*, 85–89. [in Russian].
39. Budyko, M.I. (1974). *Climate and Life*; Academic Press: New York, NY, USA.
40. Faybishenko, B. (2007). Climatic Forecasting of Net Infiltration at Yucca Mountain Using Analogue Meteorological Data. *Vadose Zone Journal*, 6, 77–92.
41. Faybishenko, B. (2010). Fuzzy-probabilistic calculations of water-balance uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(6), 939–952.
42. Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J.L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 131 (1), 2–13.
43. Romashchenko, M.I., Shatkovskiy, A.P., & Zhuravlov, O.V. (2016). Osoblyvosti zastosuvannia metodu «Penman-Monteith» v umovakh kraplynnoho zroshennia Stepu Ukrainy (na prykladi zernovoi kukurudzy) [Peculiarities of application of the «Penman-Monteith» method in the conditions of drip irrigation of the Steppe of Ukraine (on the example of grain corn)]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 5, 55–59. [in Ukrainian].
44. Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333.
45. Pachepsky, Y., Benson, D., & Rawls, W. (2000). Simulating Scale-Dependent Solute Transport in Soils with the Fractional Advective-Dispersive Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1234–1243.
46. Kavvas, M.L., Tu, T., Ercan, A., & Polsinelli, J. (2017). Fractional governing equations of transient groundwater flow in confined aquifers with multi-fractional dimensions in fractional time. *Earth Syst. Dynam.*, 8, 921–929.
47. Kavvas, M.L., Ercan, A., & Polsinelli, J. (2017). Governing equations of transient soil water flow and soil water flux in multi-dimensional fractional anisotropic media and fractional time. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 1547–1557.
48. Romashchenko, M.I., Bohaienko, V.O., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., & Krucheniuk, A.V. (2021). Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation. *Irrigation Science*, 39(3), 385–396.



49. Romashchenko, M.Y. (1981). Yssledovanye vlahoperenosa s tseliu rehulyrovanyia rezhyma kapelnogo orosheniya sadov [Investigation of moisture transfer in order to regulate the regime of drip irrigation of orchards]. Avtoreferat kandydatskoi dySSERTatsyy, Kyev, 25 s. [in Ukrainian].
50. Romashchenko, M.I., Koriunenکو, V.V., Muromtsev, M.M., Shatkovskyi, A.P., Riabkov, S.V., Usatyi, S.V., Usata, L.H., Zhuravlov, O.V., Matiash, T.V., & Cherevychnyi, Yu.O. (2020). Rekomendatsii z operatyvnoho kontroliu ta upravlinnia rezhymom zrosheniia silskohospodarskykh kultur iz zastosuvanniam tenziometrychnoho metodu [Recommendations for operational control and management of irrigation regime of agricultural crops using tensiometric method]. Naukovo-praktychne vydannia: IVPiM NAAN. Kyiv.
51. Kovalchuk, V., Demchuk, O., Demchuk, D., & Voitovich, O. (2018). Data mining for a model of irrigation control using weather web-services. In International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (pp. 133–143). Springer, Cham.
52. Droogers, P., & Bastiaanssen, W. (2002). Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 128 (1), 11–18.
53. Kite, G.W., & Droogers, P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *J. Hydrol.*, 229 (1–2), 3–18.
54. Kite, G.W. (2000). Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *J. Hydrol.*, 229 (1–2), 59–69.
55. Santos, C., Lorite, I.J., Tasumi, M., Allen, R.G., & Fereres, E. (2008). Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrig. Sci.*, 26 (3), 277–288.
56. Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., & Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57, 530–616.
57. Danylenko, Iu., & Bohaienko, V. (2020). Monitoring of soil moisture in the south of Ukraine using active and passive remote sensing data. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXII*, 11528, 1152807.
58. Virnodkar, S.S., Pachghare, V.K., Patil, V.C. et al. (2020). Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. *Precision Agric.*, 21, 1121–1155.
59. Williams, J.R., & Izaurralde, R.C. (2005). The APEX model. BRC Report 2005–02. Blackland Research and Extension Center, Blackland.
60. Borah, D.K., Yagow, G., Saleh, A., Barnes, P.L., Rosenthal, W., Krug, E.C., & Hauck, L.M. (2006). Sediment and nutrient modeling for TMDL development and implementation. *Trans. ASABE*, 49 (4), 967–986.
61. Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., & Mimikou, M. (2012). Decision support for diffuse pollution management. *Environ. Model Softw.*, 30, 57–70.
62. Styczen, M., Poulsen, R.N., Falk, A.K., & Jørgensen, G.H. (2010). Management model for decision support when applying low quality water in irrigation. *Agric. Water Manage.*, 98, 472–781.

**M.I. Romashchenko, V.O. Bogaenko, A.P. Shatkovskyi, T.V. Matyash, S.S. Kolomiets, S.A. Shevchuk, Yu. Yu. Danylenko, A.S. Sardak**

### **Conceptual principles of watering control under irrigation**

**Abstract.** *The conceptual principles of watering control under irrigation using decision support systems are outlined. Based on the analysis and research of foreign and domestic authors, it has been proven that the effectiveness of watering control depends to a large extent on the methodological approaches used to determine the terms and rates of watering in various decision support systems. It is shown that the most complete potential of varieties and hybrids of various types of crops under irrigation can be realized when establishing and implementing irrigation regimes ensuring the moisture supply of the soil root layer in a narrow range of high humidity (close to field water-holding capacity (FWHC) during the entire growing season.*

*It was grounded that the implementation of such irrigation regimes is possible only by applying decision support systems using GIS technologies, which combine hydrogeological models for calculation and forecasting of watering terms and rates, based on the use of soil moisture potential as a criterion of moisture supply availability for plants and Earth remote sensing data (ERSD). Such a combination makes it possible to analyze and apply measurement and forecasting data to the areas not covered by ground observations and provides highly efficient ecologically safe irrigation providing high irrigation water productivity and ecological safety of irrigation.*

*The implementation of these principles in the practice of irrigation management ensures the yield of irrigated crops as of 0.85–0.90 of the potential of modern varieties and hybrids, while simultaneously reducing the consumption of irrigation water per unit of yield, as well as minimizing or eliminating losses of irrigation water due to infiltration, development of flooding processes, salinization, and secondary salinization of soils.*

**Key words:** *irrigation, watering control, conceptual principles, decision support systems.*

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-322>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/322>

УДК 631.67;626.86

## ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СИСТЕМАТИЧНОГО ДРЕНАЖУ В СУЧАСНИХ ВОДОГОСПОДАРСЬКИХ ТА КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

О.А. Бабіцька<sup>1</sup>, канд. техн. наук, О.І. Харламов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, Д.П. Савчук<sup>3</sup>, канд. техн. наук, І.В. Котикович<sup>4</sup>, канд. техн. наук, Г.В. Воропай<sup>5</sup> канд. техн. наук

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-9387-5943>; e-mail: [helena-babitska@ukr.net](mailto:helena-babitska@ukr.net)

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-9019-3445>; e-mail: [lharlam911@gmail.com](mailto:lharlam911@gmail.com)

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-7672-3251>; e-mail: [savchuk.igim@gmail.com](mailto:savchuk.igim@gmail.com)

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-1492-3557>; e-mail: [ikotykovych@gmail.com](mailto:ikotykovych@gmail.com)

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-5004-0727>; e-mail: [voropaig@ukr.net](mailto:voropaig@ukr.net)

**Анотація.** Зміни умов природнього водозабезпечення та незадовільний технічний стан систем горизонтального систематичного дренажу призвели до неспроможності виконувати ним необхідні функції повною мірою. У зв'язку з цим визначення оптимальних параметрів колекторно-дренажної мережі (відстаней між дренами, їх питомої протяжності та діаметрів) набуває актуального значення. В основу науково-дослідної роботи покладено результати натурних досліджень щодо ефективності роботи дренажу в південному регіоні України, які охоплюють Інгулецьку, Каховську, Північно-Рогачицьку, Татарбунарську зрошувальні системи та зону зрошення Північно-Кримського каналу. На основі проведених досліджень розроблено та запропоновано методика з визначення оптимальних параметрів систематичного горизонтального дренажу, яка враховує сучасні норми опадів, способи поливів та норми зрошення сільськогосподарських культур. Оптимізація параметрів дренажу полягає у визначенні таких параметрів, при яких капітальні вкладення у будівництво були б мінімальними при забезпеченні залягання рівня ґрунтових вод нижче критичних глибин та норм осушення. За результатами досліджень на основі розрахунку міждренної відстані складені номограми для визначення основних параметрів систем систематичного горизонтального дренажу досконалого та недосконалого типу за різних умов водонадходження. Розрахунки виконували для ґрунтів із коефіцієнтами фільтрації від 0,01 до 30 м/добу. На основі аналізу номограм встановлено, що основними чинниками, які впливають на відстань між дренами для систем горизонтального дренажу, є коефіцієнт фільтрації, норма осушення та відстань до водоупору. Номограми дозволяють оперативно виконувати розрахунки основних параметрів систем систематичного горизонтального дренажу з урахуванням сучасних умов водонадходження та встановлювати орієнтовну вартість будівництва системи.

**Ключові слова:** параметри колекторно-дренажної мережі, горизонтальний дренаж, відстань між дренами, рівень ґрунтових вод, підтоплення, зміни клімату.

**Актуальність дослідження.** Необхідність розвитку зрошення в умовах сучасних змін клімату, посилення аридизації та опустелювання на півдні України вимагають відновлення дренажу для недопущення затоплення та підтоплення зрошуваних земель та прилеглих територій.

Для відновлення систем зрошення і дренажу колективом Інституту водних проблем і меліорації розроблена «Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року», яка передбачає відновлення та розвиток дренажу з урахуванням змін клімату.

Як зазначено у «Стратегії...», стан інженерної інфраструктури зрошення та дренажу є кризовим із загрозою погіршення. Основними проблемами в частині дренажних систем є неспроможність виконувати свої функції повною мірою, що пов'язано зі змінами клімату, режимами зрошення та низьким технічним рівнем наявного потенціалу систем [9].

Дослідження попередніх років засвідчили ефективну роботу, істотний потенціал і можливість подальшого використання існуючих систем горизонтального дренажу. Водночас, не всі системи працювали

в проєктному режимі через незадовільний технічний стан та, в деяких випадках, неспроможність дренажних систем виконувати свої функції, що пояснюється зміною умов природного вологозабезпечення. Адже останнім часом умови функціонування дренажу зазнали істотної трансформації: на зрошуваних землях широко застосовують сучасні способи та техніку поливу, змінюється кількість опадів та характер їх випадіння [7; 8].

У зв'язку з цим набуває актуальності визначення оптимальних параметрів колекторно-дренажної мережі (відстаней між дренами, питомої протяжності дрен, діаметрів трубопроводів) з урахуванням сучасних умов господарювання та змін клімату.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз наукової, нормативно-технічної, довідкової та навчально-методичної літератури засвідчив високий рівень існуючих методів визначення основних параметрів дренажу.

Найбільш поширений гідромеханічний метод розрахунку основних параметрів дренажних систем враховує теоретичні принципи руху води і увійшов до низки нормативних документів [2; 3; 5]. Емпіричні методи також мають багато переваг, оскільки базуються на статистичній обробці даних натурних спостережень [6]. Ці методи знайшли широке практичне впровадження.

Водночас ці методи недостатньо враховують сучасні зміни кліматичних і водогосподарських умов та потребують доопрацювання науково-методичних підходів до обґрунтування в проєктах будівництва, реконструкції та модернізації дренажних систем їх оптимальних конструктивно-технологічних рішень (конструкції, параметри систем і їх елементів) залежно від природно-кліматичних, водогосподарських та економічних умов.

**Метою роботи** є встановлення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів колекторно-дренажної мережі в сучасних умовах господарювання та змін клімату.

**Методика та об'єкти досліджень.** В основу досліджень покладені результати натурних спостережень минулих років, систематизації та узагальнення матеріалів проєктних, будівельних та експлуатаційних організацій системи Держводагентства України, а також статті, монографії та інші матеріали, опубліковані у вітчизняних та зарубіжних виданнях. При виконанні роботи узагальнено метеорологічні, гідрогеологічні та ґрунтові умови на об'єктах дослідження.

Номограми для визначення оптимальних параметрів дренажних систем побудовані за

даними досліджень на дослідно-виробничих ділянках дренажу Інгулецької, Каховської, Північно-Кримської, Північно-Рогачицької та Татарбунарської зрошувальних систем.

Атмосферні опади встановлювали за результатами опрацювання даних метеостанцій півдня України (Херсон, Асканія-Нова, Білгород-Дністровський тощо).

Для розв'язання поставлених завдань використовували загально-наукові методи, зокрема розрахунковий, картографічний та конструктивно-аналітичний. Оптимізацію параметрів колекторно-дренажної мережі проводили з використанням методу номограм.

**Результати досліджень.** Аналіз проведених досліджень на засвідчив, що умови функціонування дренажу, які формують водне навантаження, зазнали істотної трансформації. Метеорологічні дані останніх десятиріч на об'єктах досліджень характеризуються зміною вологозабезпечення. Аналіз кліматичних змін по основних метеостанціях півдня України показав, що середньорічна кількість опадів за період з 2000 по 2020 рр. перебуває в межах від 405 до 527 мм за рік. На ділянках проводиться зрошення сучасною дощувальною технікою (ДМ «Reinke», ДМ «Valley», ДМ «Zimmatic») та краплинне зрошення.

Параметри колекторно-дренажної мережі залежать від конкретних природно-господарських умов та розраховуються згідно з чинними нормативними документами на середньорічне навантаження періоду постійної експлуатації меліоративної системи [2].

На основі проведених досліджень розроблено та запропоновано методику з визначення оптимальних параметрів систематичного горизонтального дренажу, яка враховує сучасні норми опадів, способи поливів та норми зрошення сільськогосподарських культур.

Основними параметрами горизонтального дренажу є глибина закладання дрен та колекторів, їх діаметр, відстань між дренами та питома протяжність колекторно-дренажної мережі.

Оптимізація параметрів дренажу полягає у визначенні таких параметрів, при яких капітальні вкладення у будівництво були б мінімальними при забезпеченні залягання рівня ґрунтових вод нижче критичних глибин та норм осушення.

Одним з основних параметрів горизонтального дренажу є відстань між дренами, яка розраховується для дрен досконалого та недосконалого типу за допомогою рівнянь Роте та

Авер'янова [1; 4]. Цей показник встановлюється на основі фільтраційних розрахунків і залежить від багатьох чинників, а саме: інтенсивності та тривалості розрахункового періоду живлення ґрунтових вод, розрахункового (допустимого) підйому ґрунтових вод на міждренні, відстані до водоупору, гідрогеологічних умов дренажної території, а також відповідно до техніко-економічних вимог.

За цільову функцію оптимізації параметрів колекторно-дренажної мережі прийнято мінімізацію приведених затрат на реалізацію технічного рішення при забезпеченні сприятливої водно-екологічної ситуації на зрошуваних землях та прилеглих територіях.

Одним з основних чинників навантаження на дренажну систему на зрошуваних масивах є інтенсивність просочування атмосферних опадів та зрошувальної води в ґрунті, що виражена товщиною шару води за одиницю

часу і визначається як сума середньомісячних опадів та норми зрошення на ділянці, на якій проектується дренаж.

Для визначення інфільтраційного живлення, що відповідає сучасним умовам водонадходження, необхідним є встановлення сучасних норм опадів та норм зрошення.

Величину середньорічної суми опадів для основних метеостанцій півдня України обраховували за період 2000–2020 рр. із прогнозом до 2050 р. (табл. 1).

Норми зрошення визначаються залежно від способу зрошення та сільськогосподарських культур, відповідно до рекомендацій, розроблених фахівцями ІВПіМ НААН «Тимчасові районовані норми водопотреби сільськогосподарських культур для зрошення дощуванням» та «Тимчасові норми водопотреби для краплинного зрошення сільськогосподарських культур в умовах степу України», за таблицями 2–3 [10; 11].

### 1. Середньомісячні опади по метеостанціях зони зрошення

Метеостанція	Середньорічна кількість опадів (ДСТУ), мм	Середня кількість річних опадів за період з 2010 по 2020 рр., мм	Середня кількість річних опадів (прогноз до 2050 р.), мм
Одеса	461	508	649
Ізмаїл	479	502	571
Роздільна	514	494	434
Сарата	478	528	678
Миколаїв	445	424	361
Херсон	449	416	317
Асканія-Нова	425	403	337
Генічеськ	407	399	375
Дніпро	550	522	438
Комісарівка	514	511	502
Кривий Ріг	475	446	359
Запоріжжя	528	476	320

### 2. Норми зрошення сільськогосподарських культур при дощванні у середні за водністю роки (P = 50 %)

Культура	Області					
	Херсонська			Дніпропетровська		
	Метеостанції (населений пункт)					
	Херсон	Асканія-Нова	Генічеськ	Дніпро	Комісарівка	Кривий Ріг
1	2	3	4	5	6	7
пшениця озима	1500	1500	1800	1200	1200	1300
ріпак озимий на насіння	1100	1100	1500	800	800	900
ріпак озимий на з/к	300	300	300	0	0	300
ріпак ярий на з/к	400	400	800	300	300	400
сорго на зерно	1700	1700	2000	1500	1500	1600
овес	1600	1600	2000	1300	1300	1400
ячмінь озимий	1000	1000	1400	500	500	700
ячмінь ярий	1300	1300	1700	1000	1000	1100
люцерна після збирання ячменю	2800	2800	3300	2500	2500	2600
люцерна 2-го року	3600	3600	4000	3000	3000	3300

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
жито озиме на з/к	400	400	700	400	400	500
соняшник	1800	1800	2100	1500	1500	1700
кукурудза на з/к	1800	1800	2100	1300	1300	1500
кукурудза післяжнивна	2000	2000	2400	1000	1000	1300
кукурудза середньостигла	2800	2800	3200	2000	2000	2200
кукурудза пізньостигла	3400	3400	3900	3000	3000	3200
соя ранньостигла	2600	2600	2800	2100	2100	2300
соя середньостигла	3200	3200	3600	2400	2400	2600
соя пізньостигла	3600	3600	4200	3000	3000	3200
томати	3600	3600	4300	2800	2800	3200
картопля весняного строку садіння	1100	1100	1300	600	600	900
картопля літнього строку садіння	1900	1900	2200	1900	1900	2100
огірок	3500	3500	4400	3000	3000	3200
цибуля, часник	3100	3100	3900	2500	2500	2700
капуста рання	1600	1600	2000	1300	1300	1400
капуста білоголова	3500	3500	4300	2800	2800	3100
буряк кормовий	2900	2900	3500	2400	2400	2500
буряк столовий	2400	2400	3000	2100	2100	2300
Культура	Області					
	Одеська				Миколаївська	Запорізька
	Метеостанції (населений пункт)					
	Одеса	Ізмаїл	Роздільне	Сарата	Миколаїв	Запоріжжя
пшениця озима	1700	1500	1200	1500	1400	1300
ріпак озимий на насіння	1300	1100	800	1100	1000	800
ріпак озимий на з/к	300	300	0	300	300	0
ріпак ярий на з/к	700	400	300	400	400	400
сорго на зерно	2100	1900	1500	1900	1800	1600
овес	1800	1600	1400	1600	1500	1500
ячмінь озимий	1000	800	600	800	900	800
ячмінь ярий	1400	1200	1000	1200	1200	1000
люцерна після збирання ячменю	2900	2700	2400	2700	2800	2700
люцерна 2-го року	3800	3500	3100	3500	3500	3300
жито озиме на з/к	400	400	300	400	400	400
соняшник	2000	1600	1500	1600	1500	1600
кукурудза на з/к	1800	1600	1500	1600	1700	1500
кукурудза післяжнивна	2000	1700	1200	1700	1700	1400
кукурудза середньостигла	2800	2600	2200	2600	2700	2300
кукурудза пізньостигла	3500	3400	3100	3400	3300	3100
соя ранньостигла	2400	2300	2300	2300	2500	2400
соя середньостигла	3100	2800	2500	2800	3000	2700
соя пізньостигла	3800	3500	3000	3500	3500	3100
томати	3600	3200	2900	3200	3800	3300
картопля весняного строку садіння	900	800	700	800	900	900
картопля літнього строку садіння	2300	2100	2000	2100	2100	1900
огірок	3800	3500	3100	3500	3500	3600
цибуля, часник	3300	2900	2600	2900	3100	2800
капуста рання	1700	1500	1300	1500	1600	1500
капуста білоголова	3900	3400	3000	3400	3500	3000
буряк кормовий	3000	2800	2500	2800	2800	2600
буряк столовий	2500	2300	2000	2300	2400	2100

3. Норми зрошення сільськогосподарських культур при краплинному зрошенні в середні за водністю роки (P = 50 %)

Культура	Області					
	Херсонська			Дніпропетровська		
	Метеостанції (населений пункт)					
	Херсон	Асканія-Нова	Генічеськ	Дніпро	Комісарівка	Кривий Ріг
томат розсадний	3000	3000	3900	2500	2500	2700
цибуля ріпчаста	2700	2700	3500	2200	2200	2400
перець солодкий розсадний	3100	3100	4000	2600	2600	2800
баклажан розсадний	2700	2700	3500	2200	2200	2400
огірок	3600	3600	4100	2700	2700	3000
капуста білоголова розсадна	3500	3500	4000	2600	2600	2800
морква	2200	2200	2600	2000	2000	2200
буряк столовий	2100	2100	2500	1900	1900	2100
картопля весняного строку садіння	500	500	800	400	400	500
картопля літнього строку садіння	1900	1900	2200	1700	1700	1900
кукурудза на зерно	3100	3100	3500	2800	2800	2900
кукурудза цукрова	1900	1900	2100	1600	1600	1800
кавун	500	500	700	300	300	400
кабачок	1400	1400	1600	1200	1200	1300
буряк цукровий	2700	2700	3400	2400	2400	2500
соя середньо- та пізньостигла	3300	3300	3900	2700	2700	2900
Культура	Області					
	Одеська				Миколаївська	Запорізька
	Метеостанції (населений пункт)					
	Одеса	Ізмаїл	Роздільне	Сарага	Миколаїв	Запоріжжя
томат розсадний	2900	2900	2600	2900	2800	2700
цибуля ріпчаста	2600	2600	2400	2600	2400	2500
перець солодкий розсадний	3000	3000	2800	3000	3000	2900
баклажан розсадний	2500	2500	2400	2500	2400	2400
огірок	3100	3100	2900	3100	3100	3000
капуста білоголова розсадна	3000	3000	2800	3000	3000	2900
морква	2100	2100	1900	2100	2200	2000
буряк столовий	2000	2000	1800	2000	2100	1900
картопля весняного строку садіння	500	500	400	500	500	400
картопля літнього строку садіння	1900	1900	1800	1900	1900	1800
кукурудза на зерно	3100	3100	2900	3100	3100	2900
кукурудза цукрова	1900	1900	1800	1900	1900	1800
кавун	500	500	400	500	500	400
кабачок	1400	1400	1300	1400	1400	1300
буряк цукровий	2700	2700	2600	2700	2700	2600
соя середньо- та пізньостигла	3200	3200	2900	3200	3200	3000

На основі рівняння міждренної відстані складені номограми для визначення основних пара-

метрів дренажних систем за різних умов водонадходження для умов півдня України (рис. 1–4).

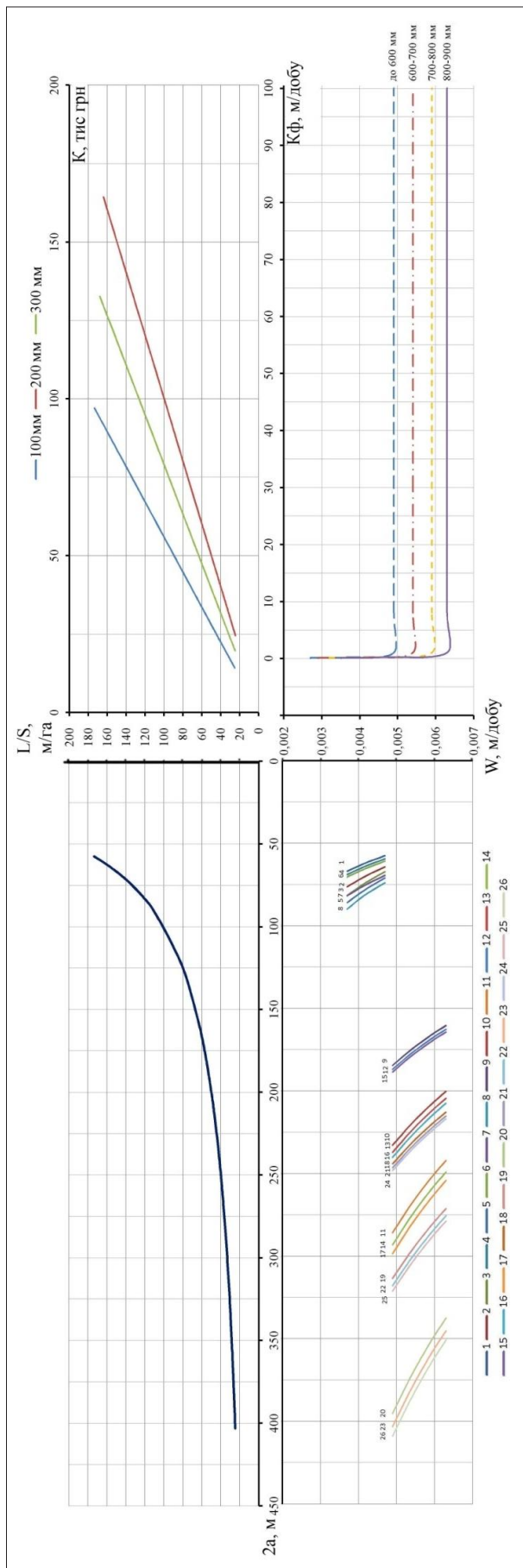


Рис. 1. Номограма для визначення основних параметрів систематичного дренажу недосконалого типу при нормі осушення 1,5 м та глибині закладання дрен 3 м:

де  $K_f$  – коефіцієнт фільтрації ґрунтів; м/добу,  $W$  – інфільтраційне живлення ґрунтів, м/рік;  $2a$  – міждренна відстань, м;  $L/S$  – питома протяжність дрен на 1 га, м/га;  $K$  – капіталовкладення на будівництво системи дренажу на 1 га, тис. грн

1 – Ø 100 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 2 – Ø 100 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 3 – Ø 100 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 4 – Ø 150 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 5 – Ø 150 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 6 – Ø 200 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 7 – Ø 200 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 8 – Ø 200 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 9 – Ø 100 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 10 – Ø 100 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 11 – Ø 100 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 12 – Ø 150 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 13 – Ø 150 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 14 – Ø 150 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 15 – Ø 200 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 16 – Ø 200 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 17 – Ø 200 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 18 – Ø 150 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 19 – Ø 100 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 20 – Ø 100 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 21 – Ø 150 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 22 – Ø 150 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 23 – Ø 150 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 24 – Ø 200 мм,  $T = 5$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 25 – Ø 200 мм,  $T = 10$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 26 – Ø 200 мм,  $T = 20$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу

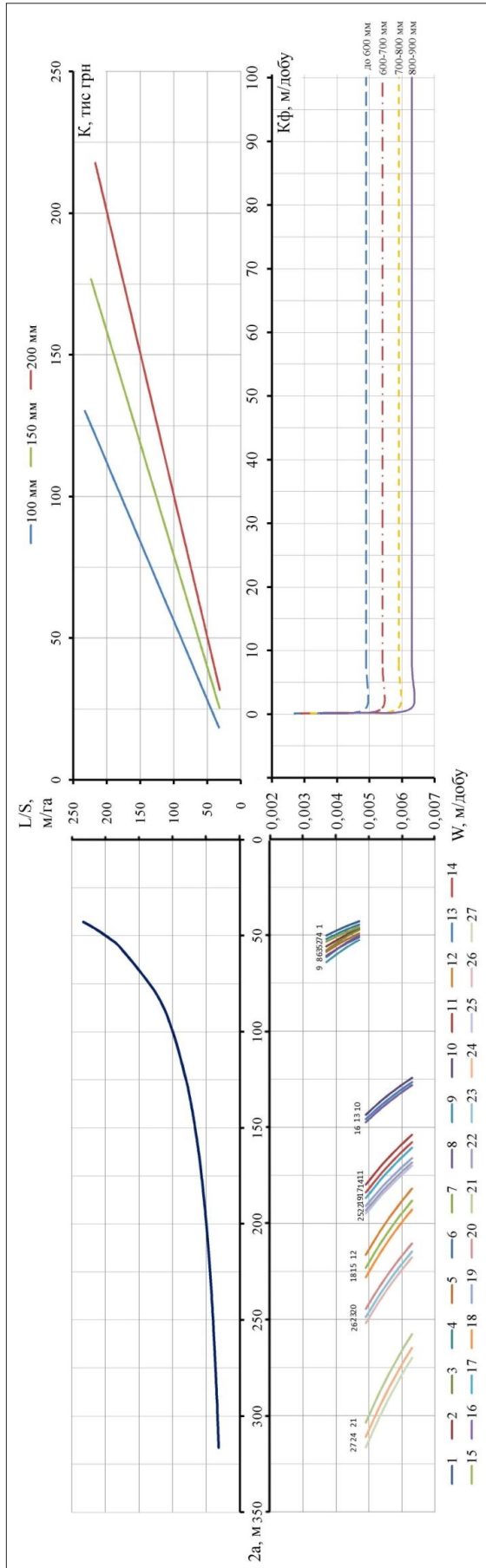


Рис. 2. Номограма для визначення основних параметрів систематичного дренажу недосконалого типу

при нормі осушення 2,0 м та глибини закладання дрени 3 м:  
 де Кф – коефіцієнт фільтрації ґрунтів; м/добу; W – інфільтраційне живлення ґрунтів, м/рік; 2а – міждренна відстань, м; L/S – питома протяжність дрени на 1 га, м/га; К – капіталовкладення на будівництво системи дренажу на 1 га, тис грн

- 1 – Ø 100 мм, Т = 5 м, Кф = 0,4 м/добу; 2 – Ø 100 мм, Т = 10 м, Кф = 0,4 м/добу; 3 – Ø 100 мм, Т = 20 м, Кф = 0,4 м/добу; 4 – Ø 150 мм, Т = 5 м, Кф = 0,4 м/добу; 5 – Ø 150 мм, Т = 10 м, Кф = 0,4 м/добу; 6 – Ø 150 мм, Т = 20 м, Кф = 0,4 м/добу; 7 – Ø 200 мм, Т = 5 м, Кф = 0,4 м/добу; 8 – Ø 200 мм, Т = 10 м, Кф = 0,4 м/добу; 9 – Ø 200 мм, Т = 20 м, Кф = 0,4 м/добу; 10 – Ø 100 мм, Т = 5 м, Кф = 3,0 м/добу; 11 – Ø 100 мм, Т = 10 м, Кф = 3,0 м/добу; 12 – Ø 100 мм, Т = 20 м, Кф = 3,0 м/добу; 13 – Ø 150 мм, Т = 5 м, Кф = 3,0 м/добу; 14 – Ø 150 мм, Т = 10 м, Кф = 3,0 м/добу; 15 – Ø 150 мм, Т = 20 м, Кф = 3,0 м/добу; 16 – Ø 200 мм, Т = 5 м, Кф = 3,0 м/добу; 17 – Ø 200 мм, Т = 10 м, Кф = 3,0 м/добу; 18 – Ø 200 мм, Т = 20 м, Кф = 3,0 м/добу; 19 – Ø 100 мм, Т = 5 м, Кф = 5,0 м/добу; 20 – Ø 100 мм, Т = 10 м, Кф = 5,0 м/добу; 21 – Ø 100 мм, Т = 20 м, Кф = 5,0 м/добу; 22 – Ø 150 мм, Т = 5 м, Кф = 5,0 м/добу; 23 – Ø 150 мм, Т = 10 м, Кф = 5,0 м/добу; 24 – Ø 150 мм, Т = 20 м, Кф = 5,0 м/добу; 25 – Ø 200 мм, Т = 5 м, Кф = 5,0 м/добу; 26 – Ø 200 мм, Т = 10 м, Кф = 5,0 м/добу; 27 – Ø 200 мм, Т = 20 м, Кф = 5,0 м/добу



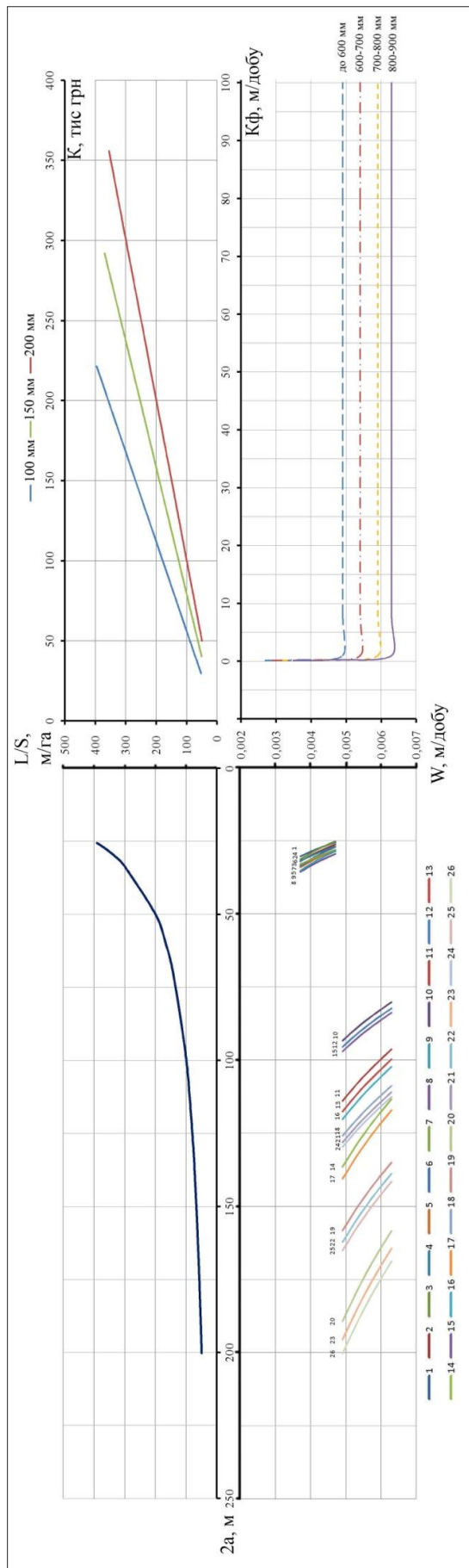


Рис. 3. Номограма для визначення основних параметрів систематичного дренажу недосконалого типу

при нормі осушення 2,5 м та глибині закладання дрен 3 м:

де Кф – коефіцієнт фільтрації ґрунтів; м/добу, W – інфільтраційне живлення ґрунтів, м/рік; 2а – міждренна відстань, м; L/S – питома протяжність дрен на 1 га, м/га; К – капіталовкладення на будівництво системи дренажу на 1 га, тис. грн

- 1 – Ø 100 мм, Т = 5 м, Кф = 0,4 м/добу; 2 – Ø 100 мм, Т = 10 м, Кф = 0,4 м/добу; 3 – Ø 100 мм, Т = 20 м, Кф = 0,4 м/добу; 4 – Ø 150 мм, Т = 5 м, Кф = 0,4 м/добу; 5 – Ø 150 мм, Т = 10 м, Кф = 0,4 м/добу; 6 – Ø 150 мм, Т = 20 м, Кф = 0,4 м/добу; 7 – Ø 200 мм, Т = 5 м, Кф = 0,4 м/добу;
- 8 – Ø 200 мм, Т = 10 м, Кф = 0,4 м/добу; 9 – Ø 200 мм, Т = 20 м, Кф = 0,4 м/добу; 10 – Ø 100 мм, Т = 5 м, Кф = 3,0 м/добу; 11 – Ø 100 мм, Т = 10 м, Кф = 3,0 м/добу; 12 – Ø 150 мм, Т = 5 м, Кф = 3,0 м/добу; 13 – Ø 150 мм, Т = 10 м, Кф = 3,0 м/добу; 14 – Ø 150 мм, Т = 20 м, Кф = 3,0 м/добу;
- 15 – Ø 200 мм, Т = 5 м, Кф = 3,0 м/добу; 16 – Ø 200 мм, Т = 10 м, Кф = 3,0 м/добу; 17 – Ø 200 мм, Т = 20 м, Кф = 3,0 м/добу; 18 – Ø 100 мм, Т = 5 м, Кф = 5,0 м/добу; 19 – Ø 100 мм, Т = 10 м, Кф = 5,0 м/добу; 20 – Ø 100 мм, Т = 20 м, Кф = 5,0 м/добу; 21 – Ø 150 мм, Т = 5 м, Кф = 5,0 м/добу; 22 – Ø 150 мм, Т = 10 м, Кф = 5,0 м/добу; 23 – Ø 150 мм, Т = 20 м, Кф = 5,0 м/добу; 24 – Ø 200 мм, Т = 5 м, Кф = 5,0 м/добу; 25 – Ø 200 мм, Т = 10 м, Кф = 5,0 м/добу; 26 – Ø 200 мм, Т = 20 м, Кф = 5,0 м/добу;

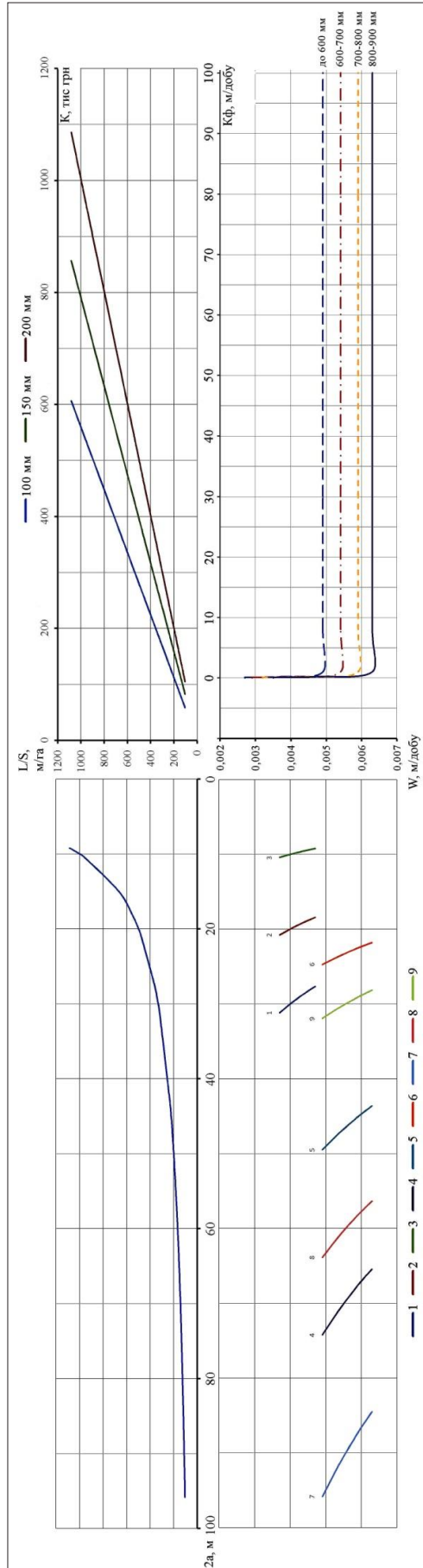


Рис. 4. Номограма для визначення основних параметрів систематичного дренажу досконалого типу при нормі осушення 1,5 м та глибині закладання дрен 3 м:

де  $K_f$  – коефіцієнт фільтрації ґрунтів, м/добу,  $W$  – інфільтраційне живлення системи дренажу на 1 га, тис. грн дрен на 1 га, м/га;  $K$  – капіталовкладення на будівництво системи дренажу на 1 га, тис. грн

1 –  $\emptyset$  100, 150, 200 мм,  $S_0 = 1,5$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 2 –  $\emptyset$  100, 200, 300 мм,  $S_0 = 2,0$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу; 3 –  $\emptyset$  100, 200, 300 мм,  $S_0 = 2,5$  м,  $K_f = 0,4$  м/добу;  
 4 –  $\emptyset$  100, 150, 200 мм,  $S_0 = 1,5$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 5 –  $\emptyset$  100, 200, 300 мм,  $S_0 = 2,0$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу; 6 –  $\emptyset$  100, 200, 300 мм,  $S_0 = 2,5$  м,  $K_f = 3,0$  м/добу;  
 7 –  $\emptyset$  100, 150, 200 мм,  $S_0 = 1,5$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 8 –  $\emptyset$  100, 200, 300 мм,  $S_0 = 2,0$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу; 9 –  $\emptyset$  100, 200, 300 мм,  $S_0 = 2,5$  м,  $K_f = 5,0$  м/добу

Розрахунки виконані для ґрунтів із діапазоном коефіцієнта фільтрації від 0,01 до 30 м/добу, які поширені на основних зрошувальних системах півдня України.

За допомогою номограми можна визначити основні параметри дренажу (міждренна відстань, протяжність польових дрен, діаметр трубопроводів) та вартість будівництва колекторно-дренажної мережі відповідно до природніх, водогосподарських та кліматичних умов.

За розробленими номограмами проаналізовано основні чинники, які впливають на величину міждренної відстані конструкцій горизонтального систематичного дренажу.

Аналіз номограм показав, що основними чинниками, які впливають на відстань між дренами систем недосконалого типу, є коефіцієнт фільтрації, норма осушення та відстань до водоупора. Збільшення діаметрів дрен має незначний вплив на величину відстані між дренами, так при його збільшенні на 50 мм міждренна відстань змінюється до 5%, а капіталовкладення зростають майже у 1,5 рази. При збільшенні інфільтраційного живлення міждренна відстань змінюється в середньому на 5%.

За допомогою номограм можна оперативно виконати розрахунки основних параметрів

дренажу за сучасних умов водонадходження та встановити вартість будівництва системи.

### Висновки

1. За результатами проведених досліджень встановлено, що на дренажних системах півдня України змінилися умови водонадходження (кількість опадів, склад культур, способи та норми зрошення), які вимагають розроблення нових методичних підходів до визначення основних параметрів при відновленні існуючих та будівництві нових систем дренажу.

2. Розроблено методику визначення оптимальних параметрів систем горизонтального систематичного дренажу за допомогою номограм, яка враховує сучасні умови формування водного режиму ґрунтів і може бути використана в проектах реконструкції та модернізації дренажу при реалізації положень «Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року».

3. Дренажні системи з новими оптимальними конструктивно-технологічними параметрами, що відповідають сучасним умовам водонадходження, забезпечать підвищення врожайності сільськогосподарських культур, зменшення ризиків підтоплення та поліпшення водно-екологічної ситуації на зрошуваних та прилеглих до них територіях.

### Бібліографія

1. Абрамов С.К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. Москва, 1967. 239 с.
2. ДБН В. 2.4-1-99. Державні будівельні норми України. Меліоративні системи і споруди. Київ : Держбуд України, 2000. 178 с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016. Національний стандарт України. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 203 с.
4. Колесников В.В. Горизонтальный дренаж почв на юге Украины. Херсон : Айлант, 1998. 306 с.
5. Методические рекомендации по расчетам защиты территорий от подтопления в зоне орошения / А.Я. Олейник и др. Киев : УкрГИПРОВОДХОЗ, 1986. 392 с.
6. Методичні рекомендації для визначення дренажного стоку на зрошуваних землях / Д.П. Савчук, В.В. Кузьмінський, І.В. Бонах. Київ : Укрводпроект, 1992. 57 с.
7. Підсумки натурних досліджень інженерного дренажу / Савчук Д.П. [та ін.]. *Меліорація і водне господарство*. 2019. Вип. № 2. с. 87-95
8. Савчук Д.П., Бабіцька О.А., Малюга В.В. Дренажні системи України. *Водне господарство України*. 2015. № 2. С. 30–31.
9. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року від 14 серпня 2019 р. № 688-р. *Урядовий кур'єр*. 2019. № 170, 6 вересня. С. 13–14.
10. Тимчасові норми водопотреби для краплинного зрошення сільськогосподарських культур в умовах степу України (рекомендації) / Ромащенко М.І. та ін. Київ, 2015. 20 с.
11. Тимчасові районовані норми водопотреби сільськогосподарських культур для зрошення дощуванням (рекомендації) / Жовтоног О.І. [та ін.]. Київ : Аграрна наука, 2015. 24 с.

### References

1. Abramov, S.K. (1967). Podzemnye drenazhy v promyshlennom y horodskom stroytelstve [Underground drainage in industrial and urban construction]. Moskva, 239 p. [in Russian].

2. Melioratyvni systemy i sporudy (2000) [Reclamation systems and structures]. DBN V. 2.4-1-99. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. Kyiv: Derzhbud Ukrainy.
3. Nastanova shchodo inzhenerного захисту території, будивел' i sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia. (2017). [Guidelines engineering protection of the territory, building and structure from water logging and flooding]. DSTU-N B V.1.1-38:2016. Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv : DP UkrNDNTS.
4. Kolesnykov, V.V. (2000). Horyzontalni drenazh pochv na yuhe Ukrainy [Horizontal soil drainage in southern Ukraine]. Kherson : Ailant, 1998. 306 p. [in Russian].
5. Oleunik, A.Ia. et al. (1986). Metodicheskie rekomendacii po raschetam zashchitu territorii ot podtoplennia v zone orosheniia. [Methodical recommendations on calculations of protection of territories from flooding in the irrigation zone]. Kyiv : Minvodhoz USSR, Instytut Hidromekhaniki AN USSR. Ukrghiprovdokhoz [in Russian].
6. Savchuk, D.P., Kuzminskyi, V.V., & Bonakh, I.V. (1992). Metodichni rekomendatsii dlia vyznachennia drenazhnogo stoku na zroshuvanykh zemliakh [Methodical recommendations for determining the drainage runoff on irrigated lands]. Kyiv : Ukrvodproekt.
7. Savchuk, D.P. et al. (2019). Pidsumky naturnykh doslidzhen inzhenerного drenazhu [Results of field observations of engineering drainage efficiency]. Melioratsiia i vodne hospodarstvo, Vyp. № 2. P. 87–95. [in Ukrainian].
8. Savchuk, D.P., Babitska, O.A., Maliuha, V.V. (2015). Drenazhni systemy Ukrainy [Drainage systems of Ukraine]. Vodne hospodarstvo Ukrainy. № 2. P. 30-31. [in Ukrainian]
9. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030.]: Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy № 688-p. (2019, August 14). Uriadovi kurier, 170. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> [in Ukrainian].
10. Romashchenko, M.I. et al. (2015) Tymchasovi normy vodopotreby dlia kraplynnogo zroshennia silskohospodarskykh kultur v umovakh stepu Ukrainy (rekomendatsii) [Temporary norms of water consumption for drip irrigation of agricultural crops in the steppe of Ukraine (recommendations)]. Kyiv. [in Ukrainian].
11. Zhovtonoh, O.I. et al. (2015). Tymchasovi raionovani normy vodopotreby silskohospodarskykh kultur dlia zroshennia doshchuvanniam (rekomendatsii) [Temporary zoned norms of water consumption of agricultural crops for irrigation (recommendations)]. Kyiv : Ahrarna nauka. [in Ukrainian].

**O.A. Babitska, O.I. Kharlamov, D.P. Savchuk, I.V. Kotikovych, G.V. Voropay**  
**Substantiation of optimal parameters of horizontal systematic drainage in modern water management and climatic conditions in the south of Ukraine**

**Abstract.** Changes in the conditions of natural water supply and unsatisfactory technical conditions of horizontal systematic drainage systems have led to their inability to perform the necessary functions in full. In this regard, the issues of determining the optimal parameters of the collector-drainage network (distances between drains, their specific length, and diameters) become relevant. The research work is based on the results of field research on the effectiveness of drainage in the southern region of Ukraine, which includes Ingulets, Kakhovka, North Rogachytisia, Tatarbunary irrigation systems, and the irrigation zone of the North Crimean Canal. Based on the research, a method for determining the optimal parameters of systematic horizontal drainage has been developed and proposed, which takes into account modern precipitation rates, irrigation methods, and irrigation rates for crops. Optimization of drainage parameters is to determine such parameters, having which the capital investment in construction would be minimal while ensuring the groundwater level is below critical depths. Based on the research results when calculating the distance between drains, nomograms were made to determine the main parameters of the systems of systematic horizontal drainage of the perfect and imperfect types under different water conditions. The calculations were performed for the soils with filtration coefficients from 0.01 to 30 m/day. Based on the analysis of nomograms, it was found that the main factors influencing the distance between drains for horizontal drainage systems are filtration coefficient, drainage rate, and distance to impermeable rocks. Nomograms enable to quickly perform calculations of the main parameters of systematic horizontal drainage systems, taking into account modern conditions of water supply and to specify the estimated cost of system construction.

**Key words:** collector-drainage network parameters, horizontal drainage, the distance between drains, groundwater level, flooding, climate change.

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-321>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/321>

УДК 631.67: 63.001.18

## МОНІТОРИНГОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ ПРИ ВИРОЩУВАННІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ «ПОЛИВ ОНЛАЙН»

Т.В. Матяш<sup>1</sup>, канд. техн. наук, М.І. Ромащенко<sup>2</sup>, докт. техн. наук, В.О. Богаєнко<sup>3</sup>, канд. техн. наук, С.А. Шевчук<sup>4</sup>, канд. техн. наук, А.В. Крученюк<sup>5</sup>, Я.О. Бутенко<sup>6</sup>, канд. с.-г. наук

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-1225-086X>; e-mail: [t.v.matiash@gmail.com](mailto:t.v.matiash@gmail.com)

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-9997-1346>; e-mail: [mi.romashchenko@gmail.com](mailto:mi.romashchenko@gmail.com)

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

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0001-5844-4980>; e-mail: [sergey\\_shevchuk\\_@ukr.net](mailto:sergey_shevchuk_@ukr.net)

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-5850-2404>; e-mail: [anatolkru@gmail.com](mailto:anatolkru@gmail.com)

<sup>6</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-1743-7175>; e-mail: [iarynbulba@gmail.com](mailto:iarynbulba@gmail.com)

**Анотація.** У статті проаналізовано результати впровадження інформаційно-аналітичної системи управління зрошенням «Полив Онлайн», що дозволяє оперативно формувати і надавати користувачеві інформацію про поточний та прогностичний стан вологозабезпечення ґрунту, прогнозовані строки та норми поливу. Виконано комплекс робіт із ґрунтового обстеження, який включав аналіз наявної інформації щодо ґрунтово-меліоративних умов та стану використання зрошуваних земель, візуальне ґрунтове обстеження з визначенням точок для детального ґрунтового обстеження, відбір зразків ґрунту та лабораторні дослідження гранулометричного складу, гідрофізичних характеристик ґрунтів та формування вихідних даних для управління поливами. Налаштована система інструментальних моніторингових спостережень за станом вологозабезпечення на реперних полях, поточними метеопараметрами та фактичними строками і нормами поливів дозволяє більш точно прогнозувати строки і норми поливів, проводити їх щоденну корекцію. Опрацьовано методику розповсюдження точкової інформації на зрошувані масиви за допомогою даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). У дослідженні проаналізовано дані супутникових знімків та особливостей відбивної здатності рослин за індексами NDVI та NDWI, їх мінливості та просторової неоднорідності з використанням геоінформаційної платформи ArcGIS. Використання даних ДЗЗ розширює можливості системи в частині розповсюдження даних про строки і норми поливу на поля, не охоплені моніторинговими спостереженнями. Наведені результати використання системи оперативного управління поливами у виробничих умовах. Можливість системи продемонстровано при вирощуванні кукурудзи на зерно та соняшника. Підтверджено, що при застосуванні системи «Полив Онлайн» та підтриманні рівня вологозабезпечення в оптимальному діапазоні, досягається максимально можливий рівень урожайності сільськогосподарських культур у виробничих умовах.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, дощування, інформаційна система, оперативне планування поливів, управління зрошенням.

**Актуальність дослідження.** В умовах істотних змін клімату, насамперед систематичного зростання температури повітря, на більшості сільськогосподарських угідь України формується дефіцит кліматичного водного балансу, що зумовлює зниження сталості землеробства та підвищення ризиків формування несприятливих умов для вирощування всіх сільськогосподарських культур [1].

Для забезпечення сприятливих умов ведення землеробства, адаптації аграрного виробництва

до змін клімату надзвичайно важливою є роль зрошення, як найефективнішого технологічного засобу штучного регулювання водного режиму на сільськогосподарських угіддях і поліпшення умов вологозабезпечення рослин, що вирощуються. Ефективність застосування зрошення напряму залежить від рівня управління технологічним процесом поливу, насамперед від правильності визначення строків та норм поливу, причому не тільки в частині підтримання оптимального для формування

максимального врожаю зрошуваних сільськогосподарських культур діапазону вологозабезпечення кореневого шару ґрунтів, а також і в плані мінімізації негативного впливу зрошення на стан зрошуваних та прилеглих земель, особливо щодо недопущення розвитку таких негативних процесів як підтоплення, вторинне засолення та осолонцювання, іригаційна ерозія, забруднення ґрунтів і ґрунтових вод тощо.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз вітчизняного та міжнародного досвіду щодо сучасних методів управління зрошенням демонструє ефективність у застосуванні для вказаних цілей різного роду інформаційних, інформаційно-аналітичних та інформаційно-дорадчих систем підтримки прийняття рішень (СППР) [2; 3]. За цього найширше використовують СППР, в яких реалізується комплексний підхід, що базується на поєднанні інструментального та розрахункового методів оцінювання та прогнозування рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту в конкретній точці поля і методів дистанційного зондування землі (ДЗЗ) для розповсюдження точкових даних на поля, що не охоплені інструментальними спостереженнями.

Найбільш успішно СППР для управління зрошенням використовують у таких країнах як США, Канада, Німеччина, Ізраїль, Нідерланди, Іспанія, Італія [2–3].

Інформаційно-довідкові системи (платформи), які діють через мережу Інтернет, та містять окремі підсистеми та розділи для надання онлайн консультаційних послуг з управління технологічними процесами у зрошуваному землеробстві з використанням інтегрованих підходів до управління водними та земельними ресурсами на меліорованих територіях, створюють передумови для ефективного використання водних та земельних ресурсів у межах дії меліоративних систем [4–7].

**Мета досліджень.** Опрацювати методологію впровадження інформаційної системи управління зрошенням в умовах конкретного господарства.

**Умови проведення досліджень.** Дослідження проведено в 2021 р. на зрошуваних землях ТОВ «Агротехнології» Нижньосірогозького району Херсонської області на загальній площі 1045 га. Господарство розташоване в зоні дії Каховської зрошувальної системи в межах дії Сірогозького магістрального каналу. Ґрунти господарства представлені чорноземом південним малогумусним на лесовій породі, який знаходиться у комплексі з лучно-чорноземним глеюватим осолоділим ґрунтом на лесовій породі. Гранулометричний

склад ґрунтів коливається від важкосуглинкового до легкоглинистого.

На зрошуваних землях вирощували кукурудзу, сою, соняшник. Спосіб зрошення – дощування широкозахватними дощувальними машинами колової дії типу ДМ «Bauer». Протягом вегетаційного періоду 2021 р. спостерігались умови, характерні для вологого року (20% розрахункової забезпеченості за її дефіцитом). Так, за даними метеорологічного посту, розташованого в с. Нижні Сірогози, що знаходиться на відстані 22 км від ділянки впровадження, за період 10 травня – 15 вересня 2021 р. зафіксовано опади 454,2 мм.

Для управління поливами використовувалася розроблена в Інституті водних проблем і меліорації (ІВПіМ) система управління зрошенням «Полив Онлайн» [8; 9], основною особливістю якої є використання комплексного підходу, що ґрунтується на поєднанні інструментальних, розрахункових та дистанційних методів оцінювання стану вологозабезпечення з використанням потенціалу ґрунтової вологи (всмоктувального тиску) як прямого показника доступності ґрунтової вологи для рослин. Визначення строків і норм поливу проводиться за даними прогнозних (на 5 днів) розрахунків рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту з використанням рівняння вологоперенесення в термінах потенціалу ґрунтової вологи відповідно до динаміки сумарного випаровування, що розраховується декількома методами, відповідно до прогнозів погоди за даними погодних інтернет-сайтів. Зворотний зв'язок і, відповідно, коригування розрахункових строків і норм поливу здійснюється за допомогою системи цифрових датчиків контролю стану вологозабезпечення та кількості опадів і фактичної величини поливної норми, встановлених на спеціально визначених контрольних полях. Поширення інформації на поля, що не обладнані датчиками вимірювання стану вологозабезпечення, відбувається з використанням методів ДЗЗ.

Як вихідні дані для визначення строків і норм поливу використовували найвищу вологоємність (НВ) та передполивні пороги у вигляді відповідних величин всмоктувального тиску, що визначали з основної гідрофізичної характеристики ґрунту (ОГХ) за спеціальною методикою згідно з [10–12] для виділених у результаті ґрунтових обстежень ґрунтових відмін у межах кореневого шару ґрунтів.

Завдання управління поливами вирішували шляхом надання постійних рекомендацій в режимі онлайн щодо строків і норм поливу, які визначались системою «Полив Онлайн» і були

доступними для працівників господарства на створених фахівцями ІВПіМ сайтах.

**Результати досліджень.** У лабораторних умовах на спеціально відібраних при проведенні ґрунтових обстежень монолітах ґрунту за методикою, викладеною в [12], отримані основні гідрофізичні характеристики всіх виділених у межах кореневого шару різновидів ґрунту. З їх використанням для цих ґрунтів визначені НВ, передполивні пороги та рекомендовані величини норм поливу (табл. 1), які надалі використовували в системі «Полив Онлайн» для визначення строків і норм поливу.

Також на початку поливного сезону за результатами ґрунтових обстежень були визначені реперні поля, в межах яких обладнано точки інструментального контролю рівня вологозабезпечення кореневого шару ґрунту з допомогою відкаліброваних за ОГХ датчиків типу Watermark та Sentek. Для зручності сприйняття даних про стан вологозабезпечення його візуалізація здійснювалась із використанням кольорів: зелений – оптимальне зволоження, червоний – недостатнє зволоження, синій – надмірне зволоження.

Оцінювання величини інтенсивності добової та сумарної евапотранспірації виконували розрахунковими методами Іванова і Штойка [17; 18], а також метеостанціями, встановленими у двох точках поля за методом Пенмана-Монтейта [19].

Маємо констатувати, що розбіжність у величині добової інтенсивності евапотранспірації, обчисленої різними методами та для різних

полів, досягала 25%. Дані про інтенсивність евапотранспірації використовували для прогнозування динаміки вологості ґрунту [13; 14]. За цього відсутність датчиків вологості повітря на деяких полях впливала на точність прогнозів. Такі суттєві розбіжності унеможливають апостеріорну оцінку адекватності пропонованих та проведених поливів фактичним метеоумовам та доводять необхідність врахування формування мікроклімату на зрошуваних полях при плануванні системи моніторингу.

Система рекомендує призначити поливи при прогнозованому розрахунковому зниженні вологозабезпечення нижче величини передполивного порога. Проте відповідальність за слідування наданим рекомендаціям лежить на працівниках господарства, які приймають та виконують остаточне рішення про проведення поливу. Так, аналіз динаміки вологості та проведених за сезон поливів показав, що поливи на полі № 15 (рис. 1) відбувались несвоєчасно, тому рослини перебували в стані водного стресу протягом тривалого періоду. У ці моменти часу система надавала рекомендації щодо необхідності термінового поливу (візуальний приклад наведено на рис. 2), проте з певних причин вони не були проведені.

Дані досліджень дозволяють зробити висновок, що для року відповідної природної вологозабезпеченості обсяг поданої рослинам вологи був достатнім, а стан водного стресу, що негативно вплинув на урожайність, сформувався в результаті режиму поливів, що не відповідав динаміці фактичного випаровування в середині поливного сезону.

#### 1. Результати лабораторних визначень водно-фізичних властивостей зразків із ґрунтового профілю

Номер зразка	Інтервал, м	Кінцева щільність складення $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Питома поверхня $S$ , м <sup>2</sup> /г	МГ, %, за масою	ВВ, %, за масою	ВВ, %, за об'ємом	ПВ, %, за об'ємом	НВ, %, за об'ємом	НВ, % за масою	ДАВ=ПВ-ВВ	Гранулометричний клас ґрунту за ВВ
Поля № 11, 15											
10	0,00–0,20	1,40	32,31	8,08	10,82	15,17	54,53	39,47	28,16	39,36	Суглинок важкий
12	0,20–0,40	1,43	34,67	8,67	11,61	16,66	48,40	37,55	26,18	31,74	Суглинок важкий
17	0,40–0,60	1,44	32,49	8,12	10,88	15,69	47,80	33,14	22,99	32,11	Суглинок важкий
Поле № 27											
35	0,00–0,20	1,54	35,86	8,97	12,01	18,55	48,65	42,83	27,73	30,10	Глина
38	0,20–0,40	1,52	38,05	9,51	12,75	19,33	46,39	39,12	25,79	27,05	Глина

\* ПВ – повна вологоємність, ВВ – вологість в'янення, МГ – максимальна гігроскопічність, ДАВ – діапазон активної вологи

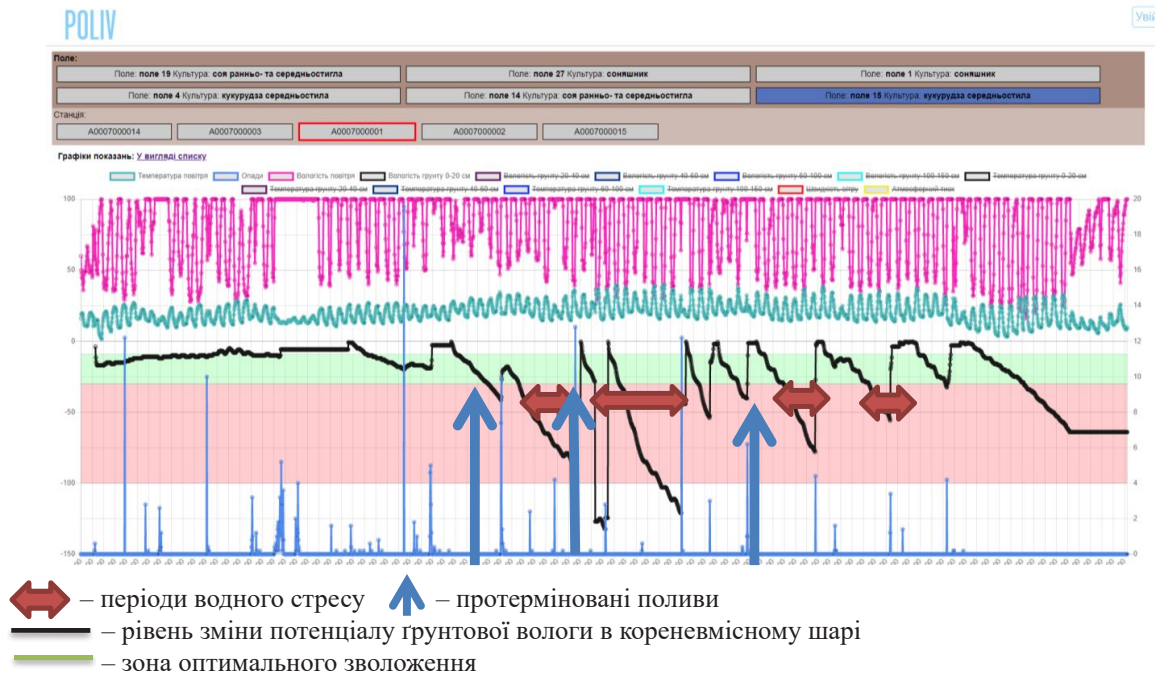


Рис. 1. Приклад відображення узагальненої інформації та її інтерпретація щодо стану вологозабезпеченості кукурудзи на полі протягом вегетаційного сезону

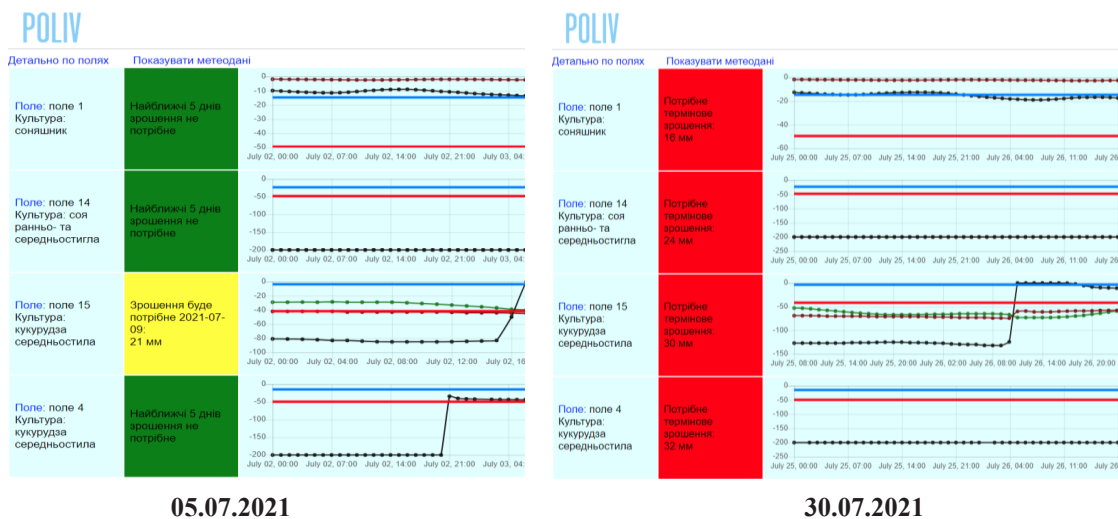


Рис. 2. Приклад інформації щодо поточних онлайн-рекомендацій для проведення поливів та стану вологозабезпеченості на полях №№ 1, 4, 14, 15

Так, згідно з рекомендаціями системи «Полив Онлайн» на початок періоду 05.07.2021 контрольні поля перебували в стані оптимального вологозабезпечення (рис. 2), а станом на 30.07.2021 – на всіх контрольних точках зафіксовано умови водного стресу.

Аналіз виконання рекомендацій в господарстві щодо рівня вологозабезпечення соняшника протягом вегетаційного періоду засвідчив, що на полі № 27, за даними датчиків Sentek, відбувалось тривале перебування сільськогосподар-

ської культури в засушливих і гострозасушливих умовах після 10.07.2021 року (рис. 3).

Дані про стан вологозабезпечення вирощуваних культур на полях, охоплених інструментальними моніторинговими спостереженнями розповсюджували на інші поля у сівзміні (рис. 4).

Основою для поширення цих даних були результати тривалих спостережень з використанням супутникових даних за станом вологозабезпечення ґрунтів та рослин у сівзміні на території дослідного масиву [15].



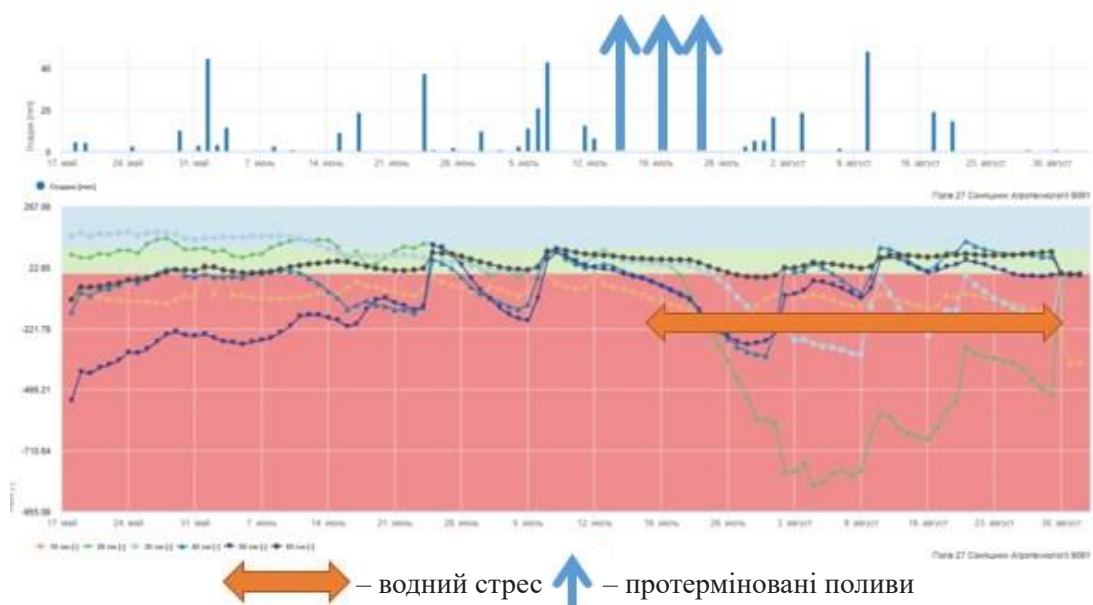


Рис. 3. Відображення узагальненої інформації щодо стану вологозабезпеченості соняшника на полі № 27 протягом вегетаційного сезону за даними датчика Sentek із нанесеними зонами зволоження в 10-сантиметрових шарах у діапазоні 0–60 см

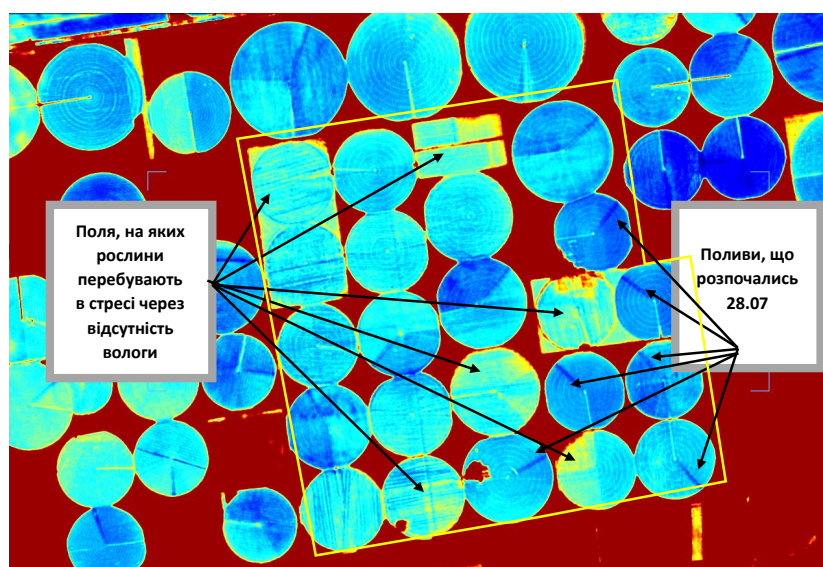


Рис. 4. Розповсюдження точкових даних на масив сівозміни. Поливи, що розпочались 2021–07–28. Рівень стресу: червоний – максимальний, синій – відсутній

Задля цього проаналізовано дані супутникових знімків для виявлення особливостей відбивної здатності рослин за індексом рослинності NDVI, NDWI їх мінливості та просторової неоднорідності з використанням геоінформаційної платформи ArcGIS. Застосований метод дистанційного зондування Землі заснований на порівнянні якісних оцінок біомаси рослин за індексом NDVI та їх наближення до стану водного стресу за індексом NDWI на полях господарства з однаковими ґрунтовими властивостями, на одній частині

яких відсутні, а на іншій – наявні наземні засоби інструментального моніторингу стану вологозабезпечення ґрунтів.

Даними ДЗЗ підтверджено, що більшість культур зазначеної сівозміни перебували в умовах водного стресу. Так, на знімку 28.07.2021 ідентифіковано стресовий стан культур і поливи, що розпочались в цей день. Згідно з робочими характеристиками дощувальних машин та рекомендованою нормою поливу встановлено, що поливи проводили

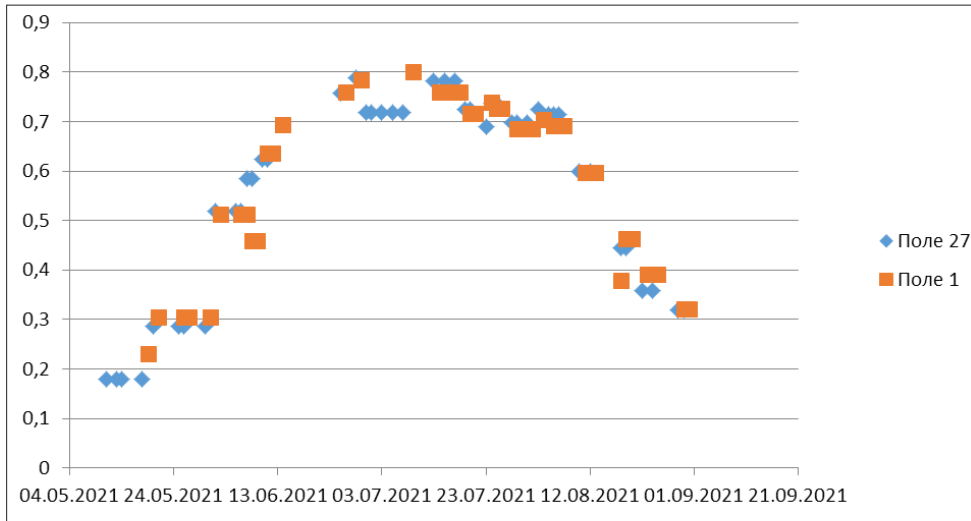


Рис. 5. Динаміка зміни NDVI у точках розміщення метеостанцій при вирощуванні соняшника

тривалістю 3–4 дні на кожний оберт дощувальної машини і не могли одночасно покращити стан культур, що перебували у стані водного стресу.

Для аналізу обрано поля № 4 і № 15 – для кукурудзи та № 1 і № 27 – для соняшника.

Результати аналізу даних ДЗЗ щодо рівня вологозабезпечення соняшника на полі № 1 сівозміни у порівнянні з полем № 27, свідчать, що стан водного стресу сформувався на обох полях після 10.07.2021 р. Динаміка значень NDVI у точках розміщення метеостанцій, де спостерігались найвищі значення цього індексу, подібна для обох полів соняшника, облаштованих датчиками та в цілому по сівозміні на решті полів, зайнятих соняшником (рис. 5). Графік зміни NDVI характеризується стрімким зниженням індексу у фазі розвитку, для яких така динаміка є невласивою згідно, зокрема, з [16]. Так, значення індексу NDVI, очікувано, досягаючи свого максимуму у фазу цвітіння, перебуває на високому рівні після її закінчення (замість очікуваного згідно з [16] зниження), після чого стрімко знижується. Невідповідність спостерігається в період, коли рослини перебувають у стані водного стресу у зв'язку з невиконанням рекомендацій щодо проведення поливів.

На полі кукурудзи № 4 отримано найвищий рівень врожайності в даній сівозміні – 154,24 ц/га. Аналіз показав, що розвиток кукурудзи на полі № 4 мав варіацію, яка знівелювалась у період максимального розвитку (показник NDVI 0,82).

Сезонну динаміку об'ємної вологості кореневмісного шару ґрунту на полі № 15 разом із даними про динаміку опадів та поливів наведено на рис. 6.

Об'ємна вологість для шару ґрунту потужністю 0,5 м розраховувалась на основі показань датчиків Watermark за експериментально визначеною основною гідрофізичною характеристикою (ОГХ) ґрунту.

Виокремлення даних щодо фактичного зрошення від опадів протягом вегетаційного сезону здійснено за різницею показів опадоміра, встановленого в точці спостережень, з показаннями опадоміра, розміщеного на найближчій метеостанції за межами зрошуваних полів. Невідповідність динаміки вологості даним щодо опадів та поливів є наслідком некоректної роботи опадоміра.

Отримані дані аналізувались в контексті відповідності проведених поливів апостеріорно змодельованому сценарію (за допомогою засобів системи «Полив Онлайн») щодо підтримання вологості ґрунту у вузькому діапазоні високої вологості 85–100% НВ (згідно з ОГХ, НВ=35,4%). Відповідний діапазон виділений на рис. 6 кольором.

Так, через суттєві опади вологість на рівні вище НВ трималась до 24 червня, з 6 по 18 липня, з 11 по 14, з 18 по 19 та з 26 по 30 серпня. Модельні розрахунки для цього періоду передбачають проведення більшої кількості поливів, ніж було фактично проведено, оскільки модель не враховує прогнози щодо опадів. При цьому, працівники господарства на такі прогнози зважають та не слідують рекомендаціям у випадку ймовірності дощів. Такий підхід є раціональним у вологий період або коли рослини не перебувають у критичних фазах розвитку, дозволяючи при невеликому ризику водного стресу знизити ризик проведення нераціональних поливів.

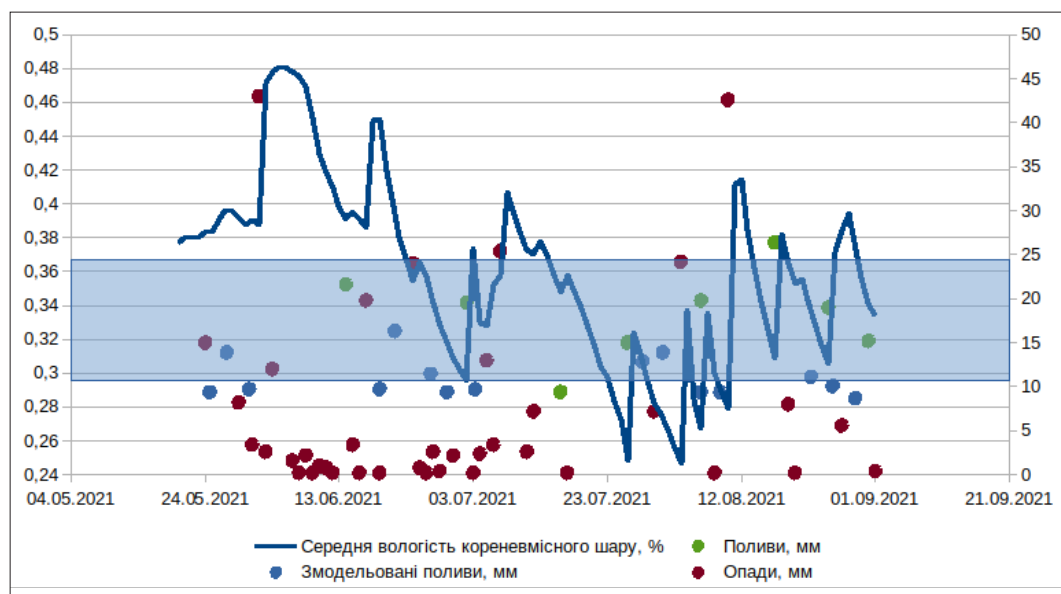


Рис. 6. Динаміка вологості кореневмісного шару ґрунту на полі № 15

Проте у критичні фази він стає проблемним. Так, критичним для формування врожаю було зниження вологості нижче оптимального рівня в період із 24 липня по 10 серпня. Перед проведенням поливу 26 липня вологість була критично низькою протягом 2 днів, перед суттєвими опадами 3 серпня – 4 дні, перед поливом 6 серпня – 1 день, перед суттєвими опадами 10 серпня – 1 день. Зазначимо, що у цей період спостерігались і одні з найвищих за сезон значення евапотранспірації на рівні 4,8 мм/добу, а, згідно з моделлю, поливи мали проводитись меншою нормою та з більшим інтервалом ніж було фактично проведено.

Порівняння фактично проведених у господарстві поливів кукурудзи з показаннями опадомірів на полі зафіксувало некоректні значення поливних норм, що свідчить про комунікаційні проблеми серед співробітників господарства. Майже всі поливи на полі № 15 демонструють значне відхилення від запланованих господарством норм поливу. Це може свідчити про одночасну роботу великої кількості дощувальних машин і неспроможність забезпечення насосною станцією відповідних напорів. Також, при додержанні рекомендацій, наданих системою, з метою недопущення непродуктивних втрат води норма поливу не мала б перевищувати 250–300 м<sup>3</sup> (табл. 2). Загалом, за сезон водоподача відповідала біологічній потребі культур у волозі, але частина продуктивної вологи була втрачена внаслідок неоптимального розподілу вологи протягом сезону, оскільки в деякі періоди спостерігалось

суттєве зниження запасів доступної вологи в кореневому шарі ґрунту за даними всіх типів датчиків та прогнозними розрахунками.

Аналіз результатів виконання рекомендацій з призначення поливів загалом по господарству і в точках встановлення датчиків свідчить про значні відхилення термінів фактично проведених поливів від призначених системою «Полив Онлайн». Найменше відхилення – 4 дні від фактично призначеного терміну, найбільше – понад 10 днів. Майже перед кожним поливом зафіксовано тривале перебування рослин у стані водного стресу. Норми фактично проведених господарством поливів на 15–20% перевищують науково обґрунтовані. Як результат – рівень вологозабезпечення кореневого шару ґрунту не є оптимальним, а урожайність сільськогосподарських культур не досягає максимально можливого рівня.

**Висновки.** 1. Результати впровадження інформаційно-аналітичної системи управління зрошенням «Полив Онлайн» підтвердили її здатність оперативно формувати та надавати користувачеві інформацію про поточний та прогнозний стан (на наступні 5 діб) вологозабезпечення ґрунту на декількох рівнях деталізації.

2. Налаштована система інструментальних моніторингових спостережень за станом вологозабезпечення на реперних полях поточними метеопараметрами та фактичними строками та нормами поливів дозволяє більш точно їх прогнозувати, проводити щоденну корекцію та переглядати історію стану поля за весь час вимірювань.

2. Порівняння фактичної кількості проведених поливів із зафіксованою кількістю поливів в базі метеоданих на полі кукурудзи

Дата	Поливи, плановані господарством, мм	Фактичні показання опадоміра в дні проведення поливів, мм	Дата	Показання опадоміра за сезон, (поливи + опади), мм
15.05.2021	20	12,2	15.05.2021	12,2
24.05.2021	20	15	24.05.2021	15
15.06.2021	30	21,6	03.06.2021	12
02.07.2021	30	19,6	14.06.2021	21,6
16.07.2021	30	12,2	17.06.2021	19,8
26.07.2021	40	15	24.06.2021	24
06.08.2021	40	19,8	02.07.2021	19,6
17.08.2021	40	26,4	05.07.2021	13
25.08.2021	30	19	16.07.2021	12,2
01.09.2021	30	15,2	07.07.2021	25,4
			26.07.2021	15
			03.08.2021	24,2
			06.08.2021	19,8
			10.08.2021	42,6
			17.08.2021	26,4
			25.08.2021	19
			31.08.2021	15,2
<b>Разом</b>	<b>310</b>	<b>176</b>		<b>337</b>

3. Використання даних ДЗЗ, як важливої обов'язкової складової інформаційно-аналітичної системи «Полив Онлайн», розширює можливості системи в частині розповсюдження даних про строки та норми поливу на поля, не охоплені моніторинговими спостереженнями та дозволяє враховувати в рекомендаціях інформацію про фактичний стан розвитку рослин.

4. Аналіз результатів впровадження показав, що ефективне використання СППР, зокрема системи «Полив Онлайн», можливе лише за умови постійної тісної взаємодії між агрономами та гідротехніками господарства в частині забезпечення системи постійною оперативною інформацією про настання фаз розвитку вирощуваних культур; строки та норми проведення поливів на полях, не забезпечених датчиками дощу; строки та умови інших агротехнологічних операцій, проведення яких вимагає коригування строки проведення поливів. При цьому критичною є взаємодія господарства

з організацією, що надає дорадчі послуги з керування зрошенням, в контексті організації мережі наземних спостережень, калібрування та ремонту відповідних сенсорів.

5. Подальше впровадження системи «Полив Онлайн» потребуватиме проведення ґрунтових обстежень на нових масивах зрошення, влаштування мережі моніторингових спостережень на реперних полях за станом вологозабезпечення ґрунтів із використанням переважно датчиків типу Watermark, покращення виконавчої дисципліни в частині неухильного виконання рекомендацій системи «Полив Онлайн» щодо строки і норм поливу, що дозволить більш ефективно використовувати можливість зрошення для підвищення урожайності зрошуваних сільськогосподарських культур за одночасного скорочення витрат води на інфільтрацію, уникнути формування умов водного стресу рослин через низький або надмірний рівень вологозабезпечення кореневого шару ґрунтів.

#### Бібліографія

1. Наукові засади розвитку землеробства у зоні Степу України / М.І. Ромащенко та ін. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 10. С. 5–9.
2. Виробництво польових культур з системою iMetos [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. URL: <https://metos.at/ru/portfolio/row-crops> (дата звернення 26.05.2022).
3. Smith, M., 1992. CROPWAT. A computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No 46.

4. Abioye, E. A., Hensel, O., Esau, T. J., Elijah, O., Abidin, M. S. Z., Ayobami, A. S., Nasirahmadi, A., 2022. Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions. *AgriEngineering*, 4(1), pp. 70–103.
5. Facchi, A., Mayer, A., Ortuani, B., Crema, A., 2022. Can an agro-hydrological model improve the irrigation management of maize under a center pivot? Copernicus Meetings. No. EGU22–8093.
6. El-Sanatawy, A. M., El-Kholy, A. S., Ali, M., Awad, M. F., Mansour, E., 2021. Maize seedling establishment, grain yield and crop water productivity response to seed priming and irrigation management in a Mediterranean arid environment. *Agronomy*, 11(4), 756. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040756>
7. Mhawej, M., Nasrallah, A., Abunnasr, Y., Fadel, A., Faour, G., 2021. Better irrigation management using the satellite-based adjusted single crop coefficient (aKc) for over sixty crop types in California, USA. *Agricultural Water Management*, 256, 107059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107059>
8. Bohaienko, V., Matiash, T., Krucheniuk, A., 2021. Decision Support System in Sprinkler Irrigation Based on a Fractional Moisture Transport Model. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 83. Springer, Cham.
9. Gadzalo, Ya., Romashchenko, M., Kovalchuk, V., Matiash, T., Voitovich O., 2019. Using smart technologies in irrigation management. In International Commission on Irrigation and Drainage, 3rd World Irrigation Forum (WIF3) (pp. 1–6). Id: W.1.3.02.
10. Wassar, F., Gandolfi, C., Rienzner, M., Chiaradia, E. A., Bernardoni, E., 2016. Predicted and measured soil retention curve parameters in Lombardy region north of Italy. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), pp. 207–214.
11. Shokrana, M. S. B., Ghane, E., 2020. Measurement of soil water characteristic curve using HYPROP2. *MethodsX*, 7, 100840.
12. Ромашченко М.І., Коломієць С.С., Білоброва А.С. *Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Меліорація і водне господарство»*. 2019. № 2. С. 199–208.
13. Romashchenko, M.I., Bohaienko, V.O., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., Danylenko, Iu. Iu., 2019. Influence of evapotranspiration assessment on the accuracy of moisture transport modeling under the conditions of sprinkling irrigation in the south of Ukraine. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(10), pp. 1424–1435. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1674445>.
14. Romashchenko, M. I., Bohaienko, V. O., Matiash, T. V., Kovalchuk, V. P., Krucheniuk, A. V., 2021. Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation. *Irrigation Science*, 39(3), pp. 385–396.
15. Вишневський В.І., Шевчук С.А. Використання даних дистанційного зондування Землі у дослідженнях водних об'єктів України. Київ : Інтерпрес ЛТД, 2018. 116 с
16. Herbei, M.V., Sala, F., 2015. Use Landsat image to evaluate vegetation stage in sunflower crops. *AgroLife Scientific Journal*, 4(1), pp. 79–86.
17. Shtoiko D. A., Pisarenko V.A., Bychko O.S., Elazhenko L.I. (1977). Computational methods for determination of total evaporation and irrigation periods of crops. *Irrigation Agriculture*, pp. 3–8.
18. Ivanov, N.N. (1954). Ob opredelenyy velychyn yspariaemosti [On the determination of evaporation values] Moskow : Yzv. ННО, 189–196 [in Russian].
19. Monteith J.L. Evaporation and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symposium of the Society for Experimental Biology. Fogg G.E. (ed). 8–12 September 1964, Swansea. The Company of Biologists : Cambridge. 1965, pp. 205–234.

#### References

1. Romashchenko, M., Tarariko, Yu., Shatkovskyi, A., Saydak, R., Soroka, Yu. (2015). Scientific principles of the development of farming agriculture systems in the zone of Ukrainian Steppe. *Bulletin of Agrarian Science*, 10, 5–9. [in Ukrainian].
2. Production of cereal grains with iMetos® decision supporting system. (2022). URL: <https://metos.at/ru/portfolio/row-crops>
3. Smith, M. (1992). CROPWAT. A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper, No 46.
4. Abioye, E. A., Hensel, O., Esau, T. J., Elijah, O., Abidin, M. S. Z., Ayobami, A. S., Nasirahmadi, A. (2022). Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions. *AgriEngineering*, 4(1), 70–103.

5. Facchi, A., Mayer, A., Ortuani, B., Crema, A. (2022). Can an agro-hydrological model improve the irrigation management of maize under a center pivot? Copernicus Meetings. No. EGU22-8093.
6. El-Sanatawy, A. M., El-Kholy, A. S., Ali, M., Awad, M. F., Mansour, E. (2021). Maize seedling establishment, grain yield and crop water productivity response to seed priming and irrigation management in a Mediterranean arid environment. *Agronomy*, 11(4), 756. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040756>
7. Mhawej, M., Nasrallah, A., Abunnasr, Y., Fadel, A., & Faour, G. (2021). Better irrigation management using the satellite-based adjusted single crop coefficient (aKc) for over sixty crop types in California, USA. *Agricultural Water Management*, 256, 107059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107059>
8. Bohaienko, V., Matiash, T., & Krucheniuk, A. (2021). Decision Support System in Sprinkler Irrigation Based on a Fractional Moisture Transport Model. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 83.
9. Gadzalo, Ya., Romashchenko, M., Kovalchuk, V., Matiash, T., & Voitovich O. (2019). Using smart technologies in irrigation management. In *International Commission on Irrigation and Drainage, 3rd World Irrigation Forum (WIF3)*. Id: W.1.3.02.
10. Wassar, F., Gandolfi, C., Rienzner, M., Chiaradia, E. A., & Bernardoni, E. (2016). Predicted and measured soil retention curve parameters in Lombardy region north of Italy. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 207–214.
11. Shokrana, M. S. B., Ghane, E. (2020). Measurement of soil water characteristic curve using HYPROP2. *MethodsX*, 7, 100840.
12. Romashchenko, M.I., Kolomiets, S.S., Bilobrova, A.S. (2019). Laboratory diagnostic system for water-physical soil properties. *Land Reclamation and Water Management*, 2, 199–208 [in Ukrainian].
13. Romashchenko, M.I., Bohaienko, V.O., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., & Danylenko, Iu. Iu. (2019). Influence of evapotranspiration assessment on the accuracy of moisture transport modeling under the conditions of sprinkling irrigation in the south of Ukraine. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(10), 1424–1435. URL: <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1674445>.
14. Romashchenko, M. I., Bohaienko, V. O., Matiash, T. V., Kovalchuk, V. P., & Krucheniuk, A. V., (2021). Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation. *Irrigation Science*, 39(3), 385–396.
15. Vishnevskiy, V.I., Shevchuk, S.A., 2018. Usage of remote sensing data in the research of water objects of Ukraine (in Ukrainian). Kyiv : Interpress LTD, 116 p.
16. Herbei, M.V., & Sala, F. (2015). Use Landsat image to evaluate vegetation stage in sunflower crops. *AgroLife Scientific Journal*, 4(1), 79–86.
17. Shtoiko, D. A., Pisarenko, V. A., Bychko, O. S., & Elazhenko, L. I. (1977). Computational methods for determination of total evaporation and irrigation periods of crops. *Irrigation Agriculture*, 3–8 [in Ukrainian].
18. Ivanov, N. N. (1954). On the determination of evaporation values. *Yzv. HHO, Moscow*, 189–196. [in Russian].
19. Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. In *Symposia of the society for experimental biology* (Vol. 19, pp. 205–234). Cambridge University Press (CUP) Cambridge.

**T.V. Matiash, M.I. Romashchenko, V.O. Bogaenko,  
S.A. Shevchuk, A.V. Kruchenyuk, Ya.O. Butenko**

**Monitoring and irrigation regime formation  
when growing crops using the “Irrigation Online” system**

**Abstract.** *The paper analyzes the results of the implementation of an information and analytical irrigation management system “Irrigation Online” that enables to quickly generate and provide the users with the information about the current and projected state of soil moisture. A set of soil survey works was performed including the analysis of available information on soil reclamation conditions and irrigated land use; visual soil survey with the identification of points for detailed soil survey; soil sampling and laboratory studies on particle size distribution, hydrophysical soil properties and formation of input data for irrigation management. The configured system of instrumental monitoring observations on moisture supply, current meteorological parameters, and actual irrigation terms and rates allows predicting more accurately irrigation terms and rates in the reference fields as well as making their daily correction. The method*

*of point information dissemination on irrigation arrays using remote sensing data was developed. In the course of research satellite image data and plant reflectivity by the NDVI and NDWI indices along with their variability and spatial heterogeneity using the ArcGIS geoinformation system were analyzed. The use of remote sensing data expands the capabilities of the system in terms of data dissemination on the timing and irrigation rates in the fields, which are out of monitoring observations. The results of the use of the operational irrigation management system in production conditions are given. The achieved results were demonstrated while cultivating corn for grain and sunflower. It was proved that by applying the system “Irrigation Online” and keeping moisture supply in the optimal range the highest possible crop yield can be achieved in production conditions.*

**Key words:** *remote sensing of the Earth, sprinkling, information system, operational irrigation planning, irrigation management.*

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-324>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/324>

УДК 631.675.4:631.674.6

## ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЕВАПОТРАНСПІРАЦІЇ ЗА КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ

О.В. Журавльов<sup>1</sup>, докт. с.-г. наук, А.П. Шатковський<sup>2</sup>, докт. с.-г. наук, В.В. Васюта<sup>3</sup>, докт. с.-г. наук, Ю.О. Черевичний<sup>4</sup>, канд. с.-г. наук, О.А. Марінков<sup>5</sup>, н. с., І.О. Коваленко<sup>6</sup>, аспірант, О.І. Гуленко<sup>7</sup>, аспірант

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0001-7035-219X>; e-mail: zhuravlov\_olexandr@ukr.net

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-4366-0397>; e-mail: andriy-1804@ukr.net

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0001-7786-1843>; e-mail: v.vladvir1@gmail.com

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-9959-8297>; e-mail: yurecgp@gmail.com

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-3606-5522>; e-mail: marinkovoleg995@gmail.com

<sup>6</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0003-1548-3992>; igorok333@ukr.net

<sup>7</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-1007-5677>; gulenkoai@gmail.com

**Анотація.** Встановлено точність розрахункових методів визначення евапотранспірації (ЕТ) кукурудзи на зерно за краплинного зрошення в умовах Степу України. Проведено комплексну оцінку розрахункових методів на предмет формування оптимального водного режиму ґрунту за фазами росту рослин кукурудзи. Точність розрахункової величини евапотранспірації визначали середньою абсолютною відсотковою похибкою – МАРЕ (Mean Absolute Percent Error). Доведено, що застосування розрахункових методів без адаптації до кліматичних умов Півдня України призводить до значної похибки при визначенні фактичної евапотранспірації. За методу Пенмана-Монтейта похибка МАРЕ на рівні 16,3–26,9% відповідає добрій та задовільній точності обраної моделі розрахунку. За використання методів А.М. і С.М. Алпатєєвих та Д.А. Штойка похибка МАРЕ зростала до 22,2–39,7% та 20,8–29,1%, відповідно, що засвідчило їх задовільну точність. Розрахунковий метод М.М. Іванова забезпечив похибку МАРЕ на рівні 48,7–76,8%, або незадовільну точність розрахунку. Адаптовані коефіцієнти культури Кс для умов Півдня України підвищили точність розрахунку ЕТс методом Пенмана-Монтейта в середньому у 2,2 рази, Д.А. Штойка та А.М. і С.М. Алпатєєвих в 1,9 та 2,2 рази, а М.М. Іванова – у 4,4 рази. Аналіз похибки МАРЕ за різних розрахункових методів визначення евапотранспірації кукурудзи на зерно за краплинного зрошення показав, що метод Пенмана-Монтейта забезпечує найменшу похибку (МАРЕ = 9,1%) визначення евапотранспірації, що відповідає високій точності прогнозування. У вологий рік точність визначення ЕТс знижується за всіх методів, що засвідчує зростання похибки МАРЕ: за Пенмана-Монтейта та Д.А. Штойка – до 11,9% та 18,7%, відповідно, а точність визначення знижується до доброї. При розрахунках за методами А.М. і С.М. Алпатєєвих, М.М. Іванова похибка МАРЕ зросла до 23,3% та 21,5%, відповідно, а точність визначення ЕТ була задовільною.

**Ключові слова:** евапотранспірація, розрахункові методи, коефіцієнти культури, похибка МАРЕ, краплинне зрошення.

**Актуальність дослідження.** За глобальних змін клімату в період вегетації сільськогосподарських культур спостерігається доволі істотний негативний вплив погодних умов (зростання температур, зменшення відносної вологості повітря, кількості опадів та ін.), які за низької природної вологозабезпеченості територій не дають можливість реалі-

зувати генетичний потенціал сучасних сортів і гібридів. У зрошуваному землеробстві реалізація цієї задачі потребує ретельного планування і своєчасного оперативного управління водним режимом ґрунту на основі контролю евапотранспірації. Нині існує багато розрахункових методів визначення евапотранспірації, проте вони вимагають адаптації до ґрунтово-



кліматичних умов вирощування, та фаз росту і розвитку культур. Отже, необхідність проведення досліджень зумовлена пошуком оптимального розрахункового методу визначення евапотранспірації з метою підвищення ефективності управління водним режимом ґрунту.

Кукурудза – цінна сільськогосподарська культура, площа посіву якої в Україні складає 5,45 млн га, з яких 0,35 млн га на півдні [1]. Вона належить до сільськогосподарських культур із високим рівнем сумарного водоспоживання: 7000–8000 м<sup>3</sup>/га, відповідно, оцінка добової, або за інший період вегетації, евапотранспірації є важливим елементом щодо оперативного управління режимом зрошення. Світовий досвід і власна практика управління водним режимом ґрунту в зрошуваному землеробстві показують, що доволі надійними, доступними і найбільш дешевими методами управління водним режимом ґрунту є розрахункові методи [2]. Одне з головних питань, за використання розрахункових методів, є вибір методу, який забезпечує оптимальні параметри водного режиму ґрунту у відповідній кліматичній зоні. На сьогодні існує багато розрахункових методів, в основу яких покладено різні математичні залежності, що враховують метеорологічні показники [3]. Тому адекватність обраного методу кліматичним умовам вирощування буде повною мірою відображати процес евапотранспірації і, відповідно, формувати оптимальний водний режим ґрунту.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Евапотранспірація сільськогосподарських культур є важливим чинником при оцінюванні потреби у воді та плануванні зрошення. Дослідження, проведені в Індії (Варанасі, штат Уттар-Прадеш) із порівняння трьох моделей розрахунку евапотранспірації, а саме Doorenbos і Pruitt, Thornthwaite та Soil Plant Atmosphere Water (SPAW) із фактичною евапотранспірацією пшениці, яка вимірювалася за допомогою лізіметра, показали, що модель SPAW краща, ніж два інших методи оцінювання сумарного випаровування [4]. В 2011 р. В. Faybishenko провів теоретичні дослідження та аналіз 13 різних методів розрахунку потенційної евапотранспірації [5]. Проте в цьому дослідженні були використані стандартні методи, без їх попередньої адаптації до конкретних ґрунтово-кліматичних умов. Планування зрошення кукурудзи на основі подвійного коефіцієнта SIMDualKc в Пайсанду (західний Уругвай) підтвердило, що використання відкаліброваних параметрів зводить до мінімуму похибки оцінки вмісту вологи у ґрунті протягом вегетаційного періоду [6]. Дослідженнями, проведеними в різних регі-

онах світу, виявлено високу точність визначення евапотранспірації за рівнянням FAO-56 Пенмана-Монтейта з використанням розробленої на місцевому рівні кривої коефіцієнтів культур (Kc) [7–11]. Проте для його застосування [12] необхідні кліматичні параметри, які не завжди є доступними широкому загалу користувачів. Наразі, за браку метеорологічних показників для рівняння Пенмана-Монтейта, допустимо застосовувати альтернативні методи визначення евапотранспірації. Дослідження [8] показали, що рівняння Turc забезпечують надійний розрахунок і є найбільш придатними для місцевих кліматичних умов Сербії. Для еталонної оцінки евапотранспірації в долині річки Сенегал можливо використовувати рівняння Valiantzas, Trabert, Romanenko, Schendel and Mahringer [9].

**Метою проведеного дослідження було** оцінювання розрахункових методів визначення евапотранспірації (ET) кукурудзи на зерно за краплинного зрошення на предмет формування оптимального водного режиму ґрунту.

**Матеріали і методи дослідження.** Польові експериментальні дослідження проведено протягом 2015–2021 рр. на землях ДП «ДГ «Брилівське» Інституту водних проблем і меліорації НААН (підзона Степу Сухого – клімат помірно жаркий, дуже посушливий) – 46,40° пн.ш. 33,12° сх.д, висота над рівнем моря – 17 м. Ґрунт – темно-каштановий залишково-солонцюватий легкосуглинковий. Дослід проводили з кукурудзою, гібрид ДКС 5276 (FAO 480), яку вирощували за краплинного зрошення на зерно. Кукурудзу висівали в III декаді квітня, сходи отримували в I декаді травня. Фіксували метеорологічні показники інтернет-метеостанцією iMetos®, яку було встановлено безпосередньо на дослідній ділянці. Фактичну евапотранспірацію (ET<sub>a</sub>) кукурудзи визначали за допомогою інтернет-станції вологості ґрунту iMetos® ECOD2, яку обладнали сенсорами вологості ґрунту типу Watermark 200SS [13].

Досліджували чотири методи визначення евапотранспірації:

– Пенмана-Монтейта [12]  $ET_c = Kc \cdot ET_0$ , мм (1)

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 u_2)}, \text{ мм} \quad (2)$$

де  $ET_0$  – еталонна евапотранспірація, мм/доба;  $R_n$  – чиста радіація на поверхні рослин, МДж/м<sup>2</sup>·доба;  $G$  – щільність теплового потоку ґрунту, МДж/м<sup>2</sup>·доба;  $T$  – середньодобова температура повітря на висоті 2 м, °C;

$u_2$  – швидкість вітру на висоті 2 м, м/с;  $e_s$  – тиск насиченої пари, кПа;  $e_a$  – фактичний тиск, кПа;  $\Delta$  – градієнт кривої тиску пари, кПа/°С;  $\gamma$  – психометрична константа, кПа/°С;

– А.М. і С.М. Алпатьєвих [13]  $ET_c = d \cdot K_b$ , мм (3)

$$d = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27-t}{t+237,3}} \cdot \left(1 - \frac{a}{100}\right), \text{ кПа} \quad (4)$$

де  $K_b$  – коефіцієнт біологічної кривої рослини, мм/кПа;  $d$  – дефіцит тиску водяних парів, кПа;  $t$  – температура повітря, °С;  $a$  – відносна вологість повітря, %;  $e$  – основа натурального логарифма,  $e \approx 2,7183$ ;

– Д.А. Штойка [14]  $ET_c = K_{cI} \cdot ET_I$  та  $ET_c = K_{cII} \cdot ET_{II}$  (5, 6)

$$ET_I = \sum t \cdot \left(0,1 \cdot t_c - \frac{a}{100}\right) \div 10, \text{ мм} \quad (7)$$

$$ET_{II} = \sum t \cdot \left(0,1 \cdot t_c + 1 - \frac{a}{100}\right) \div 10, \text{ мм} \quad (8)$$

де  $ET$  – евапотранспірація за період спостереження, мм;  $\sum t$  – сума середньодобових температур повітря за період, °С;  $t_c$  – середньодобова температура повітря за період, °С;  $a$  – середньодобова відносна вологість повітря за період, %; 10 – переводний коефіцієнт з м<sup>3</sup>/га в мм; I – перша розрахункова формула; II – друга розрахункова формула;

– М.М. Іванова [15]  $ET_c = K_c \cdot E_o$ , мм (9)

$$E_o = 0,00006 \cdot (25+t)^2 \cdot (100-a), \text{ мм}, \quad (10)$$

де  $E_o$  – випаровуваність із водної поверхні, мм;  $t$  – середньодобова температура повітря, °С;

$a$  – середньодобова відносна вологість повітря, %; 0,00006 – коефіцієнт для розрахунку випаровуваності за добу.

Для визначення евапотранспірації кукурудзи за різних розрахункових методів використовували експериментально встановлені нами коефіцієнти [10; 17] для відповідного розрахункового методу (табл. 1).

За величину похибки розрахунку прогнозованої величини евапотранспірації нами обрано середню абсолютну відсоткову похибку  $MAPE$  (Mean Absolute Percent Error) [21], яку розраховували за формулою:

$$MAPE = (1/n) \cdot \sum (|ET_a - E_c / E_m a|) \quad (11)$$

де  $n$  – обсяг вибірки;  $ET_a$  – фактична евапотранспірація, мм;  $ET_c$  – розрахункова евапотранспірація.

#### Результати досліджень та їх обговорення.

Роки досліджень відрізнялись за температурним режимом та кількістю опадів, що дозволило порівняти розрахункові методи визначення евапотранспірації, враховуючи відмінності метеорологічних показників (табл. 2).

Метеорологічні показники досліджували за травень – вересень. Забезпеченість року опадами розраховували за період 1945–2021 рр. за даними метеорологічної станції Асканія-Нова [18].

В Україні величину евапотранспірації сільськогосподарських культур, поряд з інструментальними методами, визначають і розрахунковими методами різних авторів: А.М. і С.М. Алпатьєвих, Д.А. Штойка, М.М. Іванова. Останнім часом для визначення

#### 1. Середньодадні коефіцієнти $K_c$ та $K_b$ кукурудзи на зерно за краплинного зрошення

Місяць	Декада	Розрахунковий метод				
		Пенмана-Монтейта	А.М. і С.М. Алпатьєвих	Д.А. Штойка		М.М. Іванова
				1 формула	2 формула	
травень	I	0,26	1,10	0,80	0,34	0,33
	II	0,44	2,20	0,96	0,46	0,50
	III	0,67	3,90	1,17	0,63	0,74
червень	I	0,91	4,80	1,37	0,79	0,97
	II	1,14	6,50	1,57	0,95	1,19
	III	1,33	7,00	1,74	1,08	1,38
липень	I	1,35	6,88	1,76	1,10	1,40
	II	1,35	6,40	1,76	1,10	1,40
	III	1,29	6,00	1,68	1,05	1,34
серпень	I	1,01	4,17	1,31	0,82	1,04
	II	0,71	3,10	0,92	0,57	0,72
	III	0,40	1,40	0,50	0,31	0,39
вересень	I	0,16	0,72	0,19	0,11	0,13

## 2. Метеорологічні показники за роки досліджень (травень-вересень)

Рік	Кількість опадів, мм	Забезпеченість року опадями, %		Середня температура повітря, °С
2015	209,0	34,5	середньовологий	21,3
2016	216,8	31,9	середньовологий	21,1
2017	107,1	93,9	сухий	21,4
2018	124,2	87,5	середньосухий	22,2
2019	190,2	42,2	середній	21,7
2020	165,2	57,8	середній	20,9
2021	479,6	1,0	вологий	20,6

евапотранспірації широко застосовується метод Пенмана-Монтейта. Для перевірки адекватності цих методів, при управлінні водним режимом ґрунту за краплинного зрошення, нами були проведені дослідження з визначення евапотранспірації інструментальними та розрахунковими методами. На першому етапі досліджень було визначено евапотранспірацію кукурудзи за цими розрахунковими методами (табл. 3) без експериментально встановлених коефіцієнтів культури. За розрахункового методу А.М. і С.М. Алпатьєвих використовували  $K_6$  який було встановлено раніше [19]. Метод Д.А. Штойка використовували відповідно до рекомендацій Писаренка В.А. [20]. Коефіцієнт культури  $K_c$  за методом Пенмана-Монтейта приймали за рекомендаціями ФАО [12].

Дослідженнями встановлено, що застосування розрахункових методів без їх адаптації до кліматичних умов Півдня України призводить до значної похибки при визначенні евапотранспірації. Так, за методу Пенмана-Монтейта похибка  $MAPE$  за роки досліджень була в межах 16,3–26,9%, що відповідає добрій та задовільній точності обраної моделі [22]. Гранична похибка  $MAPE$  за розрахунку методами Алпатьєвих та Штойка знаходилась у межах 22,2–39,7% та 20,8–29,1%, відповідно, що вказує на задовільну

точність цих моделей розрахунку евапотранспірації. Використання методу М.М. Іванова забезпечує похибку  $MAPE$  на рівні 48,7–76,8%, що відповідає незадовільній точності розрахунку евапотранспірації.

Найбільша похибка  $MAPE$  при розрахунку евапотранспірації за роками досліджень спостерігалася у вологому 2021 р., яка за методів Пенмана-Монтейта, Алпатьєвих та Іванова становила 26,6, 39,7 та 76,8%, відповідно. Найменша похибка  $MAPE$  за методу Алпатьєвих була в сухому 2017 р. та середньосухому 2018 р., яка відповідно становила 22,2% і 23,2%. За інших методів зв'язку між найменшою похибкою  $MAPE$  та роком забезпеченості опадями не було виявлено. Аналіз середньорічної абсолютної похибки показав, що її використання не відображає точності розрахункового методу, оскільки абсолютна похибка для методу Пенмана-Монтейта у 2016 р. становила 2,3 мм (табл. 4).

Більш детальним аналізом помилок встановлено, що за період з III декади червня по I декаду липня за цим методом спостерігався дефіцит вологи в 36 мм, а в інший період перезволоження – 38,3 мм. (табл. 5).

Подібна тенденція розподілу абсолютної похибки розрахунку евапотранспірації притаманна і для інших методів.

3. Фактична ( $ET_a$ ) та розрахункова ( $ET_c$ ) евапотранспірація кукурудзи на зерно без урахування експериментально встановлених коефіцієнтів

Рік	$ET_a$ кукурудзи, мм	Розрахунковий метод визначення $ET_c$			
		Пенмана-Монтейта	Алпатьєвих	Штойка	Іванова
2015	572,4	598,7	430,1	545,9	666,1
2016	539,2	541,6	398,8	540,5	573,1
2017	597,5	608,8	487,8	550,9	701,0
2018	619,5	613,2	523,1	607,1	784,9
2019	594,7	568,4	466,4	572,2	674,1
2020	565,2	578,6	467,4	538,3	672,5
2021	513,5	495,2	316,5	499,6	477,8
ср.	571,7	572,1	441,4	550,6	649,9

4. Похибки визначення евапотранспірації за різних розрахункових методів без врахування експериментально встановлених коефіцієнтів

Рік	Розрахунковий метод							
	Пенмана-Монтейта		Алпатьєвих		Штойка		Іванова	
	MAPE, %	абс., мм	MAPE, %	абс., мм	MAPE, %	абс., мм	MAPE, %	абс., мм
2015	19,1	-26,4	36,1	142,0	27,4	25,0	75,1	-95,1
2016	20,1	-2,3	30,6	140,1	20,8	-2,7	48,7	-35,3
2017	20,5	-12,1	22,2	110,3	26,6	45,9	67,3	-102,8
2018	18,0	6,0	23,2	98,1	25,0	11,6	73,8	-165,7
2019	16,3	26,2	29,8	127,9	26,6	20,4	58,2	-85,5
2020	23,1	-13,3	28,0	98,4	29,1	26,1	73,1	-107,9
2021	26,9	17,2	39,7	195,2	23,9	11,3	76,8	32,5

5. Середньодакні абсолютні похибки за різних розрахункових методів без врахування експериментально встановлених коефіцієнтів, мм (2016 р.)

дата		Розрахунковий метод			
		Пенмана-Монтейта	Алпатьєвих	Штойка	Іванова
травень	I	-5,6	-1,9	-2,1	-16,1
	II	-5,0	4,0	1,5	-14,1
	III	-4,8	8,2	2,4	-17,2
червень	I	-4,5	12,7	12,0	-4,9
	II	-2,8	15,8	10,6	-11,0
	III	10,5	20,9	1,0	1,0
липень	I	0,4	15,9	3,0	3,0
	II	9,9	21,9	5,0	5,0
	III	11,3	25,9	5,2	5,2
серпень	I	4,0	16,1	7,1	-19,3
	II	-1,3	13,1	1,0	-22,3
	III	-6,2	-3,1	-23,5	-50,4
вересень	I	-8,2	-9,4	-25,8	-47,0
середнє за рік		-2,3	140,1	-2,7	-35,3

Взагалі видно, що розрахункові методи визначення евапотранспірації рослин дозволяють встановлювати витрати вологи з певною точністю і, відповідно, в межах цієї точності формувати режим зрошення. Усе-таки більш точне регулювання водного режиму ґрунту потребує визначення коефіцієнтів, які враховують біологічні особливості росту і розвитку сільськогосподарських культур для кожного розрахункового методу.

Для визначення точності методу розрахунку евапотранспірації кукурудзи на зерно було досліджено її фактичну евапотранспірацію. *ETc* кукурудзи обчислювали різними методами, враховуючи експериментально встановлені нами раніше коефіцієнти культур та порівнювали її з фактичною *ETa* (табл. 6).

За роки досліджень похибка *MAPE* для методу Пенмана-Монтейта знаходилась

у межах 8,1–11,9% (табл. 7). Слід зазначити, що найбільші величини похибки 9,5% і 11,9% спостерігалися, відповідно, в сухому 2017 р. та вологому 2021 р.. В інші роки спостережень похибка *MAPE* для методу Пенмана-Монтейта знаходилась у межах 8,1–8,7% (менше ніж 10%, що відповідає високій точності прогнозування). Абсолютна похибка за період досліджень для методу Пенмана-Монтейта не залежала від року забезпеченості опадами та становила від -29,3 до 20 мм. Найбільша її величина - 29,3 мм спостерігалось у середньовологому 2015 р.

Найменша величина похибки *MAPE* 8,4% за методу Алпатьєвих зафіксована у 2015 р., за абсолютної - 25 мм. В інші роки досліджень, крім вологого 2021 р., похибка *MAPE* була в межах 11,9–19,9% (*MAPE*=10–20%, добра точність прогнозування). Абсолютна похибка за цей період коливалась від -48,5 мм до 15,3 мм.

6. Фактична (*ETa*) та розрахункова (*ETc*) евапотранспірація кукурудзи на зерно з врахуванням експериментально встановлених коефіцієнтів

Рік	<i>ETa</i> кукурудзи, мм	Розрахунковий метод визначення <i>ETc</i>				
		Пенмана- Монтейта	Алпатьєвих	Штойка 1	Штойка 2	Іванова
2015	572,4	601,7	547,4	558,2	547,9	584,7
2016	539,2	548,4	523,9	561,6	555,2	536,5
2017	597,5	618,3	646,0	587,2	568,3	668,4
2018	619,5	609,3	662,2	623,9	594,1	677,8
2019	594,7	574,7	607,3	596,7	575,7	618,6
2020	565,2	585,8	604,7	562,4	551,6	622,7
2021	513,5	499,7	405,7	525,7	530,6	422,6
ср.	571,7	576,8	571,0	573,7	560,5	590,2

7. Похибки визначення евапотранспірації за різних розрахункових методів із врахуванням експериментально встановлених коефіцієнтів

Рік	Пенмана- Монтейта		Алпатьєвих		Штойка 1		Штойка 2		Іванова	
	<i>MAPE</i> , %	абс., мм	<i>MAPE</i> , %	абс., мм	<i>MAPE</i> , %	абс., мм	<i>MAPE</i> , %	абс., мм	<i>MAPE</i> , %	абс., мм
2015	8,7	-29,3	8,4	25,0	9,6	14,2	9,3	24,5	13,2	-12,3
2016	8,5	-9,2	17,1	15,3	9,9	-22,4	8,9	-16,0	12,1	2,7
2017	9,5	-20,8	13,6	-48,5	11,4	10,3	7,6	29,2	12,3	-70,9
2018	8,1	10,2	19,9	-42,7	13,2	-4,4	10,9	25,4	19,3	-58,3
2019	8,3	20,0	16,7	-12,6	8,2	-2,0	8,8	19,0	13,2	-23,9
2020	8,7	-20,6	11,9	-39,5	12,1	2,8	11,1	13,6	15,8	-57,5
2021	11,9	13,8	23,3	107,8	18,7	-12,2	17,4	-17,1	21,5	90,9

У вологому 2021 р. похибка *MAPE* сягала 23,3% (*MAPE* = 20–50%, задовільна точність прогнозування), а абсолютна – 107,8 мм.

За розрахункового методу Д.А. Штойка за роки досліджень, крім 2021 р. похибка *MAPE* становила 8,2–13,2%, а абсолютна коливалась від -2,0 мм до 29,2 мм залежно від розрахункової формули. У 2021 р. похибка *MAPE* для 1 розрахункової формули методу Д.А. Штойка становила 18,7%, а для 2 формули – 17,4%, абсолютні похибки відповідно -12,2 та -17,1 мм. Найбільша похибка *MAPE* 21,5% для розрахункового методу М.М. Іванова спостерігалась у 2021 р., а абсолютна – 90,9 мм. В інші роки досліджень похибки *MAPE* для методу М.М. Іванова були в межах 12,1–19,3%, а абсолютні похибки – від 2,7 мм до -70,9 мм.

Застосування в розрахункових методах експериментально встановлених коефіцієнтів Кс для умов Півдня України також дозволило зменшити середньодадні абсолютні похибки розрахунку *ETc* (табл. 8).

Так, в умовах 2016 р. за використання методу Пенмана-Монтейта середньорічна абсо-

лютна похибка становила -8,7 мм. За період із III декади червня по I декаду липня за цим методом абсолютна похибка склала 2,3 мм, що на 33,7 мм менше за аналогічний період при розрахунку *ETc* без врахування експериментально встановлених коефіцієнтів.

Результатами досліджень підтверджено, що застосування адаптованих коефіцієнтів культури Кс для умов Півдня України підвищує точність розрахункових методів майже у 2 рази. Так, за методу Пенмана-Монтейта точність розрахунків, у середньому за роки досліджень, підвищилась у 2,2 раза (табл. 9), з доброї точності визначення *ETc* до високої [22]. За використання методів Штойка та Алпатьєвих точність розрахунку зросла в 1,9 та 2,2 рази, відповідно, тобто із задовільної до доброї точності розрахунку *ETc*. Запровадження в розрахункову формулу М.М. Іванова адаптованого коефіцієнта культури дозволило підвищити точність цього методу в 4,4 рази.

**Висновки.** Аналіз похибки *MAPE* для різних розрахункових методів визначення

8. Середньодекадні абсолютні похибки за різних розрахункових методів із врахуванням експериментально встановлених коефіцієнтів, мм (2016 р.)

Місяць / декада	Розрахунковий метод					
	Пенмана-Монтейта	Алпатьєвих	Штойка		Іванова	
			I формула	II формула		
травень	I	-0,4	2,6	-0,3	-1,0	-0,1
	II	-1,0	5,9	2,0	0,4	4,0
	III	-2,8	4,7	-0,8	-2,8	4,5
червень	I	-5,2	8,5	6,3	1,7	5,7
	II	-6,3	1,5	-6,4	-8,5	7,3
	III	2,4	-7,3	-9,3	-5,3	3,6
липень	I	-7,1	-1,9	-1,1	-2,7	-2,3
	II	1,5	-1,4	-5,7	-2,2	-2,5
	III	3,7	-7,5	-2,9	1,1	-12,3
серпень	I	1,8	-1,9	-9,8	-4,3	-10,6
	II	1,4	6,6	4,3	4,8	3,3
	III	2,6	6,4	0,7	2,0	2,0
вересень	I	0,8	-0,9	0,8	1,1	-0,4
Середнє за рік		-8,7	15,3	-22,1	-15,6	2,1

9. Середня відсоткова похибка (MAPE) за роки досліджень для різних методів визначення евапотранспірації кукурудзи на зерно

Розрахунковий метод визначення $ET_c$	Без урахування коефіцієнтів	З врахуванням експериментально встановлених коефіцієнтів
Пенмана-Монтейта	20,6	9,1
А.М та С.М. Алпатьєвих	29,9	15,8
Штойка – I формула	25,6	11,9
Штойка – II формула		10,6
М.М. Іванова	67,6	15,3

евапотранспірації кукурудзи на зерно за краплинного зрошення показав, що метод Пенмана-Монтейта забезпечує найменшу похибку ( $MAPE = 9,1\%$ ) визначення  $ET$ , що відповідає високій точності прогнозування. Інші розрахункові методи в класифікації  $MAPE$  засвідчили добру точність прогнозування.

За відсутності можливості використовувати метод Пенмана-Монтейта в зоні Степу допустимо використовувати в цій зоні адаптований метод Д.А. Штойка, точність розрахунків

якого становить 11,9 та 10,6% відповідно для I та II розрахункової формули.

У вологий рік точність визначення  $ET_c$  знижується за всіх методів, що засвідчує зростання похибки  $MAPE$ : за Пенмана-Монтейта та Д.А. Штойка – до 11,9% та 18,7%, відповідно, а точність визначення знижується до доброї. За методів: А.М. і С.М. Алпатьєвих, М.М. Іванова похибка  $MAPE$  зросла до 23,3% та 21,5%, відповідно, а точність визначення  $ET$  була задовільною.

### Бібліографія

1. Посівні площі сільськогосподарських культур за їх видами у 2021 році. *Державна служба статистики України*. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 01.05.2022).
2. Farg E., Arafat S.M., Abd El-Wahed M.S. El-Gindy A.M. Estimation of Evapotranspiration  $ET_c$  and Crop Coefficient  $K_c$  of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2012. Vol. 15. P. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.02.001>
3. Ромащенко М.І., Шатковський А.П., Рябков С.В. Краплинне зрошення овочевих культур і картоплі в умовах Степу України. Київ : ТОВ «ДІА», 2012. С. 248.

4. Mall R. K., Gupta B.R.D. Comparison of evapotranspiration models. *Mausam*. 2002. Vol. 53(2). P. 119–126. DOI: <https://doi.org/10.54302/mausam.v53i2.1627>
5. Faybishenko B.O. (2012). Fuzzy-Probabilistic Calculations of Evapotranspiration. In (Ed.), *Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling*. *IntechOpen*. DOI: <https://doi.org/10.5772/18087>
6. Giménez L., Petillo M.G., Paredes P., Pereira L.S. Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. *Water*. 2016. Vol. 8. 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8070309>
7. Lopez-Urrea R., Santa O.F., Fabeiro C., Moratalla A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. 2006. Vol. 85. P. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.014>
8. Trajkovic S., Kolakovic S. Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions. *Water Resour Manage*. 2009. Vol. 23. 3057. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9423-4>
9. Djaman K., Balde A.B., Sow A., Muller A.B., Irmak S., N'Diaye M.K. Manneh B., Moukoumbi Y.D., Futakuchi K., Saito K. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley / *J. Hydrol. Reg. Stud.* 2015. Vol. 3. P. 139–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.002>
10. M. Romashchenko, A. Shatkowski, O. Zhuravlev. Features of application of the «Penman – Monteith» method for conditions of a drip irrigation of the Steppe of Ukraine (on example of grain corn). *Journal of Water and Land Development*. 2016. Vol. 31. P. 123–127 DOI: <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0043>
11. Djaman K., O'Neill M., Owen C.K., Smeal D., Koudahe K., West M., Allen S., Lombard K., Irmak S. Crop Evapotranspiration, Irrigation Water Requirement and Water Productivity of Maize from Meteorological Data under Semiarid Climate. *Water*. 2018. Vol. 10. 405. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10040405>
12. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO. 1998. URL: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm> (дата звернення: 02.05.2022)
13. Шатковський А.П., Журавльов О.В. Управління краплинним зрошенням на основі використання інтернет-метеостанцій iMetos®. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2016. № 2 (59). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/6489/6373> (дата звернення: 02.05.2022).
14. Алпатьев С.М. О методах расчета потребности в воде культурных фитоценозов в связи с развитием орошения в СССР. *Биологические основы орошаемого земледелия*. Москва : Наука. 1974. С. 85–89.
15. Розрахункові методи визначення сумарного випаровування і строків поливу сільськогосподарських культур / Штойко Д.А. та ін. *Зрошуване землеробство*. 1977. Вип. 22. С. 3–11.
16. Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости. *Известия ВГО*. 1954. № 2. Т 86. С. 189–196.
17. Журавльов О.В. Науково-практичне обґрунтування методів управління водним режимом ґрунту в зрошуваних умовах : автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук : 06.01.02 «Сільськогосподарські меліорації». Київ: ІВПіМ НААН, 2021. 46 с. URL: [https://drive.google.com/file/d/1RqzzNy7hKextVs00MXgQnwfC3\\_EN\\_9xt/view](https://drive.google.com/file/d/1RqzzNy7hKextVs00MXgQnwfC3_EN_9xt/view) (дата звернення: 05.05.2022).
18. Український гідрометеорологічний центр. Кліматичні дані по м. Асканія-Нова за період з 1899 року URL: [https://meteo.gov.ua/ua/33915/climate/climate\\_stations/159/24](https://meteo.gov.ua/ua/33915/climate/climate_stations/159/24) (дата звернення: 25.04.2022).
19. Горянский М.М. Методика полевого опыта на орошаемых землях. Киев : Изд. Урожай, 1970. 86 с.
20. Писаренко В.А., Горботенко Е.М., Йокич Д.Р. Режимы орошения сельскохозяйственных культур. Киев : Урожай, 1988. 96 с.
21. Shcherbakov, M.V., Brebels, A., Shcherbakova, N.L., Tyukov, A.P., Janovsky, T.A., Kamaev, V. Ae. A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 24. P. 171–176. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.80032>
22. Сак А.В. Прогнозирование и планирование экономики. Минск : БГУИР, 2006. 209 с.

## References

1. Posivni ploshchi silskohospodarskykh kultur za yikh vydamy u 2021 rotsi [Sown areas of agricultural crops by their types in 2021]. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
2. Farg, E., Arafat, S.M., Abd El-Wahed, M.S., & El-Gindy, A.M. (2012). Estimation of Evapotranspiration ET<sub>c</sub> and Crop Coefficient K<sub>c</sub> of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Vol. 15, 83–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.02.001>
3. Romashchenko, M.I., Shatkovskyi, A.P., & Ryabkov, S.V. (2012). Kraplynne zroshennya ovochevykh kul'tur i kartopli v umovakh Stepu Ukrayiny [Drip irrigation of vegetable crops and potatoes in the steppe of Ukraine]. Kiev : TOV «DIA» [in Ukrainian].
4. Mall, R. K., & Gupta, B. R. D. (2002). Comparison of evapotranspiration models. *Mausam*, Vol. 53(2), 119–126 DOI: <https://doi.org/10.54302/mausam.v53i2.1627>
5. Faybishenko, B.O. (2012). Fuzzy-Probabilistic Calculations of Evapotranspiration. In (Ed.). *Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling*. IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/18087>
6. Giménez, L., Petillo, M.G., Paredes, P., & Pereira, L.S. (2016). Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. *Water*, Vol. 8, 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8070309>
7. Lopez-Urrea, R., Santa, O.F., Fabeiro, C., & Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, Vol. 85, 15–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.014>
8. Trajkovic, S., & Kolakovic, S. (2015). Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions. *Water Resour Manage*, Vol. 23, 3057. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9423-4>
9. Djaman, K., Balde, A.B., Sow, A., Muller, A.B., Irmak, S., N'Diaye, M.K., Manneh, B., Moukoubi, Y.D., Futakuchi, K., & Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *J. Hydrol. Reg. Stud*, Vol. 3, 139–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.002>
10. Romashchenko, M., Shatkowski, A., & Zhuravlev, O. (2016). Features of application of the «Penman – Monteith» method for conditions of a drip irrigation of the Steppe of Ukraine (on example of grain corn). *Journal of Water and Land Development*, Vol. 31, 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0043>
11. Djaman, K., O'Neill, M., Owen, C.K., Smeal, D., Koudahe, K., West, M., Allen, S., Lombard, K., & Irmak, S. (2018). Crop Evapotranspiration, Irrigation Water Requirement and Water Productivity of Maize from Meteorological Data under Semiarid Climate. *Water*, Vol. 10, 405. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10040405>
12. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome : FAO. Retrieved from: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
13. Shatkovskyi, A.P., & Zhuravlov, O.V. (2016). Upravlinnya kraplynnym zroshennyam na osnovi vykorystannya internet-meteostantsiy iMetos® [Drip irrigation management based on the use of iMetos® Internet Weather Stations]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrayiny*, Vol. 2 (59). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/6489/6373> [in Ukrainian].
14. Alpatiev, S.M. (1974). O metodakh rascheta potrebnosti v vode kul'turnykh fitotsinozov v svyazi s razvityem orosheniya v SSR [On methods for calculating the water demand of cultural phytocenoses in connection with the development of irrigation in the Soviet Socialist Republic]. *Biologicheskiye osnovy oroshayemogo zemledeliya*, Vol. 1, 85–89. [in Russian].
15. Shtoiko, D.A., Pisarenko, V.A., Bychko, O.S., & Elazhenko, L.I. (1977). Rozrakhunkovi metody vyznachenniya sumarnoho vyparovuvannya i strokiv polyvu sil's'kohospodars'kykh kul'tur [Calculation methods for determining the total evaporation and watering dates of crops]. *Zroshuvane zemlerobstvo*, Vol. 22, 3–11. [in Ukrainian]
16. Ivanov, N.N. (1954). Ob opredelenii velichin isparuyemosti [On the determination of evaporation values]. *Izvestiya VGO*, Vol. 2 (86), 189–196. [in Russian].
17. Zhuravlov, O.V. (2021). Naukovo-praktychne obgruntuvannya metodiv upravlinnya vodnym rezhymom gruntu v zroshuvanykh umovakh [Scientific and practical substantiation of methods of soil water regime management in irrigated conditions]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kiev : IWPiM NAAS. URL: [https://drive.google.com/file/d/1RqzNy7hKextVs00MXgQnwfC3\\_EN\\_9xt/view](https://drive.google.com/file/d/1RqzNy7hKextVs00MXgQnwfC3_EN_9xt/view) [in Ukrainian]



18. Ukrainian Hydrometeorological Center. (2021). Klimatychni dani po m. Askaniya-Nova za period z 1899 roku [Climate data for Askaniya-Nova for the period from 1899]. Kiyv. URL: [https://meteo.gov.ua/en/33902/climate/climate\\_stations/159/24/](https://meteo.gov.ua/en/33902/climate/climate_stations/159/24/) [In Ukrainian].
19. Goryanskiy, M.M. (1970). Metodika polevogo opyta na oroshayemykh zemlyakh [Methodology of field experiment on irrigated lands]. Kiyv : Izd. Urozhay [In Russian].
20. Pisarenko, V.A., Gorbatenko, E.M., & Jokich, D.R. (1988). Rezhimy orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Irrigation regimes for agricultural crops]. Kiyv : Urozhay [in Russian].
21. Shcherbakov, M.V., Brebels, A., Shcherbakova, N.L., Tyukov, A.P., Janovsky, T.A., & Kamaev, V. Ae. (2013). A Survey of Forecast Error Measures. World Applied Sciences Journal, Vol. 24, 171–176. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.80032>
22. Sak, A.V. (2006). Prognozirovaniye i planirovaniye ekonomiki [Forecasting and planning of the economy]. Minsk : BGUIR. [in Russian].

**O.V. Zhuravlov, A.P. Shatkovskiy, V.V. Vasyuta, Y.O. Cherevychnyi,  
O.A. Marinkov, I.O. Kovalenko, O.I. Gulenko**

**Comparison of calculation methods for determining evapotranspiration under drip irrigation**

**Abstract.** *The accuracy of calculation methods for determining the evapotranspiration (ET) of corn for grain under drip irrigation in the steppe of Ukraine was established. A comprehensive assessment of calculation methods for soil optimal water regime formation during different growth phases of maize plants was carried out. The accuracy of the estimated value of evapotranspiration was determined by the mean absolute percentage error (MAPE). It has been proven that the use of calculation methods without taking into account the climatic conditions of Southern Ukraine leads to a significant error in determining the actual evapotranspiration. By the Penman-Monteith method, the MAPE of 16.3–26.9% corresponds to the good and satisfactory accuracy of the chosen calculation model. Using the methods of A.M. and S.M. Alpatyev as well as D.A. Shtoyko the MAPE increased to 22.2–39.7% and 20.8–29.1%, respectively, which proved their satisfactory accuracy. The calculation method of M.M. Ivanov ensured the MAPE of 48.7–76.8%; that is unsatisfactory calculation accuracy. Adapted crop coefficients Kc for the conditions of the South of Ukraine increased the accuracy of calculating ET by the Penman-Monteith method by an average of 2,2 times, D.A. Shtoyko and A.M. and S.M. Alpatiev by 1,9 and 2,2 times, and M.M. Ivanov by 4,4 times. An analysis of the MAPE using various calculation methods for determining the evapotranspiration of corn for grain under drip irrigation showed that the Penman-Monteith method provides the smallest error (MAPE = 9.1%), which corresponds to high prediction accuracy. In a wet year, the accuracy of ET determination decreases by all methods, which indicates an increase in the MAPE: by Penman-Monteith and D.A. Shtoyko – up to 11.9% and 18.7%, respectively, and the determination accuracy decreases to category «good». When calculating using the methods of A.M. and S.M. Alpatiev and M.M. Ivanov the MAPE increased to 23,3% and 21,5%, respectively, and the accuracy of ET determination was satisfactory.*

**Key words:** *evapotranspiration, calculation methods, crop coefficients, MAPE, drip irrigation.*

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-317>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/317>

УДК 627.51: 001.8

## СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПАВОДКІВ ТА ПРОТИПАВОДКОВИХ ЗАХОДІВ

**В.І. Петроченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, О.В. Петроченко<sup>2</sup>, канд. техн. наук**

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0001-8306-2554>, e-mail: v\_petr47@ukr.net;

<sup>2</sup> Інститут інноваційної освіти Київського національного університету будівництва і архітектури МОН України,  
Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-2184-4811>, e-mail: a\_petr89@ukr.net

***Анотація.** Розглянуто проблему паводків та концептуальні питання протипаводкового захисту на засадах системного аналізу. Зазначено, що паводки належать до найбільш небезпечних явищ природи, які відомі ще з найдавніших часів. Відзначивши глобальний та багатоаспектний характер проблеми паводків, визначена потреба застосування системного підходу до її вирішення. Виділено основні напрямки, за якими у попередні роки системно досліджувалась та вирішувалась проблема паводків. Встановлено, що найбільш актуальним є напрямок розробки концепції захисту від паводків. Для зручності проведення системних досліджень паводків та розробки концепції захисту виконано уточнення термінологічних понять – паводка і повені. Обґрунтовано можливість та доцільність використання в системних дослідженнях терміну «паводок» як універсального. Виконано системне структурування протипаводкових заходів, в основу якого покладено ділення заходів за двома типами захисту – ситуаційний і превентивний. Загальну концепцію захисту від паводків запропоновано розглядати такою, що складається з двох альтернативних концепцій: концепції ситуаційного протипаводкового захисту і концепції превентивного протипаводкового захисту. Обирати альтернативні концепції запропоновано із застосуванням методу функціонально-вартісного аналізу. За концепцією ситуаційного протипаводкового захисту передбачено короткострокове прогнозування паводка і здійснення ситуаційних протипаводкових заходів під час наближення, проходження та закінчення останнього. За концепцією превентивного протипаводкового захисту передбачено довгострокове прогнозування паводків та здійснення одного з видів превентивних протипаводкових заходів, серед яких найбільш поширеними та перспективними визначено гідротехнічні заходи. Виконана систематизація гідротехнічних протипаводкових заходів, в основу якої покладено виділення в структурі заходів двох протилежних за характером виконання функціональних альтернатив. За першою функціональною альтернативою здійснюють прискорення відведення руслом річки паводкових вод із зони паводкових ризиків. За другою функціональною альтернативою здійснюють гальмування та затримку частини паводкового потоку перед зоною паводкових ризиків. Розроблена системна схема гідротехнічних протипаводкових заходів, на якій відповідно до функціональних альтернатив наведено множини технологічних альтернатив гідротехнічних заходів.*

***Ключові слова:** паводок, системний аналіз, концепція захисту, зона паводкових ризиків, протипаводкові заходи.*

**Актуальність дослідження.** В умовах кліматичних змін та зростання населення планети особливо гостро визначились дві протилежні за характером впливу на життєдіяльність людей проблеми: дефіцит води у посушливих регіонах та періодично виникаючий надлишок води у вигляді паводків [1]. Паводки належать до найнебезпечніших явищ природи, які супроводжують людство ще з найдавніших часів. Збереглися відомості про катастрофічні паводки на річці Хуанхе в 2297 до н. е., а також на Нілі приблизно 3 тис. років тому [2].

Серед багатьох раніше зафіксованих на планеті паводків найбільш руйнівні відбувались у Китаї [3], наслідки від яких можна порівняти з наслідками найбільш кровопролитних війн. Так у серпні 1931 р. в результаті

сильних затяжних дощів найдовша і повноводна ріка Китаю Янцзи і сусідня з нею річка Хуанхе одночасно вийшли з берегів і затопили понад 300 тисяч гектарів родючих земель, повністю знищивши на цій площі сільське господарство. Паводок забрав 3,7 мільйонів людських життів, 40 мільйонів постраждали від голоду, розрухи, хвороб [4]. З 12 червня по 30 серпня 1998 року в Китаї сталося 13 паводків, які торкнулися майже всієї території країни. Від них постраждало 240 млн осіб.

Якщо раніше паводки були надзвичайно рідкісними, то за останні століття, і особливо в наш час, їх повторюваність та розміри завданих збитків стрімко зростають. Паводки за кількістю жертв і шкоди, яку вони завдають людям, посідають перше місце серед стихійних

© Петроченко В.І., Петроченко О.В., 2022

лих [2]. Так загальні збитки від паводка, що стався в західних регіонах України в 20-х числах червня 2020 р., оцінили на суму 3–4 млрд гривень. Паводок був спричинений проходженням інтенсивних грозових дощів та значним підвищенням водності в річках Дністер, Прут, Черемош, Бистриця. Пік паводка припав на 23–27 червня, його вважають найбільшим в історії Західної України за останні 60 років [5].

Розглядаючи паводки як глобальну багатоаспектну проблему, постає актуальна потреба застосування системного підходу до її рішення.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Проаналізувавши результати попередніх досліджень та публікацій [2–18], а також директивних і законодавчих документів [19–23], було визначено такі основні напрямки системного вивчення та рішення проблеми паводків:

*збір та аналіз статистичних даних проходження паводків в країнах світу та Україні. За цим напрямком виконано більшість наукових досліджень, зокрема наведених у [2–10];*

*класифікація паводків за їх генезисом [9–13];*

*районування територій за ступенем паводкової небезпеки [14–15];*

*розробка концепції захисту від паводків [6; 10];*

*розробка науково-методичних засад визначення збитків від паводків та ефективності здійснення протипаводкових заходів [16–18];*

*підготовка та прийняття директиви Європейського Союзу та постанов уряду України щодо оцінки та управління паводковими ризиками [19–23].*

Усвідомивши як актуальну необхідність рішення проблеми паводків, так і високу вартість заходів захисту від паводків, можна дійти висновку, що серед зазначених напрямків вирішення проблеми найбільш важливим є розробка концепції захисту від паводків. Удосконалення принципів положень існуючої концепції дозволить обирати для кожної зони паводкових ризиків найбільш ефективний варіант захисту. Враховуючи багатоальтернативність заходів протипаводкового захисту, в основу концепції захисту від паводків слід систематизацію за певними принципами та ознаками варіанти протипаводкових заходів. Отже, для ефективного вирішення проблеми

паводків, крім їх систематизації за вищезазначеними напрямками, необхідна систематизація заходів захисту.

**Мета дослідження** – удосконалити концепцію захисту від паводків шляхом систематизації протипаводкових заходів.

**Методика дослідження.** В основу дослідження покладено методологію системного аналізу.

**Результати дослідження.** Для передачі відомостей про стихійні явища, пов'язані з підвищенням води в річках та затопленням територій, в українській мові використовують терміни: «паводок», «повінь», «водопілля», «повідь», «повіддя». Безумовно, що використання всіх вказаних термінів в інформаційних матеріалах та повідомленнях про стихійні явища, пов'язані з підвищенням рівня води в річках та затопленням територій, або з «високою водою» («high water», англ.), має певний сенс. Проте під час проведення системних досліджень цих стихійних явищ та викладення одержаних результатів спеціалісти стикаються з незручностями спільного використання навіть двох таких основних термінів як «паводок» і «повінь».

В зв'язку з цим, перш за все потрібно було обґрунтування універсального, зручного для проведення системних досліджень терміну визначення стихійних явищ, пов'язаних з «високою водою».

Аналіз термінів, що використовують у різних мовах для визначення стихійних явищ, пов'язаних з «високою водою» (табл. 1), показує, що тільки в українській і російській мовах існують два основні конкуруючі між собою терміни, які часто використовують як синоніми. В українській мові – це «паводок» і «повінь», а в російській мові – це «паводок» і «наводнение».

За результатами дослідження пропонується надавати перевагу терміну «паводок» та використовувати його як універсальний під час проведення системних досліджень стихійних явищ, пов'язаних з «високою водою», та викладення результатів досліджень українською мовою за певних аргументів.

Першим аргументом доцільності цієї пропозиції є результат аналізу термінів «паводок» і «повінь», які недостатньо чітко визначені

1. Терміни, що використовують у різних мовах для визначення стихійних явищ, пов'язаних з «високою водою» («high water»)

Мова	Українська	Англійська	Російська	Білоруська	Польська
Назва явища	паводок	flood	паводок	паводка	powódź
	водопілля	floodplain	половодье	разводдзе	teren zalewowy
	повінь	flood	наводнение	паводка	powódź

в різних словниках. Наприклад, відповідно до гідроекологічного словника [24] маємо:

Паводок – фаза водного режиму річки, що може багаторазово повторюватися в різні сезони року; характеризується інтенсивним збільшенням витрат і рівня води внаслідок дощів чи сніготанення (під час відлиг).

Повінь – щорічно повторювана фаза водного режиму, яка характеризується найбільшою кількістю води в річці та максимальними рівнями, що часто стає стихійним лихом.

Отже, повінь повторюється щорічно в один і той же (переважно весняний) період, а паводок у будь-який сезон року. Тому згідно [24] будь-яку повінь можна назвати паводком, але не навпаки.

Другим аргументом доцільності універсального використання в системних дослідженнях терміну «паводок» є результат логічного аналізу фізичної суті паводка і повені. За логікою паводок слід сприймати в більш широкому значенні, а саме як стихійний гідродинамічний процес у руслі річки, кульмінаційною фазою якого є повінь. Тож пропонуються такі визначення:

*паводок* – стихійний динамічний процес, що складається з трьох фаз формування водного режиму річки: фази інтенсивного підвищення рівня та збільшення витрати води в річці, внаслідок інтенсивних опадів та танення снігу; фази досягнення найвищого рівня та найбільшої витрати води в річці, що часто супроводжується затопленням територій в заплавах та долинах річки; фази спаду рівня та зменшення витрати води в річці, що може супроводжуватись зсувами ґрунту на прилеглих до річки територіях;

*повінь* – фаза водного режиму річки, яка характеризується найвищим рівнем та найбільшою витратою води в річці, що часто супроводжується затопленням територій в заплавах та долинах річки.

Другою задачею дослідження було системне структурування комплексу заходів захисту від паводків. Було встановлено існування двох принципово відмінних типів протипаводкового захисту – ситуаційного і превентивного. Відповідно до двох типів захисту протипаводкові заходи поділено на ситуаційні і превентивні та систематизовані за варіантами і порядком виконання (табл. 2).

Заходи ситуаційного типу захисту, або ситуаційні протипаводкові заходи, виконують для захисту об'єктів певної зони паводкових ризиків під час наближення, проходження та завершення однієї конкретної паводкової ситуації.

Заходи превентивного типу захисту, або превентивні протипаводкові заходи, виконують для захисту об'єктів в зоні паводкових ризиків від багатьох паводків, які можуть бути у майбутньому протягом тривалого періоду часу.

Вказані типи протипаводкового захисту є альтернативними. За логікою їх не можна поєднувати для захисту, наприклад одного і того ж об'єкта в зоні паводкових ризиків. В зв'язку з цим, загальна концепція захисту від паводків містить дві альтернативні концепції: концепцію ситуаційного і концепцію превентивного протипаводкового захисту.

Кожна альтернативна концепція захисту містить підготовчу стадію та стадію реагування на паводки. До того ж для двох альтернативних концепцій заходи, що виконуються на

## 2. Системно-структурована схема заходів захисту від паводків

Підготовча стадія	Стадія реагування на паводки							
	тип захисту		ситуаційний тип протипаводкового захисту			превентивний тип протипаводкового захисту		
Розробка карт небезпек затоплення	Прогноз паводків		Короткостроковий			Довгостроковий		
	Здійснення захисних заходів	Види захисних заходів	попереджувальні	аварійно-рятувальні	аварійно-відновлювальні	адаптаційні	водно-ландшафтні	гідротехнічні
		Порядок здійснення	Послідовне виконання всіх видів ситуаційних заходів в єдиному процесі в період наближення, проходження і закінчення паводка			Виконання одного з видів превентивних заходів, обраного за результатами обґрунтування їх технічної надійності і економічної ефективності		
Розробка карт ризиків затоплення								

підготовчій стадії, є загальними, а заходи, що виконуються на стадії реагування на паводки, принципово різняться.

На підготовчій стадії захисту від паводків для певної зони паводкових ризиків виконують розробку карт небезпек затоплення з виділенням контурів площ затоплення, залежних від фіксованих величин забезпеченості паводків.

Відповідно до карт небезпек затоплення на підготовчій стадії також розроблюють карти ризиків затоплення, що містять інформацію про втрати від паводків забезпеченості  $p$ , встановлені у фізичних показниках, і збитки від паводків, розраховані у грошових одиницях за трьома складовими:

$$Z_p = Z_p^{sc} + Z_p^{ekl} + Z_p^{ekn}, \quad (1)$$

де  $Z_p$ ,  $Z_p^{sc}$ ,  $Z_p^{ekl}$ ,  $Z_p^{ekn}$  – збиток від паводка загальний, соціальний, екологічний, економічний, тис. грн/рік.

Якщо буде обрана концепція ситуаційного протипаводкового захисту, то на стадії реагування на паводки здійснюють короткострокові (до 12–15 діб) прогнози паводка. Вихідними даними короткострокового прогнозу є прогнозні дані про опади, підвищення температури та танення снігу, що надають гідрометеорологічні служби. Методи цього прогнозу базуються на використанні даних гідрометеорологічних служб, закономірностей руху води в руслах і закономірностей припливу води до досліджуваних ділянок річки, а також на розрахунках переміщення і трансформації водного потоку по окремих ділянках річки. За результатами короткострокових прогнозів видається інформація про очікувані максимальні витрати і рівні води [25].

Згідно з концепцією ситуаційного протипаводкового захисту на стадії реагування на паводки після короткострокового прогнозування здійснюють захисні заходи, які поділяються на: попереджувальні, аварійно-рятувальні і аварійно-відновлювальні.

Попереджувальні заходи виконують перед початком паводка. До складу попереджувальних входять заходи: прогнозування втрат та можливих збитків від паводка, що наближується; оповіщення населення про можливу небезпеку; підготовка засобів евакуації населення; розробка плану виконання аварійно-рятувальних заходів; підготовка засобів виконання рятувальних робіт.

Аварійно-рятувальні заходи виконують від початку паводка до його завершення. До складу аварійно-рятувальних входять заходи: оповіщення населення про початок паводка, масштаби і небезпеку паводка та рекомендо-

вані заходи і засоби індивідуального захисту осіб в зоні ризику; евакуація населення із зони ризику; вивезення худоби, техніки, матеріальних цінностей; нарощування дамб, кріплення уразливих ділянок берегів річок, ліквідація заторів в руслах річок та їх притоках; порятунків постраждалих людей, тварин, збереження майна; надання невідкладної медичної допомоги населенню.

Аварійно-відновлювальні заходи виконують після проходження паводка. До складу аварійно-відновлювальних входять заходи: відновлення пошкоджених засобів зв'язку, доріг, житла, виробничих будівель, інших об'єктів інженерної інфраструктури; надання постраждалим особам медичних послуг; виконання санітарно-епідеміологічних робіт; постачання населення продовольством, оджею та засобами, необхідними для виживання в екстремальних ситуаціях; локалізація та зупинення зсувів.

Якщо буде обрана концепція превентивного протипаводкового захисту, то на стадії реагування на паводки здійснюють довгостроковий (до 50–100 років) прогноз паводка. Методика довгострокового прогнозування паводків наведена в роботах [26; 27]. Методика базується на використанні даних гідрологічних спостережень паводків за минулі роки та обробці цих даних методами математичної статистики. За результатом довгострокового прогнозування паводків встановлюють залежності витрати води в річці та збитків в зоні паводкових ризиків від забезпеченості паводків у вигляді спадних гіперболічних функцій. Основним результатом довгострокового прогнозування є прогнозований в  $s$ -й зоні паводкових ризиків середньорічний збиток  $Z_s$ .

Згідно з концепцією превентивного протипаводкового захисту на стадії реагування на паводки після довгострокового прогнозування здійснюють захисні заходи, якими є: адаптаційні; водно-ландшафтні і гідротехнічні.

До адаптаційних протипаводкових заходів відносять: винесення господарських і житлових будівель за межі зони затоплення; будівництво будинків та деяких господарських споруд на палях; пристосування промислового виробництва до умов періодичного затоплення з метою мінімізації збитків від порушень виробничих циклів; трансформація сільськогосподарських угідь, тобто вирощування на полях у зоні паводкових ризиків культур, що витримують тимчасове затоплення.

До водно-ландшафтних протипаводкових заходів відносять заходи, спрямовані на зміну умов формування паводкового стоку на площах водозбору; посадка на шляху формування

паводкових потоків лісосмуг; створення ставків накопичувачів; заболочування території; створення лісових масивів тощо.

До гідротехнічних превентивних проти-паводкових заходів відносять: заходи по збільшенню пропускної здатності річок для прискорення відведення води із зони паводкових ризиків; заходи акумулювання частини паводкового потоку перед зоною паводкових ризиків для зменшення надходження паводкових вод до зони паводкових ризиків; заходи будівництва гідротехнічних систем комплексного проти-паводкового захисту.

Третьою задачею дослідження було обґрунтування критерію вибору однієї з двох альтернативних концепцій захисту від паводків певної  $s$ -ї зони паводкових ризиків. В основу критерію покладено функціонально-вартісний принцип, за яким оцінюють вартісний, або інший показник функціонального (захисного) ефекту, віднесеного до вартості заходів, необхідних для отримання захисного ефекту. Критеріальним показником концепції проти-паводкового захисту

обрано індекс рентабельності інвестицій, за яким визначають величину відвернених проти-паводковими заходами збитків від паводків до витрат на здійснення заходів. Критеріальні показники концепції ситуаційного і превентивного захисту розраховують за формулами:

$$R_s^c = \frac{BZ_s^c}{b_s^c + Z_s - BZ_s^c}; \quad (2)$$

$$R_s^{np} = \frac{BZ_s^{np}}{b_s^{np}}, \quad (3)$$

де  $R_s^c$  і  $R_s^{np}$  – індекс рентабельності інвестицій (загальних витрат), що припадають на один рік виконання в  $s$ -й зоні паводкових ризиків заходів відповідно до концепції ситуаційного і концепції превентивного захисту;  $BZ_s^c$  – середньорічні відвернені ситуаційними заходами збитки, тис. грн/рік;  $b_s^c$  – загальні витрати на здійснення ситуаційних заходів, що у середньому припадають на один рік, тис. грн/рік;  $Z_s$  – середньорічний збиток від паводків,



Рис. 1. Системна схема гідротехнічних проти-паводкових заходів

визначений за результатами довгострокового прогнозування, тис. грн/рік;  $\overline{BZ}_s^{np}$  – середньорічні відвернені превентивними заходами збитки, тис. грн./рік;  $b_s^{np}$  – загальні витрати на здійснення ситуаційних заходів, що у середньому припадають на один рік, тис. грн/рік.

Отже, для захисту  $s$ -ї зони паводкових ризиків обирають концепцію захисту, залежно від того, який показник  $\overline{R}_s^c$  чи  $R_s^{np}$  буде більшим. Оскільки не тільки  $Z_s$ , а й інші параметри, що входять у формули (2) і (3), можуть бути визначені тільки шляхом довгострокового прогнозування, то довгострокове прогнозування паводків є найбільш важливим елементом вибору концепції захисту від останніх та забезпечення її ефективного застосування.

Встановлено, що найбільшу віддачу надає проведення гідротехнічних превентивних протипаводкових заходів, які є більш надійними і забезпечують гарантований захисний ефект на тривалий період, що дорівнює розрахунковому строку експлуатації гідротехнічних споруд. На територіях, де здійснено превентивні гідротехнічні протипаводкові заходи, потреба виконання інших заходів мінімальна, або зовсім відсутня. Проте проведення гідротехнічних превентивних протипаводкових заходів вимагає значних капітальних і експлуатаційних витрат. Тому для вибору ефективних гідротехнічних протипаводкових заходів виникає потреба їх систематизації.

Четвертою задачею дослідження було системне структурування комплексу гідротехнічних протипаводкових заходів. Основою такого структурування було ділення гідротехнічних протипаводкових заходів за їх функціональним призначенням. Шляхом виділення двох основних  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  і однієї комбінованої  $\Phi_k$ , функціональних альтернатив гідротехнічних протипаводкових заходів, а також визначення комплексу технологічних альтернатив, відповідних функціональним альтернативам, була побудована системна схема гідротехнічних протипаводкових заходів, рис. 1.

Першою функціональною альтернативою  $\Phi_1$  гідротехнічних протипаводкових заходів є збільшення витрати води, що відводиться руслом річки із зони паводкових ризиків з метою недопущення витоку води з русла та затоплення територій. Витрату води в річці  $Q_p$  визначають за формулою Шезі:

$$Q_p = \omega v = \omega C \sqrt{RI} \leq \omega [v], \quad (4)$$

де  $\omega$  – площа живого перетину річки, м<sup>2</sup>;  $v$  – середня швидкість води в річці, м/с;

$C$  – коефіцієнт опору тертя по довжині русла (коефіцієнт Шезі);  $R$  – гідравлічний радіус, м;  $I$  – гідравлічний похил русла, м/м;  $[v]$  – гранично допустима нерозмивна середня швидкість води в річці, м/с.

Функціональній альтернативі  $\Phi_1$  відповідають три технологічні альтернативи:  $T_{1-1}$ ;  $T_{1-2}$ ;  $T_{1-3}$ . Виконання заходів за альтернативами  $T_{1-1}$ ,  $T_{1-2}$  і  $T_{1-3}$  забезпечують можливість збільшення витрати  $Q_p$  до величин:  $Q_{p1}$ ,  $Q_{p2}$  і  $Q_{p3}$ .

$T_{1-1}$  – «Нарощування берегів річок» ( $\omega_1 > \omega$ ;  $R_1 > R$ ).

$$Q_{p1} = Q_p \frac{\omega_1 \sqrt{R_1}}{\omega \sqrt{R}}, \quad (5)$$

де  $\omega_1$  – збільшена площа живого перетину річки, м<sup>2</sup>;  $R_1$  – гідравлічний радіус після здійснення заходу, м.

$T_{1-2}$  – «Спрявлення русел річок» ( $I_1 > I$ ;  $L_1 < L$ ).

$$Q_{p2} = Q_p \frac{\sqrt{I_1}}{\sqrt{I}} = Q_p \sqrt{\frac{L}{L_1}}, \quad (6)$$

де  $I_1$  – гідравлічний похил русла після здійснення заходу, м/м;  $L$  і  $L_1$  – довжина ділянки русла до і після спрявлення, м.

$T_{1-3}$  – «Кріплення русел річок» ( $[v_1] > [v]$ ).

$$Q_{p3} = Q_p \frac{[v_1]}{[v]}, \quad (7)$$

де  $[v_1]$  – збільшена після здійснення заходу гранично допустима нерозмивна середня швидкість води в річці, м/с.

Другою функціональною альтернативою  $\Phi_2$  гідротехнічних протипаводкових заходів є гальмування руху та затримання паводкових вод перед зоною паводкових ризиків. Функціональна альтернатива  $\Phi_2$  складається з двох функціональних альтернатив:  $\Phi_{2-1}$  і  $\Phi_{2-1}$ .

За функціональною альтернативою  $\Phi_{2-1}$  затримують паводкові води в руслах річок із використанням двох технологічних альтернатив:  $T_{2-1-1}$  – спорудження регулюючих порогів та напівзагат;  $T_{2-1-2}$  – спорудження акумулюючих водосховищ гірського типу.

За функціональною альтернативою  $\Phi_{2-2}$  затримують паводкові води в заплавах і долинах річок із використанням трьох технологічних альтернатив:  $T_{2-2-1}$  – спорудження захисних протипаводкових дамб;  $T_{2-2-2}$  – спорудження акумулюючих водосховищ рівнинного типу;  $T_{2-2-3}$  – спорудження польдерів.

Кожна технологічна альтернатива, що відповідає функціональній альтернативі  $\Phi_2$ , забезпечує захисний ефект, який оцінюється зниженням пікової витрати води в річці  $\Delta Q(\Phi_2)$ , що відповідає залежності:

$$\Delta Q(\Phi_2) \geq Q_n^{\max} - [Q_p], \quad (8)$$

де  $Q_n^{\max}$  і  $[Q_p]$  – пікове значення гідрографа паводка, закладеного в проект заходів, і гранично допустима витрата води в річці в зоні паводкових ризиків, м<sup>3</sup>/с.

Комбіновану функціональну альтернативу  $\Phi_k$  використовують зазвичай в системах комплексного протипаводкового захисту, де для захисту певної зони паводкових ризиків доцільно застосовувати заходи як за першою, так і другою функціональними альтернативами. Оптимальне співвідношення спільного застосування захисних заходів визначають методом біфуркації базису.

### Висновки

1. Паводки за кількістю жертв і шкоди, яку вони завдають людям, посідають перше місце серед інших стихійних лих на планеті.

2. Проблема паводків має глобальний та багатоаспектний характер, тому запропоновано вирішувати цю проблему на засадах системного аналізу.

3. Виділено основні напрямки системного дослідження паводків за минулий період та встановлено, що найбільш актуальним напрямком є розробка концепції захисту від паводків.

4. Встановлено, що існуюча концепція захисту від паводків потребує суттєвого вдосконалення, перш за все, шляхом систематизації протипаводкових заходів та їх подальшої оптимізації.

5. Шляхом уточнення термінологічних понять паводка і повені обґрунтовано можливість та доцільність використання терміну «паводок» як універсального під час проведення системних досліджень стихійних явищ, пов'язаних із підвищенням рівня води в річках та затопленням територій, при цьому паводок запропоновано сприймати як динамічний процес, що склада-

ється з трьох фаз формування водного режиму річки, а повинь окремою кульмінаційною фазою цього процесу, тобто паводка.

6. Визначено два принципово відмінних типи протипаводкового захисту – ситуаційний і превентивний, що покладено в основу системного структурування протипаводкових заходів, а також дало підставу вважати загальну концепцію захисту від паводків такою, що складається з двох альтернативних концепцій: концепції ситуаційного протипаводкового захисту і концепції превентивного протипаводкового захисту.

7. Концепцією ситуаційного протипаводкового захисту передбачено здійснення короткострокового прогнозування (до 12–15 діб) очікуваного паводка і ситуаційних протипаводкових заходів, які здійснюються під час наближення, проходження та завершення певного паводка.

8. Концепцією превентивного протипаводкового захисту передбачено довгострокове прогнозування паводків, які можуть бути в зоні паводкових ризиків протягом майбутнього періоду часу (50–100 років), і превентивних протипаводкових заходів.

9. Наголошено, що серед превентивних протипаводкових заходів слід розрізняти адаптаційні, водно-ландшафтні і гідротехнічні заходи, при цьому гідротехнічні заходи є найбільш поширеними, але у зв'язку з їх складністю та потребою підвищення ефективності проектів протипаводкового захисту гідротехнічні протипаводкові заходи повинні бути систематизовані.

10. В основу систематизації гідротехнічних протипаводкових заходів покладено виділення принципово відмінних функціональних (захисних) альтернатив гідротехнічних заходів та множини технологічних альтернатив гідротехнічних заходів, відповідних функціональним альтернативам.

### Бібліографія

1. Петроченко А.В. Проблема дефіцита води і паводков в Україні. *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. ФГБНУ «РосНИИПМ». Новочеркасск : РосНИИПМ. 2018. № 3(71). С. 133–140.
2. Авакян А. Б., Истомина М.Н. Наводнения конца XX в. *Природа*. 2001. № 10. С. 75–78.
3. Zong Yongqiang, Chen Xiqing. The 1998 flood on the Yangtze, China. *Natural Hazards*. 2000. № 22. P. 165–184.
4. Гамберг В. Наводнение в Китае (июль-октябрь 1931 г.). *Проблемы Китая*. 1931. № 89 (3–4). С. 153–158.
5. Інженерно-геологічний моніторинг Міжрегіонального офісу захисних масивів дніпровських водосховищ. URL: <https://www.mozmdv.gov.ua/pavodok-ta-osnovni-momenti-jogo-negativnogo-vplivu/>. (дата звернення 17. 11. 2021 р.).
6. Авакян А.Б. Наводнения. Концепция защиты. *Известия РАН. Серия: географическая*. 2000. № 5. С. 40–46.
7. Стихийні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986–2005 рр.) / за ред. В.М. Ліпінського, В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко. Київ : Вид-во «Ніка-Центр». 2006. 312 с.



8. Швець Г.И. Выдающиеся гидрологические явления на юго-западе СССР. Л. : Гидрометеиздат. 1972. 512 с.
9. Дячук В. А., Сусідко М.М. Паводки в Закарпатті та причини їх виникнення. *Укр. географ. журн.* 1999. № 1. С. 47–50.
10. Ромащенко М. І., Савчук Д.П. Водні стихії. Карпатські повені. Статистика, причини, регулювання / за ред. М.І. Ромащенко. Київ : Аграрна наука. 2012. 304 с.
11. Истомина М.Н. Классификация наводнений по их генезису. *Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 2.* СПб : Гидрометеиздат. 2005. С. 47–53.
12. Авакян А. Б., Истомина М.Н. Природные и антропогенные причины наводнений. *Информационный сборник.* Москва : ЦСИ ГЗ МЧС России. 2001. № 8. С. 53–70.
13. Gentry A. H., Lopes Parody J. Deforestation and increased flooding of the Upper Amazon. *Science.* 1980. V. 210. № 4476. P. 1354–1356.
14. Сусідко М. М., Лук'янець О.І. Районування території України за ступенем гідрологічної небезпеки. *Наук. праці УкрНДГМІ.* 2004. Вип. 253. С. 196–202.
15. Кичигина Н. В., Корытный Л.М. Районирование Восточной Сибири по опасности наводнений. *География и природные ресурсы.* 1997. № 3. С. 50–60.
16. Алексеев Н.А. Ущерб от паводков и методика его определения. *Труды В/О «Союзводпроект».* 1977. Вып. 2(47).
17. Скиданенко Ю.П. Аналіз методологічних підходів до визначення збитків від природних катастроф. *Вісник СумДУ. Серія Економіка.* 2007. № 1. С. 52–59.
18. Петроченко В.І., Сташук В.А. Еколого-економічна ефективність протиаводкових заходів. Київ : ДПУЕВР. 2009. 62 с.
19. Директива 2007/60ЄС Європейського Парламенту і Ради від 23 жовтня 2007 року «Про оцінку і управління ризиками затоплення».
20. Постанова Кабінету міністрів України від 25 жовтня 2017 р. № 1106 «Про виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони».
21. Наказ МВС України від 17.01.2018 р. № 30 «Про затвердження Методики попередньої оцінки ризиків затоплення».
22. Наказ МВС України від 28.02.2018 р. № 153 «Про затвердження Методики розроблення карт загроз і ризиків затоплення».
23. Постанова Кабінету міністрів України від 4 квітня 2018 р. № 247 «Про затвердження Порядку розроблення плану управління ризиками затоплення».
24. Петровська М.А. Гідрокологічний словник / за ред. проф. І.П. Ковальчука. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка. 2010. 140 с.
25. Заміховський Л. М., Клапоушак О.І. Аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод. *Нафтогазова енергетика.* 2011. № 2(15). С. 99–105.
26. Петроченко В. И., Петроченко А.В. Научно-методическое обоснование систем превентивной противопаводковой защиты территорий в бассейнах рек. *Вестник Брестского государственного технического университета.* 2018. № 2(110): Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. С. 44–48.
27. Петроченко О.В. Оцінка і прогнозування паводкових ризиків в річкових басейнах. / *Екологічна безпека та природокористування.* 2020. № 1 (33). С. 18–41.

### References

1. Petrochenko, A. V. (2018). Problema defitsita vody i pavodkov v Ukraine [The problem of water scarcity and floods in Ukraine]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshayemogo zemledeliya*, 3(71), 133–140 [in Russian].
2. Avakyan, A. B. & Istomina M.N. (2001) Navodneniya kontsa XX v. [Floods of the late XX century]. *Nature*, 10, 75–78 [in Russian].
3. Zong Yongqiang, & Chen Xiqing. (2000). The 1998 flood on the Yangtze, China. *Natural Hazards*, 22, 165–184.
4. Gamberg, V. (1931). Navodneniye v Kitaye (iyul'-oktyabr' 1931) [Flood in China (July-October 1931)]. *Problems of China*, 89 (3–4), 153–158 [in Russian].
5. Inzhenerno-geologichnyy monitorynh Mizhrehional'noho ofisu zakhysnykh masyviv dniprovs'kykh vodoskhovyshch [Engineering-geological monitoring of the Interregional office of protective massifs of the Dnieper reservoirs]. URL: <https://www.mozmdv.gov.ua/pavodok-ta-osnovni-momenti-jogo-negativnogo-vplivu/> [in Russian].

6. Avakyan, A. B. (2000). Navodneniya. Kontsepsiya zashchity. [The concept of protection]. *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, 5, 40–46 [in Russian].
7. Lipins'kyy, V. M., Osadchyy, V. I., & Babichenko, V. M. et al (2006) Stykhiini meteorolohichni yavlyshcha na terytorii Ukrainy za ostannie dvadtsytyrichchia (1986–2005 rr.) [Natural meteorological phenomena in Ukraine over the last twenty years (1986–2005)]. Kyiv : Nika-Tsentr. [in Russian].
8. Shvets, G.I. (1972) Vydayushchiesya gidrologicheskiye yavleniya na yugo-zapade SSSR [Outstanding hydrological phenomena in the south-west of the USSR]. Leningrad : Gidrometeoizdat [in Russian].
9. Diachuk, V. A., & Susidko, M. M. (1999) Pavodky v Zakarpatti ta prychny yikh vynyknennia [Floods in Transcarpathia and their causes]. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 47–50. [in Ukrainian]
10. Romashchenko, M. I., & Savchuk, D. P. (2012). Vodni stykhiyi. Karpats'ki poveni. Statystyka, prychny, rehulyuvannya. [Water elements. Carpathian floods. Statistics, causes, regulation]. Kyiv : Ahrarna nauka [in Ukrainian].
11. Istomina M. N. (2005). Klassifikatsiya navodneniy po ikh genezisu [Classification of floods by their genesis]. *Trudy VIVserossiyskogo gidrologicheskogo s'yezda. Sektsiya 2*. SPb : Gidrometeoizdat. 47–53. [in Russian].
12. Avakyan A. B., & Istomina M.N. Prirodnyye i antropogennyye prichiny navodneniy [Natural and anthropogenic causes of floods]. *Informatsionnyy sbornik. M. : TSSI GZ MCHS Rossii. № 8*. 53–70.
13. Gentry, A. H., & Lopes, Parody J. (1980). Deforestation and increased flooding of the Upper Amazon. *Science*, Vol. 210, 4476, 1354–1356.
14. Susidko, M. M., & Lukianets, O. I. (2004) Raionuvannia terytorii Ukrainy za stupenem hidrolohichnoi nebezpeky [Zoning of the territory of Ukraine by the degree of hydrological danger]. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, 253, 196–202 [in Ukrainian].
15. Kichigina N. V., & Korytnyy L.M. (1997). Rayonirovaniye Vostochnoy Sibiri po opasnosti navodneniy. [Zoning of Eastern Siberia by flood hazard]. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 3, 50–60. [in Russian].
16. Alekseyev, N. A. (1977). Ushcherb ot pavodkov i metodika yego opredeleniya. [Flood damage and the method of its determination]. *Trudy V/O «Soyuzvodproyekt», Vyp. 2(47)*. [in Russian].
17. Skydanenko, Yu. P. (2007). Analiz metodolohichnykh pidkhodiv do vyznachennya zbytkiv vid pryrodnykh katastrof. [Analysis of methodological approaches to determining losses from natural disasters]. *Visnyk SumDU. Seriya Ekonomika*, 1, 52–59. [in Russian].
18. Petrochenko, V.I., & Stashuk, V.A. (2009). Ekoloho-ekonomichna efektyvnist protypravodkovykh zakhodiv [Ecological and economic efficiency of flood control measures]. Kyiv : DIUEVR. [in Ukrainian].
19. Dyrektyva 2007/60/ES Yevropeys'koho Parlamentu i Rady (2007). Pro otsinku i upravlinnya ryzykamy zatoplennya [Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 «On the assessment and management of flood risks»].
20. Postanova Kabinetu ministriv Ukrayiny (2017). Pro vykonannya Uhody pro asotsiatsiyu mizh Ukrainoyu, z odniyeyi storony, ta Yevropeys'kym Soyuzom, Yevropeys'kym spivtovarystvom z atomnoyi enerhiyi i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoyi storony [On the implementation of the Association Agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their Member States, on the other hand]. Cabinet of Ministers of Ukraine, № 1106 [in Ukrainian].
21. Nakaz MVS Ukrayiny vid 17.01.2018 r. № 30 «Pro zatverdzhennya Metodyky poperedn'oyi otsinky ryzykiv zatoplennya» [Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated January 17, 2018 № 30 «On approval of the Methodology for preliminary assessment of flood risks»]. Kyiv [in Ukrainian].
22. Nakaz MVS Ukrayiny vid 28.02.2018 r. № 153 «Pro zatverdzhennya Metodyky rozroblennya kart zahroz i ryzykiv zatoplennya» [Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated February 28, 2018 № 153 «On approval of the Methodology for developing maps of flood threats and risks»]. Kyiv [in Ukrainian].
23. Postanova Kabinetu ministriv Ukrayiny vid 4 kvitnya 2018 r. № 247 «Pro zatverdzhennya Poryadku rozroblennya planu upravlinnya ryzykamy zatoplennya». [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of April 4, 2018 № 247 «On approval of the Procedure for developing a flood risk management plan»]. Kyiv [in Ukrainian].
24. Petrovs'ka, M. A. (2010) Hidroekolohichnyy slovnyk [Hydroecological Dictionary]. L'viv : Vydavnychyy tsentr LNU imeni Ivana Franka [in Ukrainian].

25. Zamikhovs'kyi, L. M., & Klapoushchak, O. I. (2011) Analiz metodiv i system kontrolyu ta prohnozuvannya rivnya pavodkovykh vod [Analysis of methods and systems for flood water level control and forecasting]. Naftohazova enerhetyka. 2(15), 99–105 [in Ukrainian].

26. Petrochenko, V. I., & Petrochenko, A. V. (2018). Nauchno-metodicheskoye obosnovaniye sistem preventivnoy protivopavodkovoy zashchity territoriy v basseynakh rek [Scientific and methodological substantiation of preventive flood protection systems in river basins]. Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vodokhozyaystvennoye stroitel'stvo i teploenergetika. 2(110), 44–48 [in Russian].

27. Petrochenko, O. V. (2020) Otsinka i prohnozuvannya pavodkovykh ryzykiv v richkovykh baseynakh [Assessment and forecasting of flood risks in river basins]. Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya, 1 (33), 18–41 [in Ukrainian].

**V.I. Petrochenko, O.V. Petrochenko**

### **Systematization of floods and anti-flood measures**

***Abstract.** The problem of floods and conceptual issues of flood protection based on system analysis was considered. It is well-known that floods are among the most dangerous natural phenomena that have accompanied mankind since ancient times. Taking into account the global and multifaceted nature of the flood problem, there is a need to apply a systematic approach to its solution. The main areas in which the problem of floods has been systematically studied and solved in previous years were highlighted. It was found out that the most relevant is the area of developing the concept of flood protection. For the convenience of systematic research of floods and the development of the concept of flood protection, the terminological concepts of flood and flooding were clarified. The possibility and expediency of using the term «flood» as a universal in systematic research were substantiated. The systematic structuring of flood control measures was performed, which is based on the division of measures into two types of protection – situational and preventive. It is proposed to consider the general concept of flood protection as consisting of two alternative concepts: the concept of situational flood protection and the concept of preventive flood protection. It is proposed to choose alternative concepts using the method of functional-cost analysis. The concept of situational flood protection provides for short-term flood forecasting and implementation of situational flood protection measures during flood approach, passage, and end. The concept of preventive flood protection provides for long-term flood forecasting and implementation of one of preventive flood protection measures, among which the most common and promising are hydraulic measures. The systematization of hydraulic flood control measures was performed, which is based on the allocation of two opposite in nature functional alternatives in the structure of measures. By the first functional alternative, the flood flow is diverted from the flood risk zone through the river bed. By the second functional alternative, part of the flood flow is inhibited and delayed in front of the flood risk zone. A system scheme of hydro-technical flood control measures was developed, on which, following functional alternatives many technological alternatives of hydro-technical measures are given.*

**Key words:** flood, system analysis, protection concept, flood risk zone, flood control measures.

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-314>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/314>

УДК 621.396.967;621.396.962,631.6;626.8,631.6:528.8:556

## ТИПІЗАЦІЯ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА ЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЮ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ ДЛЯ РОЗВИТКУ ЗРОШЕННЯ ТА ЙОГО ЕКОЛОГІЧНИМИ НАСЛІДКАМИ

А.М. Шевченко<sup>1</sup>, канд. с.-г. наук, Р.П. Боженко<sup>2</sup>, С.М. Лютницький<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-2637-6538>; e-mail: [monitoring\\_protect@ukr.net](mailto:monitoring_protect@ukr.net)

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-3661-8120>; e-mail: [ruslana\\_lp@ukr.net](mailto:ruslana_lp@ukr.net)

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-4343-0054>; e-mail: [lutnizkii@ukr.net](mailto:lutnizkii@ukr.net)

**Анотація.** У статті наведено результати типізації регіонального рівня території Херсонської області за наявністю водних ресурсів, придатних для розвитку зрошення земель з урахуванням можливого екологічного ризику в результаті нарощування площ зрошуваних угідь. Виконано групування території, попередньо диференційованих за забезпеченістю водними ресурсами на такі підтипи: низький рівень природної водозабезпеченості місцевими поверхневими і підземними водними ресурсами; достатній рівень водозабезпеченості підземними водами різної придатності для зрошення; високий рівень забезпеченості транзитним річковим стоком; забезпечена подача води різної якості з джерел зрошення іригаційною мережею, а також за зонами екологічного ризику згідно з еколого-меліоративною кваліфікацією з виокремленням зон допустимого екологічного ризику (потенційно умовно нестійкі ділянки з добрим еколого-меліоративним станом), зон підвищеного екологічного ризику (потенційно умовно нестійкі або нестійкі ділянки із задовільним з загрозою погіршення станом), зон стійкого екологічного ризику (потенційно нестійкі території з незадовільним або дуже незадовільним станом земель), зон розвитку кризових екологічних ситуацій (потенційно дуже нестійкі з дуже незадовільним станом землі). Визначено, що в межах Херсонської області переважають території з низьким рівнем природної водозабезпеченості місцевим поверхневим стоком і з забезпеченою додатковою водоподачею поверхневих вод для зрошення магістральними каналами з Каховського водосховища у поєднанні із зонами підвищеного екологічного ризику (Каховський зрошуваний масив) або із зонами стійкого екологічного ризику (Олександрівський масив зрошення, Каланчацька зрошувальна система). Подальше нарощування площ зрошення в межах цих типологічних територій, з одного боку, забезпечене наявними ресурсами, з іншого – може спричинити погіршення еколого-меліоративного стану зрошуваних земель та загострення водно-екологічної ситуації, насамперед підняття рівня ґрунтових вод.

**Ключові слова:** водозабезпеченість, еколого-меліоративний стан, зрошення, зрошувані землі, підземні води, поверхневі води, районування, типізація.

**Актуальність дослідження.** Зростання посушливості клімату в усіх природно-кліматичних зонах України істотно погіршує умови природного вологозабезпечення вирощування сільськогосподарських культур. Це зумовлює збільшення потреби у зрошенні на зростаючій площі земельних угідь [1–3]. Водночас кліматичні трансформації значною мірою негативно впливають і на стан забезпеченості сільських територій водними ресурсами, що проявляється в зменшенні водності річок і водойм, зниженні рівня ґрунтових вод, погіршенні якості води тощо [3; 4]. Це ускладнює вибір надійних джерел зрошення, особливо в басейнах малих річок, за значної віддале-

ності потенційних площ поливу від великих водосховищ, зрошувальних каналів.

Зрошувані землі є найбільш потенційно стабільно продуктивними навіть за екстремальних погодних умов. Проте, через істотні зміни характеру природного зволоження вони характеризуються, за певних умов, підвищеним ризиком прояву несприятливих ґрунтово-деградаційних процесів, пов'язаних, насамперед, із дією зрошувальних вод: підтоплення, іригаційна ерозія, вторинне засолення або осолонцювання ґрунтів, забруднення ґрунтів і ґрунтових вод тощо, що підтверджується практикою ведення меліоративного землеробства та даними моніторингу зрошуваних земель [5–8].

© Шевченко А.М., Боженко Р.П., Лютницький С.М., 2022

Тому в контексті вирішення завдань із відновлення та розвитку зрошення, передбачених «Стратегією зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» і Планом заходів з її реалізації [9; 10], досить актуальним є забезпечення сприятливого еколого-меліоративного стану зрошуваних сільськогосподарських угідь, а також запобігання можливого негативного впливу зрошувальних меліорацій на складові навколишнього природного середовища за використання для поливу підземних і поверхневих вод різної якості. Вирішенню цього мають сприяти встановлені постановою Кабінету Міністрів України від 02.09.2020 р. № 776 [11] нормативи екологічно безпечного зрошення й управління поливами.

Отже, погіршення якості водних ресурсів, загроза зниження рівня водозабезпеченості більшості регіонів держави у зв'язку з глобальними змінами клімату з одночасним зростанням потреби води на зрошення зумовлює необхідність просторового оцінювання та територіальної оптимізації використання наявного водоресурсного потенціалу територій для проведення екологобезпечних зрошувальних меліорацій.

Одними з найбільш інформативних та ефективних засобів площинних узагальнень даних і просторової диференціації та групування територій меліоративного освоєння, що забезпечують візуалізацію екологічних наслідків зрошення та є геопросторовою тематичною основою визначення умов екологічної безпечності зрошуваного землеробства, є районування та типізація.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зарубіжні й українські вчені проводять чимало досліджень у сфері вивчення умов та особливостей формування водних ресурсів, режиму поверхневих і підземних вод, у тому числі в умовах активізації господарської діяльності та змін клімату, для забезпечення раціонального водокористування, зокрема і при веденні зрошення. Слід зазначити, що в багатьох країнах світу (США, Німеччина, Ізраїль та ін.) існують регіональні та локальні системи управління водоспоживанням, що ефективно функціонують у водогосподарських комплексах. Результати досліджень фахівців у контексті даної тематики стосуються переважно окремих методологічних питань, пов'язаних з інтегрованим управлінням, водними ресурсами, визначенням вологозабезпеченості сільгоспугідь, оцінюванням якості води тощо без комплексної постановки проблеми та розв'язання її наукового забезпечення.

Досить ґрунтовно в чисельних наукових публікаціях висвітлено вплив зрошення на

родючість ґрунтів та інші складові природного середовища південних регіонів України [5–8].

Окремим аспектам типізації територій перспективного меліоративного освоєння зрошуваних земель за сприйнятливостю проведення зрошення, станом ведення зрошуваного землеробства, умовами водо-землекористування тощо присвячено низку наукових праць вітчизняних вчених, зокрема науковців ІВПіМ НААН [12–17].

Комплексне вирішення проблеми сталого розвитку зрошення територій потребує відповідного інтегрованого підходу до розгляду питань земле- та водокористування в їхніх межах з урахуванням природно-екологічних особливостей і вимог екологічно-безпечного використання водних ресурсів за мінімізації водно-екологічних ризиків для складових природного середовища.

Досить показовою за гостротою, складністю та комплексністю проблем сучасного і перспективного використання зрошуваних земель є Херсонська область, що зумовлено, з одного боку, тривалістю ведення зрошення, наявністю великих зрошувальних систем із найбільшою кількістю политих площ, застосуванням різних способів зрошення та дренажу на зрошуваних і прилеглих до них землях, з іншого – різноманітністю природних умов.

**Мета досліджень** – виконати на прикладі Херсонської області типізацію територій розвитку зрошення за забезпеченістю його різними водними ресурсами з урахуванням їхньої якості (придатності для поливу) та інших еколого-меліоративних обмежень щодо запобігання негативних наслідків зрошуваного землеробства, насамперед, через антропогенну трансформацію природного режиму зволоження ґрунтів на фоні кліматичних змін.

**Матеріали та методи дослідження.** Херсонська область характеризується посушливим кліматом і значною неоднорідністю природних умов, які формують просторову мінливість генетичної стійкості території до розвитку шкідливої дії вод та характеру прояву процесів затоплення, підтоплення, водної ерозії, просідання лесових порід, засолення й осолонцювання ґрунтів тощо.

У гідрографічному відношенні Херсонська область розташована в межах суббасейну Нижнього Дніпра району річкового басейну Дніпра, басейнів річок Причорномор'я і Приазов'я. Гідрографічна мережа Херсонської області слаборозвинена і складається переважно з невеликих водотоків. Лише дві річки, що протікають по території області, а саме Дніпро і Інгулець, мають в її межах довжину

понад 100 км. Крім того, в області налічується 24 малі річки загальною довжиною 373,7 км, із них 12 довжиною менше 10 км. Густота річкової мережі в межах області дорівнює в середньому 0,10 км/км<sup>2</sup> [18–20]. Підземний стік у річки практично відсутній, водоносні горизонти здебільшого відіграють незначну роль у живленні річок, тому останні є переважно періодичними водотоками.

Загалом же, Херсонська область належить до регіонів України з найнижчим забезпеченням місцевими поверхневими водними ресурсами – 0,13 тис. м<sup>3</sup> на одну людину в середній за водністю рік, що згідно з класифікацією Європейської економічної комісії ООН характеризує водозабезпеченість як катастрофічно низьку, хоча за сумарними ресурсами річкового стоку область є найбільш забезпеченою в країні.

Основним джерелом забезпечення водними ресурсами території Херсонської області є транзитний стік (річка Дніпро – понад 54 км<sup>3</sup>/рік), тому з метою забезпечення якісною водою всіх галузей економіки в межах області побудовано Каховське водосховище. Водночас в області створена достатньо розгалужена мережа штучних водотоків-каналів різного порядку, насамперед магістральних – Північно-Кримський, Головний Каховський, а також трохи менших (Олександрівський, Зональний, Перекопський, Р-1, Р-2, Сірогозький та ін.) зрошувальних каналів.

Херсонська область – одна з найбільш освоєних областей України в сільськогосподарському та меліоративному відношенні. За масштабами зрошення земель Херсонщина займає сьогодні перше місце серед інших регіонів України. На початку 90-х років минулого століття тут поливалося понад 450 тис. га земель. В області нині налічується 426,4 тис. гектарів зрошуваних земель, або 21,6% від загальної площі сільгоспугідь, у тому числі державних зрошувальних систем – 384,5 тис. га, з них від Каховської зрошувальної системи – 243,1 тис. га, Північно-Кримського каналу і Олександрівської зрошувальної системи – 102,0 тис. га, Інгuleцької зрошувальної системи – 18,2 тис. га, локальні зрошувальні системи – 21,2 тис. га, місцеве зрошення – 42,3 тис. га. В області знаходиться майже 16 тис. га рисових систем, а також близько 45 тис. га систем краплинного зрошення.

Останніми роками в області поливається загалом близько 300 тис. га земель. У 2021 р. полито майже 294 тис. га. Зрошення в Херсонській області є одним із найбільш вагомих споживачів води (до 90–95% від

загального споживання) та істотним чинником антропогенного навантаження на навколишнє середовище загалом і поливні землі зокрема та, відповідно, трансформації їхнього стану. Водоподача на зрошення коливається в межах 800,0–1000,0 тис. м<sup>3</sup> залежно від площі поливу і погодних умов року.

Споживання води на зрошення превалює в південних районах області, на які припадає основна частка зрошуваних площ (Каланчацький, Каховський, Новотроїцький, Скадовський, Генічеський і Чаплинський райони-за попереднім адміністративним поділом).

Значне додаткове надходження води по магістральних, розподільних каналах при поливах земель у період масштабного розвитку зрошення сприяло зростанню рівня ґрунтових вод (РГВ), посилює просторову неоднорідність глибини залягання ґрунтових вод, їхньої мінералізації і хімічного складу, призводило до змін сольових характеристик зрошуваних ґрунтів тощо, а також підтоплення сільгоспугідь і сільських населених пунктів, що значною мірою зумовлює диференціацію еколого-меліоративного стану (ЕМС) земель.

У **методичному плані** типізація територій базувалась на врахуванні умов природного водозабезпечення земель і вирощуваних сільгоспкультур, додаткового водонадходження за рахунок проведення зрошення, а також результатів еколого-меліоративного районування та кваліфікації земель.

Природні ресурси поверхневих вод характеризувались величинами місцевого і транзитного стоку річок. Диференціацію територій за забезпеченістю підземними водами здійснено на підставі величин модуля прогнозних ресурсів та експлуатаційних запасів підземних вод.

Методика еколого-меліоративного районування згідно з [21; 22] передбачає диференціацію території за умовами потенційної еколого-меліоративної стійкості природно-агромеліоративних геосистем до певного виду деградації та шкідливої дії вод і за результатами просторового оцінювання еколого-меліоративного стану земель.

Потенційну стійкість оцінювали за показниками, що характеризують умови залягання четвертинного покриву та можливу його трансформацію при проявах шкідливої дії вод і деградації земель. Це, насамперед, стійкість рельєфу, його морфометрія та умови поверхневого стоку, стійкість ґрунтів і порід, особливості інженерно-геологічної та гідрогеологічної структури зони активного водообміну тощо [22]. Оцінювання еколого-меліоративного стану земель виконано згідно з [21] із виділенням

категорій доброго, задовільного із загрозою погіршення, незадовільного та дуже незадовільного стану угідь.

Вихідною інформацією для оцінювання слугували дані моніторингу зрошуваних земель, що здійснюється Басейновим управлінням водних ресурсів (БУВР) Нижнього Дніпра Держводагентства України.

Еколого-меліоративну кваліфікацію земель виконано за авторською методикою, наведеною в [23].

#### **Результати дослідження та їх обговорення.**

Результати узагальнення та аналізу даних щодо наявності поверхневих і підземних вод, їхніх якісних характеристик, розподілу використання за окремими галузями та напрямками свідчать про таке: Херсонська область загалом та окремі її території, зокрема райони всіх басейнів річок (Дніпра, Причорномор'я та Приазов'я), характеризуються катастрофічно низькою забезпеченістю місцевими водними ресурсами річкового стоку: величина питомої водозабезпеченості на одного жителя коливається по адміністративних районах від 80 м<sup>3</sup>/рік до 800 м<sup>3</sup>/рік. Порівняно більш забезпеченими власними поверхневими водними ресурсами є райони в північній частині області з більшою річною кількістю атмосферних опадів. Проте обсяг цих власних водних ресурсів недостатній для можливості проведення зрошення, що вимагає залучення ресурсів транзитного стоку річки Дніпро або ж підземних вод.

Загалом у межах області зосереджена значна кількість підземних водних ресурсів. За результатами регіональної оцінки прогнозні ресурси підземних вод (ПРПВ) області становлять 4970,8 тис. м<sup>3</sup>/добу (1,81 км<sup>3</sup>/рік), з яких із мінералізацією до 1, г/дм<sup>3</sup> – 4 055,0 тис. м<sup>3</sup>/добу, до 1,0 г/дм<sup>3</sup> – 3626,58 тис. м<sup>3</sup>/добу [24]. У зв'язку з різноманітністю умов формування ресурсів підземних вод спостерігається значна мінливість обсягів ПРПВ в розрізі адміністративних районів області: від 11,6 тис. м<sup>3</sup>/добу у Високопільському районі до 735,4 тис. м<sup>3</sup>/добу в Олешківському районі, а, відповідно, величини модуля ПРПВ коливаються від 10–50 м<sup>3</sup>/добу/км<sup>2</sup> до 200–500 м<sup>3</sup>/добу/км<sup>2</sup>.

Розвіданість ПРПВ загалом по області незначна – 19%. Згідно з даними держобліку підземних вод усього станом на 01.01.2020 р. розвідано і затверджено в дев'яти районах області (згідно з попереднім адміністративним поділом) 23 родовища підземних вод, які включають 56 ділянок із балансовими експлуатаційними запасами питних і технічних підземних вод (ЕЗПВ) у сумі 930,54 тис. м<sup>3</sup>/добу (339,0 млн м<sup>3</sup>/рік), зокрема з мінераліза-

цією до 1,5 г/дм<sup>3</sup> – 505,1 тис. м<sup>3</sup>/добу. При цьому максимальні значення ЕЗПВ у Білозерському (199,7 тис. м<sup>3</sup>/добу), Олешківському (210,3 тис. м<sup>3</sup>/добу) і Каховському (226,3 тис. м<sup>3</sup>/добу) районах, а в інших районах вони змінюються від 11,4 тис. м<sup>3</sup>/добу (Каланчацький) до 102,2 тис. м<sup>3</sup>/добу (Чаплинський) [20]. У половині районів ЕЗПВ взагалі не розвідані. Це унеможливує повноцінну достовірну оцінку забезпеченості водними ресурсами даних територій. Крім того, якість підземних вод часто не відповідає вимогам споживачів, а використання підземних вод для зрошення у масовому масштабі досить проблематичне і недоцільне. Так, у 2020 р. із видобутих в області 44,2 млн м<sup>3</sup> підземних вод для зрошення використано 3,2 млн м<sup>3</sup> за загальної водоподачі на зрошення понад 900,0 млн м<sup>3</sup>.

Найбільші обсяги водоподачі фіксуються по Новотроїцькому, Чаплинському, Каховському, Скадовському та Каланчацькому районах (по більш як 100 млн м<sup>3</sup>). Максимальні усереднені норми зрошення відмічено для Каланчацького району (8,7–13,3 тис. м<sup>3</sup>/га), що пов'язано з вирощуванням рису.

Зважаючи на розміщення зрошуваних земель по території області, можна виокремити масиви (ареали) локального або осередкового поширення зрошення і його впливу на формування водоресурсного потенціалу та на навколишнє середовище (окремі ділянки «місцевого» зрошення або практично повна відсутність поливних земель), регіонально-локального меліоративно-іригаційного впливу (розосереджені площі зрошення) та регіонального меліоративно-іригаційного впливу (місцями практично суцільне поширення площі зрошення).

Результати еколого-меліоративного районування Херсонської області свідчать про переважно низьку природну стійкість більшості територій області до додаткового зволоження через можливість розвитку або активізації несприятливих ґрунтово-деградаційних процесів. Так, за природними умовами низькі надзаплавні тераси (переважно в межах давньої дельти Дніпра) характеризуються здебільшого як потенційно нестійкі й умовно нестійкі щодо дії зрошення, а на окремих ділянках – як дуже нестійкі (близьке залягання мінералізованих ґрунтових вод, поширення сильнозасолених і сильносолонцюватих ґрунтів).

Досить значні площі області належать до лесових рівнин високих і комплексних терас (південно-східна частина області, західна частина – колишній Білозерський район),

для яких під дією зрошувальних меліорацій характерна загроза підйому РГВ і формування іригаційних верховодок за умов надмірних поливів, розвитку просадочних і післяпосадочних деформацій, вторинного засолення або осолонцювання ґрунтів, збільшення кількості западинних морфоскульптур зі зміною в їхніх межах властивостей підґрунтя та ґрунтів, оглеєнням та осолонцюванням останніх. Залежно від рівня такої загрози виокремлено потенційно умовно нестійкі та нестійкі ділянки, що охоплюють більшу частину території ландшафтів високих терас. Знижені присиваські й приморські ділянки віднесено до дуже нестійких.

Північна частина області, як лівобережна, так і правобережна – це переважно, лесові вододільні рівнини. На їх території при зрошенні земель можливе піднімання РГВ з утворенням верховодок на прошарках важких суглинків або на викопних ґрунтах. При цьому в подах, балках і на ділянках з близьким заляганням РГВ відбуватиметься підтоплення, додаткове засолення й осолонцювання ґрунтів. На схилах можлива активізація ерозійних процесів, на вододілах – просідання лесових порід і зростання кількості подів і мікрозападин. Тому вододільна лесова рівнина диференційована на потенційно умовно нестійкі та нестійкі ділянки.

Виконане картографічне представлення результатів оцінювання ЕМС зрошуваних земель області станом на 2020 р., як за окремими показниками, так і їхньою сукупністю свідчить, що у територіальному відношенні переважна більшість площ із незадовільним станом приурочена до земель тривалого зрошення із Північно-Кримського каналу – Олександрівської та Каланчацької зрошувальних систем (Скадовський район), насамперед, між Олександрівським зрошувальним каналом і Чорним морем, із природно близьким або неглибоким (до 5,0 м) заляганням рівня ґрунтових вод, місцями мінералізованих, а також поширеними тут природно засоленими і солонцюватими ґрунтами. Крім того, для даної території виявлена істотна просторова диференціація ЕМС, чому сприяють наявність відкритої поливної мережі, розміщення та функціонування рисових зрошувальних систем зі значним водним навантаженням, істотна насиченість зрошуваного масиву дренажними системами, насамперед вертикального типу, як на сільськогосподарських угіддях, так і в населених пунктах, а також використання частини зрошуваних земель у режимі богарних.

Менші площі земель із незадовільним ЕМС виявлені в сучасних межах Генічеського (переважно Новотроїцький, Генічеський),

Херсонського (у межах колишніх Білозерського й Олешківського) і Каховського (Чаплинський, Каховський) районів на знижених, подових ділянках, у присиваській частині території з поширенням залишково солонцюватих ґрунтів і підвищеної мінералізації ґрунтових вод неглибокого залягання від поверхні землі.

Ділянки з добрим станом ЕМС зрошуваних земель переважають у Бериславському районі (правобережні зрошувальні розосереджені невеликі системи), становлячи близько 90% загальної їх площі.

Виходячи з вищенаведеного та результатів просторового аналізу даних щодо потенційної стійкості до впливу зрошення й еколого-меліоративного стану зрошуваних земель, запропоновано логічну схему типізації. Вона передбачає групування територій, попередньо диференційованих за забезпеченістю водними ресурсами, на такі підтипи: низький рівень природної водозабезпеченості місцевими поверхневими і підземними водними ресурсами; достатній рівень водозабезпеченості місцевим поверхневим стоком або підземними водами різної придатності для зрошення; високий рівень забезпеченості транзитним річковим стоком; забезпечена подача води різної якості з джерел зрошення іригаційною мережею, а також за зонами екологічного ризику згідно з еколого-меліоративною кваліфікацією [23] з виокремленням безризикових зон (потенційно стійкі території з добрим ЕМС), зон допустимого екологічного ризику (потенційно умовно нестійкі ділянки з добрим ЕМС), зон підвищеного екологічного ризику (потенційно умовно нестійкі або нестійкі ділянки із задовільним з загрозою погіршення станом), зон стійкого екологічного ризику (потенційно нестійкі території з незадовільним або дуже незадовільним ЕМС земель), зон розвитку кризових екологічних ситуацій (потенційно дуже нестійкі з дуже незадовільним станом землі).

Результати укрупненої типізації (рис. 1, табл. 1) свідчать про таке: у межах південної частини Херсонської області (нижче Каховського водосховища) переважають території з низьким рівнем природної водозабезпеченості місцевим поверхневим стоком і з забезпеченою додатковою водоподачею поверхневих вод для зрошення магістральними каналами з Каховського водосховища у поєднанні з зонами підвищеного екологічного ризику (Каховський зрошуваний масив) або стійкого екологічного ризику (Олександрівський масив зрошення, Каланчацька зрошувальна система). Подальше нарощування площ зрошення в межах цих типологічних



територій, з одного боку, забезпечене наявними ресурсами, з іншого – може спричинити погіршення еколого-меліоративного стану зрошуваних земель та загострення водно-екологічної ситуації, насамперед підняття РГВ.

Північна частина Лівобережжя області (колишні Верхньорогачицький, Великопетиський, Горностаївський та Нижньосірогозький райони) з наявністю в її межах Сірогозької, Рубанівської та Північно-Рогачицької зрошувальних систем і ділянок «малого» зрошення забезпечується для поливів водою Каховського водосховища, яка подається по Сірогозькому та Рубанівському каналах. Превалюючі тут ландшафти лесових вододільних рівнин із розвитком подів і балок характеризуються як потенційно умовно нестійкі та нестійкі, що за сучасного переважно задовільного із загрозою погіршення ЕМС зрошуваних земель дає підстави для віднесення цієї території до зони підвищеного екологічного ризику.

Правобережна частина області, насамперед міжріччя Дніпро-Інгулець, представлена лесовою вододільною рівниною з наявністю подів, мікрозападин і балкових знижень пере-

важно у приводосховищній зоні, долинах річок Дніпро та Інгулець. Широка смуга території вздовж правого берега нижче Каховського водосховища та річки Дніпро є забезпеченою транзитним стоком Дніпра й Інгульця з подачею води з цих водних об'єктів на окремі локальні зрошувальні системи, розосереджені в Бериславському та Нововоронцовському районах. Дніпровська вода, що використовується для зрошення, є обмежено придатною (II клас) за безпекою підключення, а вода р. Інгулець – обмежено придатна та непридатна за безпекою осолонцювання та засолення. За умовами потенційної стійкості та ЕМС зрошуваних земель тут виокремлюються типологічні області з наявністю зон допустимого (потенційно умовно нестійкі території з добрим станом поливних угідь) і підвищеного (умовно нестійкі із задовільним станом) ризику. Вищий ризик властивий ділянкам, поливи яких здійснюються водою р. Інгулець, що сприяє засоленню й осолонцюванню ґрунтів і погіршенню їх родючості.

Межіріччя Інгулець-Південний Буг у південно-західній частині області за результатами типізації відноситься до забезпечених

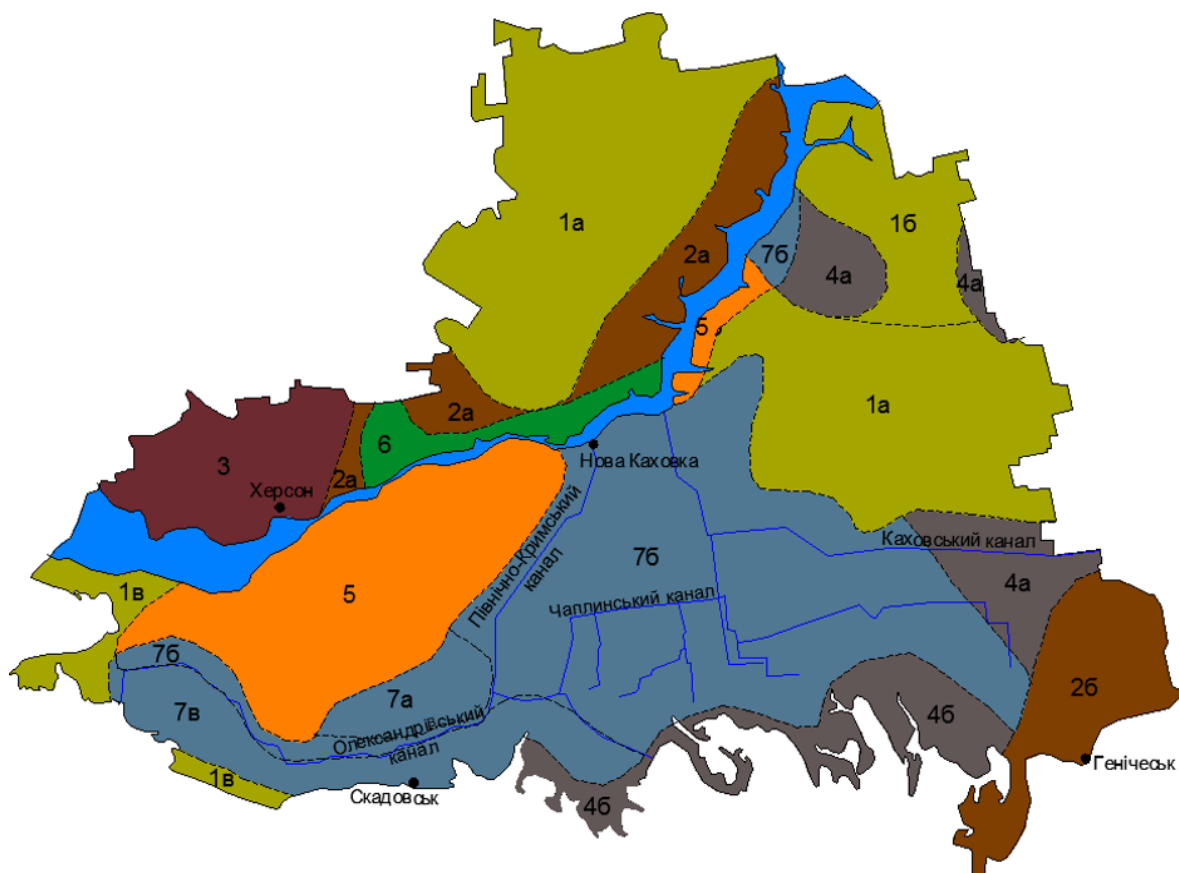


Рис. 1. Типізація Херсонської області за забезпеченістю водними ресурсами та екологічними наслідками зрошення (умовні позначення – у табл. 1)

1. Класифікаційна схема типізації Херсонської області за забезпеченістю водними ресурсами та екологічними наслідками зрошення

Характеристика типологічних областей		
№	Водозабезпеченість	Екологічний ризик (ЕР)
1а	низька природна забезпеченість місцевим річковим стоком і підземними водами	допустимий ЕР
1б		підвищений ЕР
1в		стійкий ЕР
2а	низька природна забезпеченість місцевим річковим стоком і підземними водами, забезпечено локальне зрошення транзитним стоком рр. Дніпро та Інгулець	допустимий ЕР
2б		підвищений ЕР
3	низька природна забезпеченість місцевим річковим стоком і підземними водами, забезпечена подача води для зрошення (рр. Дніпро, Інгулець, Інгулецький МК)	підвищений ЕР
4а	низька природна забезпеченість місцевим річковим стоком і підземними водами, забезпечена подача води для зрошення іригаційною мережею з Каховського водосховища	підвищений ЕР
4б		стійкий ЕР
5	низька забезпеченість місцевим річковим стоком, середня забезпеченість прогнозними ресурсами підземних вод	підвищений ЕР
6	низька забезпеченість місцевим річковим стоком, середня забезпеченість прогнозними ресурсами підземних вод, забезпечено локальне зрошення транзитним стоком рр. Дніпро та Інгулець	підвищений ЕР
7а	низька забезпеченість місцевим річковим стоком, середня забезпеченість прогнозними ресурсами підземних вод, забезпечено подачу води для зрошення іригаційною мережею з Каховського водосховища	допустимий ЕР
7б		підвищений ЕР
7в		стійкий ЕР

водою рр. Дніпро та Інгулець, Дніпровсько-Бузького лиману з подачею її на зрошення земель Інгулецького масиву, який характеризується значним насиченням поливними угіддями, наявністю подових знижень і балкової мережі. Крім того, дана типологічна область діагностується як зона підвищеного екологічного ризику.

**Висновки.** Результати еколого-меліоративного районування Херсонської області свідчать про переважно низьку природну стійкість більшості її територій до додаткового зволоження через загрозу розвитку або активізації несприятливих ґрунтово-деградаційних процесів.

Переважна більшість зрошуваних земель Херсонської області характеризується задовільним із загрозою погіршення еколого-меліоративним станом. У територіальному відношенні більша частина площ із задовільним станом приурочена до земель тривалого зрошення із Північно-Кримського каналу – Олександрівської та Каланчацької зрошувальних систем, насамперед із природно близьким або неглибоким (до 5,0 м) заляганням рівня ґрунтових вод, а також поширеними тут природно засоленими і солонцюватими ґрунтами. Визначено, що на територіях із природно

глибоким заляганням ґрунтових вод та улаштуванням систем зрошення із закритою внутрішньогосподарською іригаційною мережею, що є, зокрема, характерним для Каховської зрошувальної системи, навіть за умови значної питомої навантаженості зрошуваними землями і виконанням поливів на всій їх площі превалює задовільний ЕМС.

Виконана типізація територій Херсонської області за забезпеченістю водними ресурсами та екологічними наслідками зрошення дозволила згрупувати їх за певним джерелом формування водоресурсного потенціалу, а також наявністю екологічного ризику ведення зрошення. Виокремлені типологічні області характеризуються різними умовами природного та антропогенно сформованого волого-та водозабезпечення земель, а також імовірними екологічними наслідками впливу зрошення на навколишнє середовище, насамперед на еколого-меліоративний стан зрошуваних угідь, та потребують різних підходів до вирішення завдань із відновлення, розвитку та сталого використання зрошення.

У межах Херсонської області переважають території з низьким рівнем природної водозабезпеченості місцевим поверхневим стоком

і з забезпеченою додатковою водоподачею поверхневих вод для зрошення магістральними каналами з Каховського водосховища у поєднанні з зонами підвищеного екологічного ризику (Каховський зрошуваний масив) або з зонами стійкого екологічного ризику (Олександрівський масив зрошення, Каланчацька зрошувальна система). Подальше нарощування площ зрошення у межах цих типологічних територій, з одного боку, забезпечене наявними ресурсами, з іншого – може спри-

чинити погіршення еколого-меліоративного стану зрошуваних земель та загострення водно-екологічної ситуації, насамперед підняття рівня ґрунтових вод.

Результати як виконаної типізації, так і більш деталізованої її версії можуть слугувати геопросторовою основою планування подальшого розвитку зрошення в регіоні з урахуванням наявного водо-ресурсного потенціалу та еколого-меліоративних обмежень щодо впливу зрошуваного землеробства.

### Бібліографія

1. Тараріко Ю.О., Сайдак Р.В., Сорока Ю.В. Підсумки та перспективи досліджень з оцінки та раціонального використання агроресурсного потенціалу сільськогосподарських територій. *Меліорація і водне господарство*. 2019. № 2. С. 186–198. DOI: <https://doi.org/10.31073/miwg201902-194>
2. Меліоровані агроєкосистеми. Оцінка та раціональне використання агроресурсного потенціалу України (зони зрошення і осушення) / за ред. М.І. Ромащенко, Ю.О. Тараріка. Київ, Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. 696 с.
3. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / Ромащенко М.І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 1. С. 5–22. DOI: <https://doi.org/10.31073/miwg202001-235>
4. Зміни ресурсів ґрунтових і міжпластових вод в умовах глобального потепління клімату / Шевченко О.Л. та ін. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 3 (54). С. 90–91.
5. Сучасний стан, основні проблеми водних меліорацій та шляхи їх вирішення / за ред. П.І. Коваленка. Київ : Аграрна наука, 2001. 214 с.
6. Зубець М.В., Коваленко П.І., Михайлов Ю.О. Проблеми використання меліорованих земель в Україні. *Меліорація і водне господарство*. 2008. Вип. 96. С. 3–13.
7. Наукові основи охорони та раціонального використання зрошуваних земель України. Київ : Аграрна наука, 2009. 624 с.
8. Меліорація ґрунтів (систематика, перспективи, інновації) : колективна монографія [за ред. С.А. Балюка, М.І. Ромащенко, Р.С. Трускавецького]. Херсон : Грінь Д.С., 2015. 668 с.
9. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> (дата звернення 20.05.2022).
10. План заходів із реалізації Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 р. № 1567-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-z-realizaciyi-strategiyi-zroshennya-ta-drenazhu-s211020> (дата звернення 20.05.2022).
11. Нормативи екологічно безпечного зрошення, осушення, управління поливами та водовідведенням. Схвалено постановою Кабінету Міністрів України від 2 вересня 2020 р. № 766. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/766-2020-%D0%BF#Text> (дата звернення 19.05.2022).
12. Шевченко А.М., Драчинська Е.С. Типізація степової зони України за потенційною стійкістю ландшафтів до розвитку деградаційних процесів при зрошенні // *Меліорація і водне господарство*. 2003. Вип. 89. С. 126–135.
13. Жовтоног О.І. Закономірності сталого функціонування природно-агромеліоративних систем з урахуванням інтегрованого планування водоземлекористуванням. Інтегроване управління водними і земельними ресурсами на меліорованих територіях : монографія. Київ : Аграрна наука, 2016. С. 358–378.
14. Діденко Н.О. Стан використання зрошуваних земель. Меліоровані агроєкосистеми. Оцінка та раціональне використання агроресурсного потенціалу України (зони зрошення і осушення) / за ред.: М.І. Ромащенко, Ю.О. Тараріко. Київ, Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. С. 451–479.
15. Ромащенко М.І., Шевченко А.М., Лютницький С.М. Стан та шляхи підвищення водозабезпеченості південного регіону України водними ресурсами річки Дунай. *Меліорація і водне господарство*. 2017. Вип. 105. С. 12–21.

16. Екологія землекористування : навч. посіб. / А.М. Третяк, О.С. Будзяк, В.М. Третяк та ін. ; за заг. ред. Третяка А.М. Київ : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 178 с.
17. Консолідація земель і створення організацій водокористувачів для сталого використання і відновлення зрошення / О. Жовтоног, В. Поліщук, К. Чорна. *Економіка природокористування і сталій розвиток*. 2020. 7(26). С. 92–102.
18. Паламарчук М.М., Закорчевна Н.Б. Водний фонд України. Довідковий посібник / за ред. В.М. Хорєва, К.А. Алієва. Київ : Ніка-Центр, 2001. 392 с.
19. Вишневецький В.І. Річки і водойми України: стан і використання : монографія. Київ : Віпол, 2000. 376 с.
20. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Херсонській області у 2019 році. Херсон, 2020. URL: <https://merp.gov.ua/files/docs/Reg.report/2019/Херсонська%20область.pdf>
21. Методика оцінки і прогнозу еколого-меліоративного стану меліорованих земель. Частина 1. Методика оцінки і прогнозу еколого-меліоративного стану і стійкості земель при зрошенні. Посібник 2 до ВБН 33-5.5-01-97 «Організація і ведення еколого-меліоративного моніторингу». Київ, 2002. 147 с.
22. Методичні рекомендації з обґрунтування комплексного захисту меліорованих територій від підтоплення, застоювання та деградації ґрунтів. Київ : ІГІМ УААН, 2010. 45 с.
23. Шевченко А. М., Боженко Р.П. Еколого-меліоративна кваліфікація земель – основа їх сталого використання. *Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Землеробство*. Вип. 85. Київ : ВП «Едельвейс», 2013. С. 78–88.
24. Стан підземних вод України, щорічник. Київ : Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2021. 124 с.

#### References

1. Tarariko, Yu.O., Saidak, R.V. & Soroka, Yu.V. (2019). Pidsumky ta perspektyvy doslidzhen z otsinky ta ratsionalnogo vykorystannia ahroresursnogo potentsialu silskohospodarskykh terytorii [Results and prospects of research on evaluation and rational use of agricultural potential of agricultural territories]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*. № 2 [in Ukrainian].
2. Romashchenko, M.I., & Tarariko, Yu.O. (Ed). (2017). *Meliorovani ahroekosystemy. Otsinka ta ratsionalne vykorystannia ahroresursnogo potentsialu Ukrainy (zony zroshennia i osushennia)* [Reclaimed agroecosystems. Evaluation and rational use of agricultural potential of Ukraine (irrigation and drainage zones)]. Kyiv, Nizhyn : Vydavets P.P. Lysenko M.M. [in Ukrainian].
3. Romashchenko, M. I., Husyev, Yu. V., Shatkovskiy, A. P., Saidak, R. V., & Yatsyuk, M. V. et al. (2020). Vplyv suchasnykh klimatychnykh zmin na vodni resursy ta silskohospodarske vyrobnytstvo [Impact of modern climate change on water resources and agricultural production]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 1. 5–22 [in Ukrainian].
4. Shevchenko, O.L. et al. (2019). Zminy resursiv gruntovykh i mizhplastovykh vod v umovakh globalnogo poteplinnia klimatu [Changes in soil and interplastic water resources in the context of global climate warming]. *Hidrolohiia, hidrokhiimiia i hidroekolohiia*, 3 (54), 90–91 [in Ukrainian].
5. Kovalenko, P.I. (Ed.). (2001). Suchasnyi stan, osnovni problemy vodnykh melioratsii ta shliakhy yikh vyrishennia [The current state, the main problems of water reclamation and ways of solving them]. Kyiv : Ahrarna nauka [in Ukrainian].
6. Zubets, M.V, Kovalenko, P.I., & Mykhailov, Yu.O. (2008). Problemy vykorystannia meliorovanykh zemel v Ukraini [Problems of land use in Ukraine]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 96, 3–13 [in Ukrainian].
7. Naukovi osnovy okhorony ta ratsionalnogo vykorystannia zroshuvanykh zemel Ukrainy [Scientific foundations of protection and rational use of irrigated lands of Ukraine]. (2009). Kyiv : Ahrarna nauka [in Ukrainian].
8. Baliuk, S.A., Romashchenko, M.I., & Truskavetski, R.S. (Ed.). (2015). *Melioratsiia gruntiv (systematyka, perspektyvy, innovatsii): kolektyvna monohrafiia* [Soil reclamation (taxonomy, perspectives, innovations): collective monograph]. Kherson : Hrin D.S. [in Ukrainian].
9. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030.]: Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy № 688-p. (2019, August 14). *Uriadovi kurier*, 170. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> [in Ukrainian].

10. Plan zakhodiv z realizatsii Stratehii zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku [Action Plan for the implementation of the Irrigation and Drainage Strategy in Ukraine for the period up to 2030]: Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy № 1567-r. (2020, October 21). URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-z-realizaciyi-strategiyi-zroshennya-ta-drenazhu-s211020> [in Ukrainian].

11. Normatyvy ekolohichno bezpechnoho zroshennia, osushennia, upravlinnia polyvamy ta vodovidvedenniam [Standards of environmentally friendly irrigation, drainage, irrigation and drainage management]: Skhvaleno postanovoiu Kabinetu Ministriv Ukrainy № 766. (2020, September 2). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/766-2020-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].

12. Shevchenko, A.M., & Drachynska, E.S. (2003). Typizatsiia stepovoi zony Ukrainy za potentsiinoiu stiikistiu landshaftiv do rozvytku dehradatsiinykh protsesiv pry zroshenni [Typification of the steppe zone of Ukraine according to the potential resistance of landscapes to the development of degradation processes during irrigation]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 89, 126–135 [in Ukrainian].

13. Zhovtonoh, O.I. (2016). Zakonomirnosti staloho funktsionuvannia pryrodno-ahromelioratyvnykh system z urakhuvanniam intehrovanoho planuvannia vodozemlekorystuvanniam. Intehrovane upravlinnia vodnymy i zemelnymy resursamy na meliorovanykh terytoriiakh: Monohrafiia [Integrated management of water and land resources in reclaimed areas: Monograph]. Kyiv : Ahrarna nauka, 358–378. [in Ukrainian].

14. Didenko, N.O. (2017). Stan vykorystannia zroshuvanykh zemel. Meliorovani ahroekosystemy. Otsinka ta ratsionalne vykorystannia ahroresursnoho potentsialu Ukrainy (zony zroshennia i osushennia) [Reclaimed agroecosystems. Assessment and rational use of agro-resource potential of Ukraine (irrigation and drainage zones)]. M.I. Romashchenka & Yu.O. Tarariko (Ed). Kyiv; Nizhyn: Vydavets PP Lysenko M.M. [in Ukrainian].

15. Romashchenko, M.I., Shevchenko, A.M. & Liutnytskyi, S.M. (2017). Stan ta shliakhy pidvyshchennia vodozabezpechenosti pivdennoho rehionu Ukrainy vodnymy resursamy richky Dunai [Status and ways to increase the water supply of the southern region of Ukraine with water resources of the Danube River]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 105, 12–21 [in Ukrainian].

16. Tretiak, A.M., Budziak, O.S., & Tretiak, V.M. et al. (2017). Ekolohiia zemlekorystuvannia : navch. posib [Land use ecology: tutorial]. Tretiaka A.M. (Ed). Kyiv : Instytut ekolohichnoho upravlinnia ta zbalansovanoho pryrodokorystuvannia [in Ukrainian].

17. Zhovtonoh, O., Polishchuk, V., & Chorna, K. (2020). Konsolidatsiia zemel i stvorennia orhanizatsii vodokorystuvachiv dlia staloho vykorystannia i vidnovlennia zroshennia [Land consolidation and creation of water user organizations for sustainable use and restoration of irrigation]. *Ekonomika pryrodokorystuvannia i stalyy rozvytok*. 7(26), 92–102. [in Ukrainian].

18. Palamarchuk, M.M., & Zakorchevna, N.B. (2001). Vodnyi fond Ukrainy. Dovidkovyi posibnyk [Water Fund of Ukraine. Reference guide]. V.M. Khorieva, K.A. Aliieva (Ed). Kyiv : Nika-Tsentr [in Ukrainian].

19. Vyshnevskiy, V.I. (2000). Richky i vodoimy Ukrainy: stan i vykorystannia: Monohrafiia [Rivers and reservoirs of Ukraine: state and use: Monograph]. Kyiv : Vipol. [in Ukrainian].

20. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha u Khersonskii oblasti u 2019 rotsi [Regional report on the state of the environment in the Kherson region in 2019]. (2020). Kherson. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2019/Херсонська%20область.pdf>. [in Ukrainian].

21. Metodyka otsinky i prohnozu ekoloho-melioratyvnoho stanu meliorovanykh zemel. Chastyna 1. Metodyka otsinky i prohnozu ekoloho-melioratyvnoho stanu i stiikosti zemel pry zroshenni [Methods of assessment and forecast of ecological and reclamation condition of reclaimed lands. Part 1. Methods of assessment and forecast of ecological and reclamation status and stability of lands under irrigation.].(2002). Posibnyk 2 do VBN33-5.5-01-97 «Orhanizatsiia i vedennia ekoloho-melioratyvnoho monitorynhu». Kyiv [in Ukrainian].

22. Metodychni rekomendatsii z obruntuvannia kompleksnoho zakhystu meliorovanykh terytorii vid pidtoplennia, zatoplennia ta dehradatsii gruntiv [Methodical recommendations on substantiation of complex protection of reclaimed territories from flooding, inundation and soil degradation]. (2010). Kyiv : IHiM UAAN [in Ukrainian].

23. Shevchenko, A. M., & Bozhenko, R. P. (2013). Ekoloho-melioratyvna kvalifikatsiia zemel – osnova yikh staloho vykorystannia [Ecological and reclamation qualification of lands is the basis of their sustainable use]. *Mizhvidomchyi tematychnyi naukovyi zbirnyk. Zemlerobstvo*, 85, 78–88. Kyiv : VP «Edelveis» [in Ukrainian].

24. Stan pidzemnykh vod Ukrainy, shchorichnyk [State of groundwater in Ukraine: yearbook.]. (2021). Kyiv : Derzhavna sluzhba heolohii ta nadr Ukrainy, Derzhavne naukovo-vyrobnyche pidpriemstvo «Derzhavnyi informatsiyni heolohichniy fond Ukrainy» [in Ukrainian].

**A.M. Shevchenko, R.P. Bozhenko, S.M. Lyutnitsky**  
**Typification of Kherson region by water availability for irrigation**  
**and its environmental consequences**

**Abstract.** *The article presents the results of regional typification for the Kherson region by water availability for irrigation, taking into account the possible environmental risk as a result of the increase in irrigated area. The grouping of the territories previously differentiated by water availability into the following subtypes was performed: low rate of natural surface and groundwater water availability; sufficient rate of groundwater availability variously suitable for irrigation; high level of transit river flow availability; provided water supply of different quality from irrigation sources. Also, the territory grouping was made by the zones of ecological risk according to ecological and amelioration qualifications along with the separation of admissible ecological risk zones (potentially conditionally unstable areas with good ecological and reclamation conditions), zones of increased ecological or potentially unstable areas with the satisfactory and endangered condition), zones of sustainable ecological risk (potentially unstable areas with the unsatisfactory or very unsatisfactory land condition), zones of ecological crises development (potentially very unstable with the very unsatisfactory land condition).*

*It was specified that within the Kherson region predominate the areas with low natural water supply from local surface flow in combination with the zones of increased ecological risk (Kakhovka irrigation zone) or with the zones of stable ecological risk (Oleksandrivska irrigation zone, Kalanchak irrigation system). Additional surface water supply for irrigation is provided by the main canals from the Kakhovka reservoir. Further increase in irrigation areas within these typological territories, on the one hand, can be provided with available resources on the other hand, may lead to deterioration of ecological and reclamation condition of irrigated land and aggravation of water and ecological situation, first of all, rising groundwater level.*

**Key words:** *water availability, ecological and reclamation condition, irrigation, irrigated land, groundwater, surface water, zoning, typification.*

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-320>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/320>

UDC 631.9:633.264

## CAN ENDOPHYTE-INFECTED TALL FESCUE MINIMIZE THE GRASS TETANY RISK?

H. Rahman<sup>1</sup>, PhD, Prof., S. Saiga<sup>2</sup>, PhD, Prof., S. Sabreen<sup>3</sup>, PhD, R. Islam<sup>4</sup>, PhD

<sup>1</sup> Department of Soil and Environmental Sciences, The University of Barishal, Barishal 8254, Bangladesh  
<https://orcid.org/0000-0003-3708-4423>; e-mail: mrahaman1997@yao.co.nz

<sup>2</sup> Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka 020-8550, Japan,  
e-mail: suguru.saiga@iwate-u.ac.jp

<sup>3</sup> The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University, Morioka 020-8550, Japan  
<https://orcid.org/0000-0003-1793-7601>

<sup>4</sup> Soil, Water and Bioenergy Resources, The Ohio State University South Centers, Piketon, OH 45661, USA  
<https://orcid.org/0000-0002-2244-0395>; e-mail: islam.27@osu.edu

**Abstract.** *Non-toxic Neotyphodium (novel endophyte) has been shown to provide similar agronomic performance as wild-type endophyte to deter pathogens without exerting adverse effects on livestock. While the grass/novel endophyte interaction does not synthesize alkaloid peramine that has been linked to mammal toxicity, the connection between wild (naturally occurring) and/or novel endophyte infection and tetany ratio in forage has not been evaluated. The risk of grass tetany was evaluated in naturally occurring endophyte-infected tall fescue grass grown in Japanese Andisol. Three tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) ecotypes (Fukaura, Koiwai and Showa) either infected with *Neotyphodium coenophialum* (Morgan-Jones and Gams) Glenn, Bacon and Hanlin ( $E^+$ ), or noninfected ( $E^-$ ) were grown in low phosphorus (P) availability black Andisol and high P availability red Andisol under a controlled environment. The biomass nutrient concentration was measured and the tetany ratio,  $K/(Ca+Mg)$ , was established for all three fescue ecotypes.*

*Results showed that K, Ca, and Mg concentrations and the  $K/(Ca+Mg)$  were significantly affected by endophytes, soils, and ecotypes and their interactions. Regardless of ecotypes and soils, K, Ca, and Mg concentrations were higher in endophyte-infected plants when compared to the control. Among the endophyte-infected ecotypes, the Fukaura and Koiwai showed higher K, Ca, and Mg concentrations in red Andisol. In contrast, the Showa ecotype showed higher K, Ca, and Mg concentrations in endophyte-infected plants than the control in black Andisol. Notwithstanding ecotypes and soils, endophyte-infected plants showed lower  $K/(Ca+Mg)$  than their counterparts, suggesting that the grass/endophyte interaction could provide a means of reducing the incidence of grass tetany in livestock.*

**Key words:** *Andisol, Cool season grass, Biologically modified plant, Ecotype, Neotyphodium coenophialum.*

**Introduction.** Tall fescue is a long-lived, cool season  $C_3$  perennial grass, which is well-adapted for its tolerance to diverse soil and climatic conditions, including marginal, degraded, acidic, and poorly drained soils, and is tolerant to abiotic stresses such as drought and overgrazing [12].

While tall fescue is a highly productive and nutritionally valuable forage species [38], several studies have reported that ruminants feeding on tall fescue suffer from serious disorders. One of them is grass tetany (also known as grass staggers, crested wheatgrass poisoning, wheat pasture poisoning, winter tetany, transport tetany, pasture flush staggers, and in calves, a disorder called milk tetany) associated with nutrient imbalance in forage, especially for the period of the autumn growth [18; 39]. The other one is ergotism caused by the synthesized ergot alkaloids

in forage due to the infection of grass by the wild fungal endophytes [13].

Grass tetany (*Hypomagnesemia*) is a non-infectious, but often fatal, metabolic ailment to cattle and sheep in temperate climates that is caused by nutritional imbalances associated with K, Ca, and Mg concentrations in forages [18]. The problem is prevalent in the United Kingdom, western Europe, South Africa, Argentina, New Australia, Zealand, the United States [25] and Japan [34], and losses of livestock are well documented. *Neotyphodium* is a genus of symbiotic endophytic fungi that exists with tall fescue grass. Most of fungi including the type of species *Neotyphodium coenophialum* (Morgan-Jones & W. Gams) Glenn, C.W. Bacon & Hanlin (1996), were merged into the genus *Epichloë* [22]. It used to store several asexually reproducing

species that colonize the cool-season grass leaves. The intrusion of these fungi into grasses occurs either naturally or artificially [21], which can be considered as a biological modification of plant. The association between grass and the fungal endophyte is a mutualistic, symbiotic relationship, as both symbionts derive benefits from their interaction. The tall fescue-endophyte symbiosis confers a competitive advantage to the plant. Host plants express increased tolerance to biotic- and abiotic stresses, which results in better ecosystems persistence [23]. The endophyte-infected tall fescue deters herbivorous insects and mammals, while also inciting drought and disease resistance [16]. Moreover, endophyte-infected diets significantly reduced body weight of mouse [19]. Rahman et al. (2006) reported that growth responses of tall fescue to endophyte infection depended on the grass host ecotype and soil nutrient status. Rahman and Saiga (2007) also observed that endophyte-infected tall fescue produced significantly higher amount of dry-matter than that of the endophyte-free tall fescue, when grown in P-deficient and other nutrient-limited soils, and the reverse is true for P-enriched, but otherwise nutrient-deficient soils. Rahman and Saiga (2005) indicated that responses to endophyte infection by tall fescue varies physiologically and morphologically depending on soil nutrient status. However, in nutrient deficient soils with a higher reactive P content, the endophyte infection may instead be a disadvantage as growth and nutrient acquisition of tall fescue is dependent on abiotic (soil fertility) and biotic (endophyte infection) factors.

In the mutualisms, the symbiont produces secondary metabolites called alkaloids, including lolines (saturated 1-aminopyrrolizidines with an oxygen bridge), peramine (a pyrrolopyrazine), and ergot alkaloids [4]. While *N. coenophialum* possesses all the genes for loline biosynthesis [20], it did not produce any loline in cultured systems [3]; only the symbiotic relationship between fescue and endophyte produces lolines [37]. The loline have been shown to deter insect herbivory (biocontrol services) and may cause various other responses in higher organisms. Despite their lower concentrations, the ergot alkaloids significantly affect animal growth, resulting in homeostatic instability such as reduced weight gains, elevated core temperatures, restricted blood flow, reduced milk production, and reproductive problems. Peramine, alike the ergot alkaloids, is found in much lower concentrations in the host compared to loline alkaloids. It is primarily insecticidal and adversely affects mammals or other herbivores [32].

It is reported that ergotism, as well as grass tetany, in livestock caused by tall fescue needs to

be managed proactively in a sustainable manner. To address this concern, (i) non-toxic *Neotyphodium* AR542 (e. g., MaxQ™ & MaxP™), known as novel endophyte, was released and has been proven to provide similar levels of agronomic performance as wild-type endophyte for deterring the impact of insects without adverse effects on livestock [27]; and (ii) significant advancement has been made in breeding plants that exhibit constantly higher Mg content cultivars viz., Magnet (Italian ryegrass), HiMag (Tall fescue), Mgwell (Orchardgrass) succeeded by Hides and Thomas (1981), and bred by Mayland and Sleper (1993), and Saiga et al. (2002), respectively. Selective plant breeding was successful in producing an experimental tall fescue cultivar, HiMag, containing higher Mg and Ca concentrations compared to K content in the forage. The Mg concentration consistently above the 0.2% threshold and a tetany ratio  $[K/(Ca+Mg)]$  below 2,2 suggests that the HiMag grass would greatly reduce the risk of grass tetany [39].

There is an urgent need to delve into the relationship, if any, between endophyte infection and grass tetany risk in tall fescue, as it has yet to be investigated. We hypothesized that endophyte infection will minimize the tetany risk in tall fescue. To test the hypothesis, a pot culture study was conducted with three tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) ecotypes either infected with *N. coenophialum* (E<sup>+</sup>) or noninfected (E<sup>-</sup>) under greenhouse conditions.

#### Materials and methods

**Grass species.** Three tall fescue ecotypes, viz. Fukaura (at 40° 38' 52.3" N, 139° 55' 39.1" E), Koiwai (at 39° 44' 53" N; 141° 0' 53" E), and Showa (at 39° 52' 0" N; 140° 5' 0" E) were collected from Aomori (40° 49' 28.8" N; 140° 44' 26.3" E), Iwate (39° 42' 57" N; 141° 8' 14" E), and Akita (39° 43' 7" N; 140° 6' 9" E) prefectures, respectively, in the northern region of Honshu Island, Japan. The ecotypes were collected 80–100 km apart among the sites to maximize the likelihood of different ecotypes that were infected with their naturally occurring strains of *N. coenophialum*. Endophyte-infected plants were divided into two groups, one group was then treated with benomyl fungicide [21] to eliminate the endophytic fungus *N. coenophialum* and the other group was untreated control. Fungicide-treated and untreated plants were grown in the research field plots at Iwate University (39° 41' 59.81" N; 141° 09' 0.04" E), Japan in black Andisol, without any chemicals or fertilizers, under natural climatic conditions. At every 60 days after planting, the plants were tested for the endophyte infections by staining fresh tissues with rose Bengal [35]. Ramets were prepared of equal size and shape by cutting the



shoots 5 cm above the crown, and the roots 5 cm below the crown. Each ramet was selected from a single tiller with three adventitious roots to equalize their initial sizes and shapes.

**Soil processing and analysis.** Composite samples of both black and red Andisols were collected from Iwate University campus (Uedai: Upper grassland) in Morioka city (39° 41' 59.81" N; 141° 09' 0.04" E) in the prefecture of Iwate and the Nikaho highland in the prefecture of Akita (39° 12' 10.8" N; 139° 54' 27.9" E), respectively, in the northern region of Japan. Soil samples were air-dried under shade at room temperature for 15 days, gently crushed with a ceramic pestle and mortar, and 2-mm sieved for selected chemical and physical analysis using standard methods.

The two Andisols used in this experiment were in different soil fertility status (Table 1). The black Andisol (naturally low content of available P with high P retention capacity but high in other nutrients) and the red Andisol (naturally high content of P with low P retention capacity and low in other nutrients). The plastic containers used in this were filled with 2 kg of air-dried soil after removing large and visible plant debris, which was passed through a 4-mm sieve. The soils were brought to field moisture-holding capacity (333 mbar) after adding the required amount of water and then covered with a black polyethylene film to prevent evaporation followed by equilibrium at

greenhouse temperature for five days. The pots were then weighted and considered the initial weight at field moisture-holding capacity.

**Experimental design and cultural practices.**

The experiment was established as a split-plot model with two soil fertility levels (main plot) and endophyte/tall fescue ecotype associations (split-plot) with three replications for each treatment combination. The plants with E<sup>+</sup> and E<sup>-</sup> tall fescue ecotypes were transplanted into the pots and allowed to grow under greenhouse conditions with mean maximum and minimum temperatures of 24/11°C maintaining 14 h photoperiod, @ 280 μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> light density, and average relative humidity 75±5% for 133 days without any chemical fertilizers and chemical treatments. The pots were weighed immediately after transplanting the plants and was maintained at field moisture-holding capacity. Water was added on a weekly basis to maintain field moisture capacity during the primary growth period (11 weeks) and every alternate day throughout the regrowth period (8 weeks) because of rapid changes in the diurnal water content of the soils.

**Plant harvest and nutrient analysis.** The plants were clipped at a cutting height of 3-cm after 11 weeks of planting and allowed to regrow for another eight weeks and clipped again at the same height. The clippings (primary growth and regrowth) were dried at 55 °C for 48-h in

1. Properties of Andisols for growing tall fescue under controlled conditions

Properties	Unit/System	Value	
		Black Andisol	Red Andisol
Color (Moist)	Munsell color chart	Black (7.5Y2/1)	Redish brown (2.5YR4/6)
Structure	–	Massive	Granular and crumb
pH	–	6.02	5.00
EC	μS cm <sup>-1</sup>	65.3	57.6
CEC	meq 100g <sup>-1</sup> soil	28.8	25.6
Organic matter	gkg <sup>-1</sup>	184	94
P retention capacity	–	1962	604
N	%	0.34	0.12
P	mg100 <sup>-1</sup> g soil	6.71	15.3
K	mg100 <sup>-1</sup> g soil	39.6	20.3
Ca	mg100 <sup>-1</sup> g soil	316	0.91
Mg	μg100 <sup>-1</sup> g soil	31.8	1.18
Cu	μg100 <sup>-1</sup> g soil	1.42	0.36
Mn	μg100 <sup>-1</sup> g soil	29.4	3.2
Zn	μg100 <sup>-1</sup> g soil	2.18	0.10
Textural class	Australian System	Sandy loam	Sandy clay loam

a forced-air oven followed by grinding and digested with a nitric acid-perchloric acid mixture at a 2:1. The concentrations of K, Ca, and Mg in the diluted aliquots were measured using Perkin Elmer-3300 atomic absorption spectrophotometry. The tetany ratio was computed  $[(K/(Ca+Mg)) \text{ on } M_c \text{ basis}]$  according to Kemp and  $\tau$ 'Hart (1957).

**Statistical analysis.** A three-way analysis of variance (ANOVA) was employed to determine whether endophyte infection affected soil nutrient concentration (K, Ca, and Mg) and grass tetany ratio  $[K/(Ca+Mg)]$  of tall fescue. The ANOVA model was comprised of endophyte, soil, and ecotype as the main fixed source of variation with three pairwise: endophyte x soil, endophyte x ecotype, and soil x ecotype and one three-way: endophyte x soil x ecotype interactions. To assess the results, Duncan Multiple Range test was performed using the approach of RYAN-EINOT-GABRIEL-WELSCH (Ryan 1960) and compared with the variables at  $p \leq 0.05$  level of significance. The Statistical Analysis System (SAS Institute, Cary, NC, USA) was used for all statistical analyses.

**Results.** The ANOVA showed that concentrations of K, Ca, and Mg were significantly

influenced by endophyte, soil, ecotype, and their interactions (Table 2).

The two-way interaction (endophyte x soil, endophyte x ecotype, and soil x ecotype) on nutrient contents indicated that endophyte exhibited variable effects on the host plants anticipated to variations in soil fertility status. Concentration of Ca and Mg in endophyte-infected plants were significantly higher irrespective of ecotypes and soils while K concentrations were almost same in endophyte-infected, and endophyte free tall fescue shoot regardless of ecotypes and soil with the exception for ecotypes Fukaura and Koiwai grown in red Andisol (Table 3).

The nutrient content in endophyte infected Fukaura and Koiwai ecotypes was consistently higher in the black Andisol when compared to the red Andisol (Table 3); however, an opposite trend was observed for all noninfected ecotypes of Showa grown in the red Andisol. Irrespective of ecotypes, endophyte-infected tall fescue grown in both black and red Andisols had 0,2 to 7,5% and 4,4 to 89,3% higher K contents, respectively. The Ca and Mg contents in Fukaura ecotypes grown in the black Andisol showed 7,2% and 26,3% higher in  $E^+$  plants. The ecotypes Koiwai and Showa showed

## 2. Three-way ANOVA for mineral nutrient concentration of tall fescue ecotypes

Variable	Source of variations	df	MS	F	Pr > F
Potassium (K)	Endophyte	1	211398	8922	0.0001
	Soil	1	57903	2444	0.0001
	Ecotype	2	59683	2519	0.0001
	Endophyte x Soil	1	191949	8102	0.0001
	Endophyte x Ecotype	2	72140	3045	0.0001
	Soil x Ecotype	2	59111	2495	0.0001
	Endophyte x Soil x Ecotype	2	68917	2909	0.0001
Calcium (Ca)	Endophyte	1	4602	493.9	0.0001
	Soil	1	1529	164.1	0.0001
	Ecotype	2	1412	151.6	0.0001
	Endophyte x Soil	1	3345	359.0	0.0001
	Endophyte x Ecotype	2	1638	175.8	0.0001
	Soil x Ecotype	2	1599	171.6	0.0001
	Endophyte x Soil x Ecotype	2	1550	166.3	0.0001
Magnesium (mg)	Endophyte	1	1574	513.625	0.0001
	Soil	1	72.82	23.762	0.0001
	Ecotype	2	314.0	102.464	0.0001
	Endophyte x Soil	1	798.3	260.488	0.0001
	Endophyte x Ecotype	2	378.5	123.504	0.0001
	Soil x Ecotype	2	553.1	180.503	0.0001
	Endophyte x Soil x Ecotype	2	518.0	169.0	0.0001

21,8% and 18,2%, and 22% and 27% higher Ca and Mg concentrations in E+ than E- plants grown in the black Andisol, respectively. In contrast, endophyte-infected ecotypes Koiwai and Showa showed 89,8% and 23,0%, and 90,5% and 19,4% higher Ca and Mg concentrations, respectively, in the red Andisol. Regardless of ecotypes and soils, the K, Ca, and Mg concentrations were higher in E+ plants than in E- plants.

The K/(Ca+Mg) did significantly influence by endophyte, soil, and ecotype (Table 4) and their interactions, except for endophyte × soil, endophyte × ecotype, and endophyte × soil × ecotype. A significant soil x ecotype indicated there were ecotype-specific differences K/(Ca+Mg) in

response to soil types. The concentrations of K, Ca, Mg, and grass tetany ratio were consistently affected by the endophyte infection, accounting for 64, 61, 80,3, and 54,9%, respectively (Table 2). The influence of predictor variables was in the order of endophyte > ecotype > soil for the concentration of K and Mg, and endophyte > soil > ecotype for the concentration of Ca and K/(Ca+Mg).

The highest K/(Ca+Mg) was observed in non-infected tall fescue irrespective of ecotype and soils (Table 5). In our study, the values for tetany ratio, K/(Ca+Mg) were significantly higher than the threshold (>2,2) values when compared to endophyte infection in Fukaura ecotype grown on both Andisols.

3. Nutrient element concentration in tall fescue ecotypes as affected by endophyte infection\*

Ecotype	Soil Type	Nutrient (mg g <sup>-1</sup> )					
		K		Ca		Mg	
		E+	E-	E+	E-	E+	E-
Fukaura	Black Andisol	142.63aB	142.40aA	18.01aB	16.71aA	17.81aB	13.05bA
	Red Andisol	388.53aA	116.03bA	38.84aA	10.22bB	23.21aA	6.33bB
Koiwai	Black Andisol	187.22aB	173.21aA	20.89aB	16.34bA	15.93aB	12.38aA
	Red Andisol	692.67aA	74.28bB	103.67aA	10.54bB	55.67aA	5.29bB
Showa	Black Andisol	182.14aA	174.15aA	22.98aA	18.84bA	18.98aA	13.86bA
	Red Andisol	108.97aB	101.97aB	16.13aB	12.40aA	8.61aB	6.95aB

\* Values within the rows and endophyte infections within ecotypes for each variable with the same uppercase letter (s) are not significantly different at  $P \leq 0.05$ .

\* Values within the columns and soils within ecotypes for each variable with the same lowercase letters are (s) not significantly different at  $P \leq 0.05$ .

4. Three-way ANOVA for mineral nutrient ratio of tall fescue ecotypes

Variable	Source of variations	df	MS	F	Pr>F
K/Ca+Mg	Endophyte	1	0.70	21.4	0.0001
	Soil	1	0.362	11.0	0.0030
	Ecotype	2	0.215	6.54	0.0050
	Endophyte x Soil	1	0.028	0.86	0.8610
	Endophyte x Ecotype	2	0.059	1.78	0.1890
	Soil x Ecotype	2	1.678	51.0	0.0001
	Endophyte x Soil x Ecotype	2	0.005	0.14	0.8710
K/Mg	Endophyte	1	0.85	29.4	0.0001
	Soil	1	0.469	13.8	0.0010
	Ecotype	2	0.295	7.94	0.0050
	Endophyte x Soil	1	0.088	1.06	0.9620
	Endophyte x Ecotype	2	0.079	2.28	0.2019
	Soil x Ecotype	2	3.678	61.1	0.0001
	Endophyte x Soil x Ecotype	2	0.009	0.19	0.9876

## 5. Mineral nutrient ratio in tall fescue ecotypes as affected by endophyte infection\*

Ecotype	Soil	K/(Ca+Mg)**		K/Mg	
		E+	E-	E+	E-
Fukaura	Black Andisol	1.51bA	1.95aA	7.99bB	10.92aB
	Red Andisol	2.55bB	2.88aB	15.07bA	18.93aA
Koiwai	Black Andisol	2.05aA	2.42aA	11.58bA	14.09aA
	Red Andisol	1.83aA	1.92aB	12.17aA	14.49aA
Showa	Black Andisol	1.72bA	2.13aA	9.59bB	12.86aB
	Red Andisol	1.81bA	2.19aA	12.44bA	14.97aA

\*Values within the rows and endophyte infections within ecotypes for each variable with the same uppercase letter (s) are not significantly different at  $P \leq 0,05$ .

\* Values within the columns and soils within ecotypes for each variable with the same lowercase letter (s) are not significantly different at  $P \leq 0,05$ .

\*\*Safe if  $K/(Ca+Mg)$  is  $\leq 2.2$ ; Risky if  $K/(Ca+Mg)$  is  $>2.2$ .

The value of  $K/(Ca+Mg)$  was significantly higher than the threshold values in Koiwai ecotype grown in the black Andisol. Irrespective of soils and endophyte infections, Showa had lower threshold values of  $K/(Ca+Mg)$  than the other ecotypes. The highest value of tetany ratio (2,9) was recorded in endophyte-infected Fukaura ecotype grown in the red Andisol, and the lowest (1.5) in endophyte-infected Fukaura ecotype grown in the black Andisol. A significantly lower  $K/Mg$  in endophyte-infected plants irrespective of ecotypes and soils was observed. In black Andisol, the  $K/Mg$  were 36,6%, 27,7% and 34,1% lower in endophyte infected ecotypes of Fukaura, Koiwai and Showa, respectively. In red Andisol, the  $K/Mg$  were 25,6%, 22,7% and 20,2% lower in endophyte infected ecotypes of Fukaura, Koiwai and Showa, respectively.

**Discussion.** The significant three-way interaction (endophyte x soil x ecotype) for nutrient contents related to grass tetany showed that the ecotype-specific nutrient acquisition responses to endophyte were dependent on soil nutrient contents. A significantly higher concentration of Ca and Mg in endophyte-infected plants irrespective of ecotypes and soils was due to altered plant characteristics which enhances transport and uptake of Ca and Mg from root to shoot (Table 3). The process responsible for increased transport of Ca and Mg from roots to shoot of endophyte-infected plant may be due to greater root exudation, fine root production, and carrier-mediated transport systems. The uptake and translocation mechanisms of essential nutrients in endophyte-infected plants depend on root architecture creating nutrient-specific root morphology (length, number, density, angle, and diameter) and activities of diverse nutrient transporters (transcription, mRNA stability, translation, polar localization, protein modification and protein degradation) in response to greater

nutrient availability [1]. The highest shoot Ca and Mg concentrations were observed due to root alteration which accounted plant's ability to absorb greater amounts of Ca and Mg or a difference in their ability to transport those essential elements. Our results justified that the endophyte infections proactively translocate more Ca and Mg from roots to shoot than its counterparts, and that endophyte infection is associated with greater synthesis of active nutrient transporters in plants.

Generally, nutrient uptake in plants depends on concentrations and ionic activity of nutrients in soil solution as well as the soil's ability to replenish and/or buffer those nutrients in the soil solution. It is expected that nutrient uptake and transport mechanisms could have been enhanced in the rhizosphere of biologically modified (like endophyte infection) plants through altering mass flow and diffusion processes. Barber (1984) reported that both Mg and Ca ions are often supplied to the roots by mass flow and ion exchange, while K is supplied by diffusion process. The Mg availability is influenced by the Mg concentration relative to the soluble and exchangeable K and Ca, respectively. In contrast, the K concentration had a greater suppressive effect on Mg translocation to the shoot than Mg uptake by roots as reported by Hannaway et al. (1982). It is expected that endophyte-infected plants might absorb more Mg and Ca due to greater release of organic acids as well as chelate production in the rhizosphere [9]. Increased Mg and Ca concentrations relative to K concentration in the herbage is expected to contribute significantly to the value of the forage grass and greatly reduce animal losses [39]. It was suggested that endophyte infection alters the soil enzyme activities which improves the plant nutrient availability over time. A greater enzymes activity was recorded in endophyte-infected plant rhizospheres which

as well is dependent on plant growth stage [17]. Fang et al. (2010) reported that enhanced urease and acid phosphatase activities which lead to increase of nutrient concentrations in both rhizosphere and soils. Moreover, the solubility of each nutrient depends on internal soil environment and root induced changes in the rhizosphere is also a causative factor for increased nutrient availability for plants [24]. The relation between endophyte infection and dry matter production, water use efficiency and chlorophyll content were studied by Rahman et al (2003). They observed the higher dry matter production associated with higher water use efficiency and higher chlorophyll content in endophyte infected plants. They pointed out that plant biomass production depends on the accumulation of carbon products via photosynthesis. Carbohydrate accumulation in leaves is boosted with Mg content and which is engaged in the source-to-sink transport of carbohydrates [11]. Therefore, it could be conferred that Mg as a highly movable element favourably transported to leaves in E+ plants to enhance in photosynthetic activity.

The risk of grass tetany increases at a  $K/(Ca+Mg)$  of 2,2 or higher [5; 18]. While the mechanism for decreased tetany potential ratio is still unknown; however, the endophyte/grass interaction may have involved to increase the uptake of nutrients by roots and translocation to shoot in a synergistic manner to balance the system. Endophyte/grass interaction has been found to alter the composition of root exudates, which leads to increased microbial activity and diversity as well as nutrient mining from rhizosphere [40]. Several studies have indicated that *Neotyphodium* shoot endophytes can influence root architecture in grasses [7]. While the root characteristics were not evaluated between infected and non-infected plant grown in different Andisols, we expected that root length was higher due to endophyte infection in Andisols, which is collaborated with the results of Crush et al. (2004). They reported that the endophyte-infected plants had fewer roots close to the surface than the subsurface. Carrow (1996) reported that endophyte-infected tall fescue had a higher root length density in subsurface soil, suggesting the plant's ability to maintain evapotranspiration while the soil moisture availability was limited. This pattern of root distributions is important for abiotic stress especially drought resistance of endophyte-infected grasses. Conversely, if endophyte infected plants were able to extract more soil solution from deeper soil depths, this should be advantageous for  $K/(Ca+Mg)$ , which would be lower because of K dilution when compared to more Ca and Mg

content. Shawmaker et al. (2004) observed that the K concentration decreased with soil depth. They concluded that roots growing at the deeper soil depths had a substantially more favourable  $K/(Ca+Mg)$  and  $K/Mg$  in the soil solution than that at the shallower depths. The lower  $K/(Ca/Mg)$  in soil solution should have to allow for a lower grass tetany risk in the endophyte-infected plant tissue.

Significantly higher Mg concentration and lower tetany ratio with E+ plants suggested that all E+ ecotypes are expected to reduce the incidence of grass tetany in tall fescue grown on temperate Andisols. It is evident from our study that the grass tetany risk of ruminant is higher with noninfected tall fescue ecotypes grown in temperate Andisols. Our study also suggested that feeding cattle on tall fescue, the ecotype Fukaura grown in the red Andisol is a potential risk of grass tetany, irrespective of endophyte infections. The Koiwai non-infected ecotype grown in the black Andisol also has a risk of grass tetany for ruminants; however, ecotype Showa of tall fescue is expected to be safe for grazing cattle, regardless of soil types as well as endophyte infections.

**Conclusions.** The  $K/(Ca+Mg)$  is an important key index to predict grass tetany risk in ruminants. Our results showed that the K, Ca, and Mg contents were higher in endophyte-infected tall fescue when compared to the non-infected plants; however, the tetany ratio was lower for E+ than for E- tall fescue, regardless of ecotypes and soils. The endophyte-infected tall fescue could be considered as a suitable forage species for ruminants with low grass tetany risk grown in temperate Andisols. The lower tetany ratio in infected tall fescue ecotypes confirmed that biologically modified plants (the endophyte infection) can be used as a management tool to overcome the incidence of grass tetany in ruminants. Even though our study did not detect the factor(s) responsible for increased uptake and transport of Ca and Mg from roots to shoot of endophyte-infected plants, it is most probably due to greater root distribution and carrier-mediated transport. An experiment that measures the factors would probably be necessary to address the active uptake and translocation hypothesis anticipated. This is a model study which indicated that endophyte infection reduces the grass tetany ratio in tall fescue ecotypes irrespective of soil fertility status. Further studies are needed in field-scale trials to validate the optimal grazing management strategies of high Mg-containing forage strains or cultivars infected by wild, as well as novel endophytes throughout the year.

**Acknowledgements.** Authors are thankful to Bradford Sherman (Soil, Water, and Bioenergy Resources, The Ohio State University South

Centers Piketon, OH 45661, USA) for the critical reading and suggestions of the manuscript.

**Conflict of interests:** The authors have no conflicts of interest to declare.

**Availability of Data and Material.** All data generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon request.

**Authors' Contributions.** All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by Hasinur Rahman. Statistical analyses were done by Shamima Sabreen. The first draft of the manuscript was written by Hasinur Rahman. First draft was corrected by Rafiq Islam. Final revision of the manuscript was performed by Hasinur Rahman.

### References

1. Aibara, I., & Miwa, K. (2014). Strategies for optimization of mineral nutrient transport in plants: multilevel regulation of nutrient-dependent dynamics of root architecture and transporter activity. *Plant Cell Physiol*, 55(12), 2027–2036.
2. Barber, S.A. (1984). Nutrient Absorption by Plant Roots. In: *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach*, (Ed. Barber, S.A.), J. Wiley & Sons: New York.
3. Blankenship, J.D., Spiering, M.J., Wilkinson, H.H., Fannin, F.F., Bush, L.P., & Schardl, C.L. (2001). Production of loline alkaloids by the grass endophyte, *Neotyphodium uncinatum*, in defined media. *Phytochemistry*, 58 (3), 395–401.
4. Bush, L.P., Fannin, F.F., Siegel M.R., Dahlman, D.L., & Burto, H.R. (1993) Chemistry, occurrence, and biological effects of saturated pyrrolizidine alkaloids associated with endophyte-grass interactions. *Agric Ecosyst Environ*, 44, 81–102.
5. Butler, E.J. (1963). The mineral element content of spring pasture in relation to the occurrence of grass tetany and hypomagnesemia in dairy cows. *Journal of Agricultural Sciences (Cambridge)*, 60, 329–340.
6. Carrow, R.N. (1996). Drought avoidance characteristics of diverse tall fescue cultivars. *Crop Sci.*, 36, 371–377.
7. Chen, Z., Jin, Y., Yao, X., Chen, T., Wei, X., Li C., White, J.F., & Nan, Z. (2020). Fungal endophyte improves survival of *Lolium perenne* in low fertility soils by increasing root growth, metabolic activity and absorption of nutrients. *Plant Soil*, 452, 185–206.
8. Crush, J.R., Popay, A.J., & Waller, J. (2004). Effect of different *Neotyphodium* endophytes on root distribution of a perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivar. *New Zealand J Agric Res.*, 47, 345–349.
9. Dezam, A.P.G., Vasconcellos, V.M., Lacava, P.T., & Farinas, C.S. (2017). Microbial production of organic acids by endophytic fungi. *Biocat Agric Biotechnol.*, 11, 282–287.
10. Fang, S., Liu, J., Liu, D., & Xie, B. (2010). Enzymatic activity and nutrient availability in the rhizosphere of poplar plantations treated with fresh grass mulch. *Soil Sci Plant Nutr.*, 56, 483–491.
11. Farhat, N., Elkhouni, A., Zorrig, W., Smaoui, A., Abdelly, C., & Rabhi, M. (2016). Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta Physiol Plant.*, 38, 145.
12. Fribourg, H.A., Hannaway, D.B., West, C.P. (2009). Tall Fescue for the Twenty-First Century. Agronomy monograph No. 5. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
13. Guerre, P. (2015) Ergot Alkaloids Produced by Endophytic Fungi of the Genus *Epichloë*. *Toxins*, 7, 773–790.
14. Hannaway, D.B., Bush, L.P., & Leggett, J.E. (1982). Mineral composition of Kenhy tall fescue as affected by nutrient solution concentrations of Mg and K. *Journal of Plant Nutrition*, 5, 137–151.
15. Hides, D.H., & Thomas, T.A. (1981.) Variation in the magnesium content of grasses and its improvement by selection. *J Sci Food Agric.*, 32, 990–991.
16. Hoveland, C.S., Schmidt, S.P., King, Jr.C.C., Odom, J.W., Clark, E.M., McGuire, J.A., Smith, L.A., Grimes, H.W., & Holliman, J.L. (1983) Steer performance and association of *Acremonium coenophialum* endophyte on tall fescue pasture. *Agron Journal*, 75, 821–824.
17. Hou, W., Wang, J., Nan, Z., Christensen, M.J., Xia, C., Chen, T., Zhang, Z., & Niu, X. (2020). *Epichloë gansuensis* endophyte-infection alters soil enzymes activity and soil nutrients at different growth stages of *Achnatherum inebrians*. *Plant Soil*, 455, 227–240.
18. Kemp, A., & Hart, M.L. (1957) Grass tetany in grazing milk cow. *Neth. J. Agric. Sci.* 5. P. 4–17.
19. Kobayashi, H., Rahman, M.H., Hossain, M.M., Suzuki, T., Inoue, T., & Saiga, S. (2004). Application of experimental animals to toxicological study of feed poisoning in livestock. *Jpn J Anim Hyg.*, 30(2), 103–109.

20. Kutil, B.L., Greenwald, C., Liu, G., Spiering, M.J., Schardl, C.L., & Wilkinson, H.H. (2007). Comparison of loline alkaloid gene clusters across fungal endophytes: Predicting the co-regulatory sequence motifs and the evolutionary history. *Fungal Genet Biol.*, 44 (10), 1002–1010.
21. Latch G.C.M, Christensen M.J. (1985) Artificial infection of grasses with endophyte. *Ann Appl Biol.*, 107(1), 17–24.
22. Leuchtman, A., Bacon, C.W., Schardl, C.L., White, J.F., & Tadych, M. (2014). Nomenclatural realignment of *Neotyphodium* species with genus *Epichloë*. *Mycologia.* 106 (2), 202–215.
23. Malinowski, D.P., & Belesky, D.P. (2000). Adaptations of endophyte infected cool season grasses to environmental stresses: mechanisms of drought and mineral stress tolerance. *Crop Sci.* 40(4), 923–940.
24. Marschner, P. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3<sup>rd</sup> edn. Academic Press, San Diego.
25. Mayland, H.F., & Grunes, D.L. (1979) Soil-Climate-Plant Relationships in Etiology of Grass Tetany. In: *Grass Tetany*, Rendig, V.V. and Grunes D.L (Eds.). Vol. 35, 123–175. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI 53711–5801, USA.
26. Mayland, H.F., & Sleper, D.A. (1993). Developing a tall fescue for reduced grass tetany risk. *Proceedings XIV International Grassland Congress, Palmerton North, New Zealand and Australia*, 17, 1095–1096.
27. Parish, J.A., McCann, M.A., Watson, R.H., Hoveland, C.S., Hawkins, L.L., Hill, N.S., & Bouton, J.H. (2003). Use of non-ergot alkaloid-producing endophytes for alleviating tall fescue toxicosis in sheep. *J Anim Sci.*, 81, 1316–1322.
28. Rahman, M.H., Saiga, S., Kodama, Y., & Tsuiki, M. (2003). Effects of endophyte infection on tall fescue ecotypes grown in different Andisols. *Grassl Sci.*, 49, 7–11.
29. Rahman, M.H., & Saiga, S. (2005). Endophytic fungi (*Neotyphodium coenophialum*) affect the growth and mineral uptake, transport, and efficiency ratios in tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Plant Soil*, 272, 163–17.
30. Rahman M.H., Saiga, S., Sabreen, S., Kodama, Y., & Tsuiki, M. (2006). *Neotyphodium* endophyte infection affects the performance of tall fescue in temperate region Andisols. *Grassl Sci.*, 52, 23–28.
31. Rahman, M.H., & Saiga, S. (2007). Endophyte effects on nutrient acquisition in tall fescue grown in Andisols. *J Plant Nutr.*, 30, 2141–2158.
32. Rowan. D.D., & Latch, G.C.M. (1994) Utilization of Endophyte Infected Perennial Ryegrass for Increased Insect Resistance. In C.W. Bacon and J.F. White, Jr. (Eds.) *Biotechnology of endophytic fungi of grasses*. Boca Raton, Florida. CRC Press.
33. Ryan, T.A. (1960) Significance tests for multiple comparisons of proportions, variances, and other statistics. *Psychol Bull.*, 57, 318–328.
34. Saiga, S. (1997) Possibility of livestock poisoning caused by endophyte. *The Dairy Situation*, 57, 14–21.
35. Saiga, S., Saitoh, H., Sabreen, S., & Tsuiki, M. (2002) Effectiveness of nutrient solution culture for detecting genetic variability in Mg concentration of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.). *Grassl Sci.*, 48, 209–215.
36. Shewmaker, G.E., Johnson, D.A., Mayland, H.F., Martin, S.A., & Hansen, S.B. (2004). Elemental uptake in relation to root characteristics of tall fescue. *Commun Soil Sci Plant Anal.*, 35(9–10), 1339–1355.
37. Siegel, M.R., & Bush, L.P. (1997). Toxin Production in Grass/Endophyte Associations. In: Carroll, G.C., Tudzynski P. (eds.) *Plant Relationships: The Mycota (A Comprehensive Treatise on Fungi as Experimental Systems for Basic and Applied Research)*, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 5, 185–207.
38. Sinclair, K., Fulkerson, W.J., & Morris, S.G. (2006). Influence of regrowth time on the forage quality of prairie grass, perennial ryegrass, and tall fescue under nonlimiting soil nutrient and moisture conditions. *Aust. J. Exp. Agric.*, 46, 45–51.
39. Sleper, D.A., Vogel, K.P., Asay, K.H., & Mayland, H.F. (1989). Using plant breeding and genetics to overcome the incidence-of grass tetany. *J. Anim. Sci.*, 67., 3456–3462.
40. White, J.F., Kingsley, K.L., Zhang, Q., Verma, R., Obi, N., Dvinskikh, S., Elmore, M.T., Verma, S.K., Gond, S.K., & Kowalski, K.P. (2019). Review: endophytic microbes and their potential applications in crop management. *Pest Manage Sci.*, 75(10), 2558–2565.

Х. Рахман, С. Сайга, С. Сабрін, Р. Іслам

**Чи може інфікована ендofітами вівсяниця високоросла мінімізувати ризик трав'яної тетанії худоби?**

**Анотація.** В результаті досліджень було виявлено, що нетоксичний *Neotyphodium* (новий ендofіт) забезпечує подібні агрономічні характеристики, як і ендofіт дикого типу, для стримування патогенів, не завдаючи негативного впливу на худобу. Хоча взаємодія трави та нового ендofіта не синтезує алкалоїд перамін, який був пов'язаний з токсичністю для ссавців, зв'язок між дикою (природною) та/або новою ендofітною інфекцією та співвідношенням тетанії в кормах не оцінювався. Ризик тетанії був оцінений у природньо інфікованій ендofітами вівсяниці високорослій, вирощеній у японському Андісолі. Три екотипи вівсяниці високорослої (*Festuca arundinacea* Schreb, *Fukaiga*, *Koïwai* і *Showa*), інфікованих *Neotyphodium coenophialum* (Morgan-Jones та Gams), Glenn, Vasop і Hanlin ( $E^+$ ), або неінфікованих ( $E^-$ ) вирощували на чорних ґрунтах Андісолу з низьким вмістом  $F$  і на червоних ґрунтах Андісолу з високим вмістом  $F$  в контрольованому середовищі. Визначали концентрацію поживних речовин у біомасі та встановили коефіцієнт тетанії  $K/(Ca+Mg)$  для всіх трьох екотипів вівсяниці.

Результати показали, що на концентрації  $K$ ,  $Ca$ ,  $Mg$  та  $K/(Ca+Mg)$  значно впливали ендofіти, типи ґрунтів, екотипи рослин та їх взаємодія. Незалежно від екотипів рослин і типів ґрунтів концентрації  $K$ ,  $Ca$  та  $Mg$  були вищими в інфікованих ендofітами рослинах порівняно з контролем. Серед екотипів, інфікованих ендofітами, *Fukaiga* та *Koïwai* показали вищі концентрації  $K$ ,  $Ca$  та  $Mg$  на червоних ґрунтах Андісолу. На відміну від цього, екотип *Showa* показав вищі концентрації  $K$ ,  $Ca$  та  $Mg$  в рослинах, інфікованих ендofітами у порівнянні з контролем на чорних ґрунтах Андісолу. Незважаючи на екотипи рослин та типи ґрунти, рослини, інфіковані ендofітами, показали нижчий рівень  $K/(Ca+Mg)$ , ніж їхні аналоги, що свідчить про те, що взаємодія трави/ендofіту може бути засобом зниження захворюваності худоби на трав'яну тетанію.

**Ключові слова:** Андісол, трава прохолодної пори року, біологічно модифікована рослина, екотип, *Neotyphodium coenophialum*.



DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-318>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/318>

УДК 631.11.1

## НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВА СИСТЕМА АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА У ЛІВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

Ю.О. Тараріко<sup>1</sup>, академік НААН, докт. с.-г. наук, Ю.В. Сорока<sup>2</sup>, канд. с.-г. наук, Г.І. Личук<sup>3</sup>,  
канд. с.-г. наук, с. н. с.

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0001-8475-240X> e-mail: [urtar@bigmir.net](mailto:urtar@bigmir.net)

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0001-6228-4131>; e-mail: [soroka\\_Yu@bigmir.net](mailto:soroka_Yu@bigmir.net)

<sup>3</sup> ДУ Національний антарктичний науковий центр МОН України, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-2579-5036>; e-mail: [aspirant.nnciz@gmail.com](mailto:aspirant.nnciz@gmail.com)

**Анотація.** В результаті досліджень встановлено, що для істотного скорочення «карбонowego сліду» від отриманої продукції потрібно оптимізувати розподіл виробленої біомаси між продовольством, енергетичною сировиною, ґрунтом та газоподібними втратами. За накопичення в типовій зональній сівозміні Лівобережного Лісостепу 10 т/га сухої речовини рослинної біомаси її доцільно трансформувати у 0,8–1,0 т/га м'ясо-молочних продуктів, 1,3–1,5 т/га олії і цукру, 1,2–1,5 т/га метану та у 0,6–0,8 т/га стабільних гумусових речовин. В процесі такої трансформації половина отриманого під час фотосинтезу органічного вуглецю використовується на потреби біологічної компоненти агроєкосистеми, що включає рослини, тварини та мікробний ценоз ґрунту. Виділення частини біомаси на енергетичне забезпечення агротехнологічних процесів супроводжується мінімізацією використання непоновлюваних джерел енергії. Кінцева продукція, що вилучається за межі агроєкосистеми у вигляді жирів, білків і вуглеводів, має переважно вуглецево-кисневий елементарний склад. В результаті формується замкнений цикл макро- і мікроелементів, що поряд із тотальним знезараженням усіх відходів, мінімізує застосування агрохімікатів, виробництво яких також супроводжується надходженням в атмосферу великої кількості парникових газів (ПГ). На прикладі типового для Лівобережного Лісостепу сільськогосподарського підприємства опрацьовано близьку до оптимальної модель аграрного виробництва, синхронізоване і збалансоване функціонування складових якої забезпечує не тільки високі показники економічної ефективності, але й у перспективі дає змогу отримувати додатковий прибуток від зниження викидів ПГ. Показано, що за формування запропонованої системи аграрного виробництва його прибутковість буде на рівні 3,5 тис. у. о./га, з урахуванням вартості емісійних квот цей показник зростає на 20%. При цьому не враховуються можливості підвищення рівня конкурентоздатності продукції з коротким карбоневим слідом, її маркування як органічної та інші переваги.

**Ключові слова:** низьковуглецева система аграрного виробництва, агроєкосистема, агроресурсний потенціал.

**Актуальність дослідження.** Останнім часом у зв'язку із загостренням проблеми «парникового» ефекту в результаті викидів великої кількості вуглекислого газу, метану та інших газоподібних сполук природні фітоценози та агроєкосистеми розглядаються зовсім у новому для них аспекті [1]. Вирощування сільськогосподарських культур, створення високопродуктивних сіножатей і пасовищ, багаторічні насадження культурних рослин, лісорозведення розглядаються як засоби зв'язування або депонування атмосферного вуглецю [2], що дає змогу хоча б частково компенсувати потужні антропогенні викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу [3; 4]. Зрозуміло, що чим вище активність процесу фотосинтезу і щорічного приросту органічної

біомаси, тим значиміший екологічний ефект буде отримано [5].

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** Важливе значення мають системи землеробства, що забезпечують накопичення органічної речовини у ґрунті. Водночас, застосування високопродуктивних інтенсивних агротехнологій у землеробстві, зокрема за культивування просапних культур, супроводжується посиленням мінералізаційних процесів у ґрунті, коли розкладу підлягають не тільки рослинні кореневі і післязбиральні рештки, але й накопичені у минулому стабільні гумусові речовини [6–10]. Сучасні системи ведення аграрного виробництва також передбачають використання значних обсягів антропогенних ресурсів, що

супроводжується зростанням прямих та непрямих викидів парникових газів [11; 12]. Прямі викиди пов'язані з використанням безпосередньо протягом технологічних процесів енергоносіїв, що отримуються з непоновлюваних покладів нафти і газу. Непрямі викиди трапляються на попередніх етапах промислового виготовлення агрохімікатів та інших засобів виробництва [13]. За наявності в галузевій структурі сільськогосподарського підприємства розвинутого тваринницького напрямку відбуваються процеси надходження в атмосферу газоподібних продуктів життєдіяльності тварин [14–15]. Відчутна кількість CO<sub>2</sub> виділяється з орного шару в результаті вапнування кислих ґрунтових відмінностей [16]. Спрямованість і закономірності складних процесів трансформації вуглецю встановлюються шляхом проведення балансових досліджень його кругообігу в системах аграрного виробництва різних рівнів інтенсифікації [17]. Це дає змогу не тільки розробляти і впроваджувати низьковуглецеві агроєкосистеми, але врешті-решт отримувати високоякісні органічні продукти харчування [18; 19]. Порядок підготовки, розгляду, схвалення та реалізації подібних проєктів викладено у відповідній постанові КМУ [20]. Оцінювати потенціал зростання їх прибутковості від скорочення емісії парникових газів дозволяє аналіз сучасного стану і тенденцій ціноутворення на викиди CO<sub>2</sub> у Європі [21].

**Метою** досліджень є встановлення потенціалу продуктивності зональної сівозміни в Лівобережному Лісостепу та обсяги зв'язування вуглецю атмосфери в основній і побічній продукції рослинництва за органічних та інтенсивних систем землеробства. На прикладі типового для регіону сільськогосподарського підприємства оцінити обсяги скорочення викидів парникових газів за впровадження біоенергетичної системи аграрного виробництва із замкнутим циклом елементів живлення, стабілізацією запасів органічної речовини ґрунту та повним самозабезпеченням власними енергетичними ресурсами. Проаналізувати можливість підвищення прибутковості виробничої діяльності за рахунок вартості емісійних квот за прийнятими в ЄС цінами.

**Матеріали і методи досліджень.** Для оцінювання потенціалу біопродуктивності чорнозему типового використовували інформаційну базу стаціонарного агротехнічного дослідіу Полтавської дослідної станції ім. М.І. Вавилова «Вплив систематичного застосування добрив при різних обробітках ґрунту на продуктивність культур польової сівозміни, якість урожаю і родючість ґрунту», що був закладений у 1986 р. [22]. Ґрунт – чорнозем типовий

з вмістом гумусу 3,5–4,5%, низькою забезпеченістю доступними для рослин сполуками азоту, середньою – фосфору і калію. Культури в сівозміні: кукурудза на силос, пшениця озима, цукрові буряки, ячмінь, горох, пшениця озима, кукурудза на зерно. Розглядалися органічні та інтенсивні системи удобрення, характерні для рослинницької і тваринницької спеціалізації аграрного виробництва: без добрив (К), побічна продукція на добриво (ПП), гній 10 т/га (Гн), ПП+НПК, Гн+НПК. Порівнювалися мілка і комбінована з оранкою під просапні культури системи обробітку ґрунту.

Результати проведених досліджень було проаналізовано та отримано середні показники врожайності культур сівозміни, межі їх коливання за змінних протягом 20 років гідротермічних умов. Також встановлено спрямованість змін параметрів родючості чорнозему типового за довготермінового застосування систем землеробства різних рівнів біологізації та інтенсифікації. Отриману інформацію використовували при моделюванні перспективних варіантів розвитку Державного підприємства «Дослідне господарство імені 9 січня» Хорольського району Полтавської області з площею орних земель 6900 га. Комп'ютерне багатоваріантне імітаційне моделювання здійснювали за допомогою програмного комплексу «Агроєкосистема» [23].

Ґрунт – чорнозем типовий з вмістом гумусу 3,0–3,2%, з низькою забезпеченістю доступними сполуками азоту, підвищеною фосфору і калію, з рН – 6–7.

Питому частку вуглецю в органічних сполуках визначали за елементарним складом цих сполук. Приймалося, що на 1 т сухої речовини врожаю бобових культур симбіотично фіксується 20 кг біологічного азоту, розміри його несимбіотичної фіксації – 15 кг/га, денітрифікація діючої речовини азотних мінеральних добрив – 15%. Використовували такі коефіцієнти гуміфікації рослинних решток і органічних добрив: пшениці озимої та кукурудзи на зерно – 0,20, цукрових буряків – 0,10, кукурудзи МВС – 0,17, соняшнику – 0,14, гороху – 0,23, ячменю – 0,22, багаторічних трав – 0,25; річні обсяги мінералізації гумусу під багаторічними травами становлять 0,6 т/га, під озимою пшеницею – 1,35, під цукровими буряками – 1,59, під кукурудзою МВС – 1,47, під кукурудзою на зерно – 1,56, під соняшником – 1,39, під горохом – 1,50, під ячменем – 1,23 т/га [24].

**Результати досліджень та їх обговорення.** Стосовно особливостей гідротермічних умов окремих років врожайність культур досліджуваної сівозміни істотно коливалася з коефіцієнтом

варіації на рівні 40%. Середня за роки ведення досліду врожайність кукурудзи на силос на контролі без добрив становить 30 т/га і сягає 40 т/га за органо-мінеральної системи удобрення. Продуктивність посівів пшениці озимої після кукурудзи по зерну на природному фоні родючості складала 2,2 т/га і на удобрених фонах сягала 3,5 т/га із співвідношенням до соломи 1,3–1,4. Вихід коренів цукрових буряків по варіантах удобрення коливався від 25 до 42 т/га з їх співвідношенням до гички 0,4–0,5. Врожайність ячменю ярого залежно від удобрення коливалася від 1,7 до 2,7 т/га із співвідношенням зерна до соломи 1,3, гороху відповідно від 2,4 до 3,0 т/га та співвідношенням 1,1–1,2, пшениці озимої по гороху – від 3,0 до 3,8 т/га та співвідношенням 1,3–1,4, кукурудзи – від 4,7 до 5,5 т/га та співвідношенням зерна до стебел 1,9–2,0.

Також приймалося, що на кожен тону основної продукції залишається після кукурудзи на силос – 0,16 т, пшениці озимої – 1,1 т, буряків цукрових – 0,04 т, ячменю ярого – 0,9 т, гороху і кукурудзи на зерно – 0,8 т післязбиральних і кореневих решток. З урахуванням того, що вологість зеленої маси кукурудзи, коренів цукрових буряків та їх гички становить 80%, зерна і соломи інших культур – 14%, загальне накопичення сухої речовини складатиме на фоні без добрив – 8 т/га, за систематичного застосування гною – на рівні 9 т/га, використання

на добриво усієї побічної продукції сівозміни і органо-мінеральні системи удобрення забезпечують відповідно 10 та 10,5 т/га (табл. 1).

Для формування системи низьковуглецевого аграрного виробництва потрібно оптимізувати розподіл органічного вуглецю отриманої рослинної біомаси між продовольством, біоенергією, ґрунтом і емісією CO<sub>2</sub>. Саме таку оптимізацію передбачає біоенергетична виробнича система. Її впровадження за продуктивності сівозміни 10 т/га сухої біомаси органічної речовини буде трансформуватися у 0,8–1,0 т/га м'ясо-молочних продуктів, 1,3–1,5 т/га олії і цукру, в 0,6–0,8 т/га гумусу та 1,2–1,5 т/га метану. Тобто з отриманої в процесі фотосинтезу органічної речовини більше половини витрачається на функціонування самої агроєко-системи з вивільненням CO<sub>2</sub> в атмосферу. Інша частина акумулюється в цінних поновлюваних ресурсах та з надлишком компенсує мінералізовані ґрунтові органічні сполуки.

Стосовно особливостей різних ґрунтово-кліматичних зон передбачається формування максимально адаптованої галузевої структури з урахуванням специфіки окремих сільськогосподарських підприємств. Вона може включати різні складові, зокрема: зрошення і осушення, високопродуктивні всебічно технічно забезпечені системи землеробства, сучасні тваринницькі комплекси, технологічні

1. Середня врожайність культур сівозміни та обсяги накопичення сухої біомаси, ц/га

Культури	Продукція	Варіанти досліду				
		К	Гн	Гн+НРК	ПП+N <sub>10</sub>	ПП+НРК
кукурудза на силос	основна	307,7	357,5	401,3	382,5	395,3
пшениця озима	основна	22,0	25,1	34,7	32,0	35,8
	побічна	27,0	33,2	44,8	46,1	45,5
цукрові буряки	основна	254,4	313,0	400,5	394,9	415,6
	побічна	128,2	127,1	185,9	160,0	213,8
соя	основна	11,6	14,4	17,3	15,1	15,7
	побічна	15,9	18,5	23,7	21,5	22,2
ячмінь	основна	17,1	22,0	27,0	26,4	27,0
	побічна	23,9	27,6	35,3	34,6	35,3
горох	основна	23,8	26,3	29,6	27,5	28,5
	побічна	25,1	26,8	31,5	29,2	33,0
пшениця озима	основна	30,2	34,2	38,5	37,8	38,0
	побічна	36,7	43,6	48,4	52,0	51,7
кукурудза на зерно	основна	46,7	52,2	54,5	53,7	54,5
	побічна	81,2	93,3	94,2	92,3	94,3
Суша біомаса	основна і побічна	59,8	68,9	80,8	78,6	82,5
	рослинні рештки	17,6	20,1	23,4	22,5	23,4
	всього	77,3	89,1	104,2	101,1	105,9

процеси із зберігання та глибокої переробки сировини з отриманням цукру, олії, борошно-круп'яної, м'ясо-молочної, овочевої, технічної та іншої продукції, енергогенеруючі станції знезараження усіх відходів із виробництвом максимально насичених макро- та мікроелементами органічних добрив (біогумусу). Їх систематичне застосування дає змогу повертати в кругообіг більшу частину винесених врожаєм із ґрунту макро- і мікроелементів. Адже, за сучасної поширеної практики з безповоротним відчуженням за межі агроєкосистем продукції рослинництва весь обсяг винесених із ґрунту поживних речовин потрібно компенсувати енергоємними промисловими мінеральними добривами.

Протягом останніх років подібні системи низьковуглецевого виробництва органічної продукції рослинництва і тваринництва розроблено для низки сільськогосподарських

підприємств, зокрема в системі НААН. Одне з них – ДП «ДГ ім. 9 січня» Хорольського району Полтавської області. Шляхом багатоваріантного комп'ютерного моделювання встановлено, що з економічного, екологічного і соціального погляду найбільш перспективним є сценарій комплексного розвитку підприємства, що передбачає збереження свиногокомплексу, розширення комплексу ВРХ до 8 тис. ум. гол., монтаж модулів із переробки 100 т на добу молока і 4 т на добу живої ваги свиней і ВРХ, будівництво елеватора на 10 тис. т зерна, цукрового заводу на 200 тис. т коренеплодів, заводу по виробництву 40 т комбікорму на добу, станції з переробки 40 т сухої речовини відходів та сховищ і складів для зберігання готової продукції, кормів, коренів цукрових буряків і органічних добрив (рис. 1). Орієнтовна вартість такої інфраструктури 37–38 млн у. о. Затрати на виробництво становлять на рівні

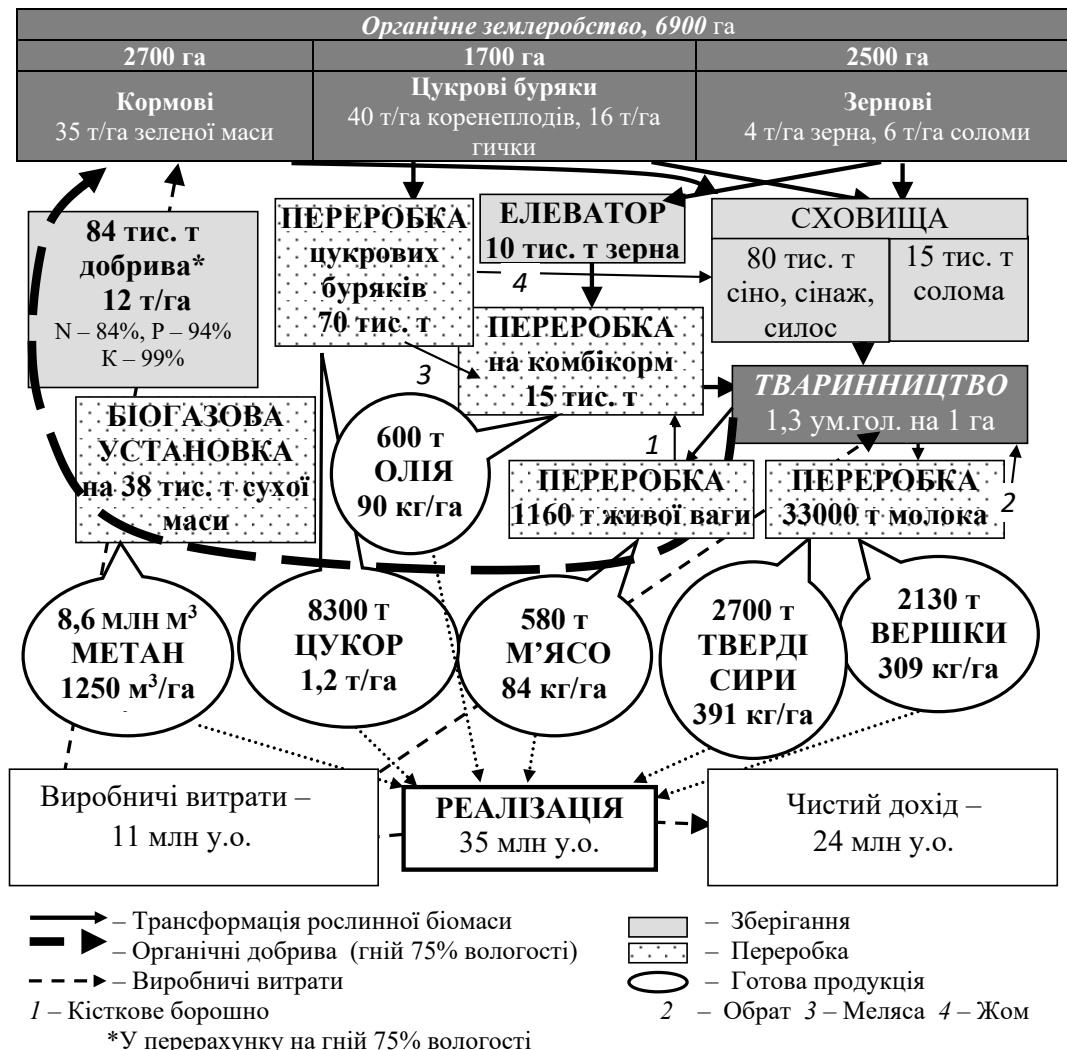


Рис. 1. Низьковуглецева біоенергетична система органічного аграрного виробництва ДП «ДГ ім. 9 січня» НААН

11 млн у. о. і включають виробництво, зберігання кормів і утримання тварин, переробку молока і м'яса, виробництво цукру, комбікормів та енергії, зберігання органічних добрив і готової продукції, в т. ч. накладні витрати та ПДВ. Реалізація органічних цукру, олії, продуктів тваринництва, тепло- та електроенергії з урахуванням вартості заощаджених мінеральних добрив дозволить щорічно отримувати 35 млн у. о., в т. ч. чистий дохід 23–24 млн у. о. із строком окупності капітальних затрат 2 роки.

Збалансоване функціонування цієї системи аграрного виробництва буде забезпечуватися такою сівозміною: 1 – пшениця озима; 2 – буряки цукрові; 3 – кукурудза на зерно; 4 – кукурудза МВС; 5 – буряки цукрові; 6 – соняшник; 7 – кукурудза з/к 1/2 + однорічні трави 1/2; 8 – багаторічні трави (вивідне поле). За впровадження такої сівозміни буде забезпечено повноцінну годівлю тварин, розраховану на досягнення максимальної продуктивності дійного стада. До того ж органічні відходи, зокрема виділення тварин, зіпсовані корми, надлишки малоцінної частини урожаю, щорічно будуть накопичуватися в обсязі 38–40 тис. т сухої речовини. В результаті їх переробки на біогазовій установці можна отримати більше 20 тис. т біогумусу або в перерахунку на гній 75% вологості 80 тис. т із щорічним його внесенням у кількості 12 т/га. За такої системи удобрення баланс азоту буде складати 110%, фосфору – 95% калію – 100% та забезпечуватиметься розширене відтворення гумусного стану ґрунту з щорічним накопиченням 0,5–0,6 т/га органічної речовини.

Загалом такі системи мають наступні переваги над сучасною поширеною виробничою практикою, а саме:

- у єдиному технологічному комплексі оптимально балансується виробництво продуктів харчування, біоенергії, технічної продукції та добрив;

- створюються замкнені цикли макро- й мікроелементів, максимально реалізується потенціал природної азотфіксації, мінімізується застосування агрохімікатів;

- здійснюється перехід на засади органічного виробництва;

- забезпечується розширене відтворення родючості ґрунту та систематичне підвищення продуктивності ріллі;

- енергетичне самозабезпечення та мінімізація застосування агрохімікатів дозволяє кардинально знизити собівартість продукції, багаторазово збільшити прибутковість виробничої діяльності за коротких термінів окупності капітальних затрат;

- за зростаючого прибутку створюються можливості для динамічного територіального розширення низькокарбованих агроєкосистем, постійного вдосконалення й розвитку їх галузевої структури;

- через оптимізацію сівозмінного фактора, утилізацію й знезараження усіх відходів та зниження агрохімічного навантаження поліпшується екологічний стан довкілля;

- досягається високий рівень зайнятості, матеріального благополуччя та створюються комфортні умови життя для сільського населення;

- формуються умови для посилення розвитку інших галузей вітчизняної економіки, зокрема машинобудування;

- мінімізується вуглецевий слід отриманої продукції.

Щодо останнього положення можна виділити такі основні статті скорочення викидів вуглекислого газу в системі низьковуглецевого аграрного виробництва:

- багаторазове використання або рециркуляції біогенних елементів заощаджує витрати пального на виробництво промислових мінеральних добрив та скорочує викиди до 4,1 т/га CO<sub>2</sub>;

- біологічна азотфіксація сягає 70 кг/га, що еквівалентно викидам 0,5 т/га CO<sub>2</sub> при виробництві відповідної кількості азотних добрив;

- вихід метану становить 1,5 тис. м<sup>3</sup>/га, що еквівалентно 4,7 т/га CO<sub>2</sub> при спалюванні добутого природного газу;

- виробництво біодизелю – 200 кг/га, що еквівалентно 0,60 т/га CO<sub>2</sub> при спалюванні стандартного дизельного пального;

- щорічне накопичення 0,5 т/га гумусу еквівалентно зв'язуванню 0,8 т/га CO<sub>2</sub>;

- парниковий ефект від оксиду азоту, що виникає в результаті денітрифікації біля 15% діючої речовини внесених у ґрунт мінеральних добрив, у 300 вище за CO<sub>2</sub>. За даними Держкомстату під урожай 2020 р. було використано близько 100 кг/га техногенного азоту. Отже скорочення надходження в атмосферу N<sub>2</sub>O від заощадженого промислового азоту еквівалентно 7,2 т/га CO<sub>2</sub>.

Отже, порівняно із сучасною практикою, що ґрунтується на виробництві зерна, запропонована для ДП «ДГ ім. 9 січня» система аграрного виробництва дасть змогу скоротити викиди від непоновлюваних джерел енергії на 18 т/га CO<sub>2</sub>. Відомо також, що вартість емісійних квот на європейському ринку складала до 2019 р. 10 євро/т, у 2019–2020 рр. – 25 євро/т, на початок 2021 р. – більше 50 євро/т та до 2030 р. очікується 100 євро/т викидів умовної

тонни CO<sub>2</sub> еквіваленту. Отже за цінами 2021 р. за цією статтею можна очікувати надходження 750 у. о./га. Якщо плановий чистий прибуток становитиме 24 млн у. о. або 3,5 тис. у. о./га, то з урахуванням вартості емісійних квот цей показник зросте на 0,5 млн у. о. до 4,2 тис. у. о./га або майже на 20%. У перспективі сертифікація передбаченого запропонованою для підприємства виробничою системою асортименту продукції як органічної й низьковуглецевої дасть змогу збільшити чистий прибуток у 2 рази.

**Висновки.** Ефективність сучасних систем землеробства і аграрного виробництва потрібно оцінювати не тільки за параметрами економічної привабливості і доступності отриманої сільськогосподарської продукції, але й за балансом між обсягами зв'язаних у біомасі атмосферних і ґрунтових запасів вуглецю і азоту та викидами у повітря газоподібних сполук цих елементів. Обсяги їх

викидів залежать від багатьох чинників, зокрема від рівня інтенсифікації агротехнологій. Оптимізація розподілу отриманої у процесі фотосинтезу рослинної біомаси між продовольством, біоенергією і ґрунтом, а також створення замкнених циклів поживних речовин дає змогу значною мірою вирішити згадані проблеми. Досягається це шляхом багатоваріантного імітаційного комп'ютерного моделювання перспективних сценаріїв розвитку агроecosystem із наступним формуванням всебічно збалансованої виробничої структури з максимальним використанням наявного внутрішнього агроресурсного потенціалу. У результаті буде забезпечуватися екологічне благополуччя довкілля та вирішення соціальних проблем шляхом кардинального підвищення прибутковості підприємства, зокрема за рахунок вартості емісійних квот на викиди парникових газів, що існують або очікуються в Європі.

### Бібліографія

1. Blandford, D. and C. Hassapoyannes. (2018). "The Role of Agriculture in Global Greenhouse Gas Mitigation", OECD Papers on Food, *Agriculture and Fisheries*, No. 112, OECD Publishing, Paris. DOI: <https://doi.org/10.1787/da017ae2-en>
2. OECD (2019), *Enhancing Climate Change Mitigation through Agriculture*, OECD Publishing, Paris. DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/e9a79226-en>
3. Eory, V. et al. (2017), Evidence review of potential climate change mitigation measures in Agriculture, Forestry, Land Use and Waste. URL: <https://www.gov.scot/publications/evidencereview-potential-wider-impacts-climate-change-mitigation-options-agriculture/pages/7/>
4. Tian, H. et al. (2016), "The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere", *Nature*, Vol. 531, Issue 7593, Springer Nature, London, pp. 225–232.
5. Fellmann, T. et al. (2018), "Major challenges of integrating agriculture into climate change mitigation policy frameworks", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 23/3, pp. 451–468. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11027-017-9743-2>
6. Govers, G.; Merckx, R.; van Oost, K.; van Wesemael, B. Soil Organic Carbon Management for Global Benefits: A Discussion Paper. In Proceedings of the Workshop organised by the Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environmental Facility 'Soil Organic Carbon Benefits: A Scoping Study', Nairobi, Kenya, 10–12 September 2012.
7. Kuzyakov, Y.; Horwath, W.R.; Dorodnikov, M.; Blagodatskaya, E. Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles. *Soil Biol. Biochem.* 2019, 128, 66–78. [CrossRef].
8. Carlson, K. et al. (2016), "Greenhouse gas emissions intensity of global croplands", *Nature Climate Change*, Vol. 7/1, pp. 63–68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3158>
9. Amundson, R. and L. Biardeau (2018), "Opinion: Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool", *PNAS*, Vol. 115/46, pp. 11652–11656. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>
10. Bossio, D. et al. (2020), "The role of soil carbon in natural climate solutions", *Nature Sustainability*, Vol. 3, pp. 391–398. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
11. Wollenberg, E. et al. (2016), "Reducing emissions from agriculture to meet the 2°C target", *Global Change Biology*, Vol. 22, Issue 12, Wiley Online, pp. 3859–3864.
12. Valin H. et al. (2013), "Agricultural productivity and greenhouse gas emissions: Trade-offs or synergies between mitigation and food security?", *Environmental Research Letters*, Vol. 8, No. 3, IOP Science, Bristol and Philadelphia. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035019>
13. Технологічні карти вирощування сільськогосподарських культур : монографія / Л.М. Тищенко та ін. / за ред. Л.М. Тищенко / Харк. нац. техн. ун-т с.-г. ім. Петра Василенка. Харків : ХНТУСГ, 2015. 273 с.

14. Havlík, P. et al. (2014), "Climate change mitigation through livestock system transitions", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 111/10, pp. 3709–3714. DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1308044111>
15. Herrero, M. et al. (2016), Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector, Nature Publishing Group. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2925>
16. «Дослідження даних про діяльність та коефіцієнтів викидів вуглекислого газу при використанні вапняку і доломіту» / Звіт про дослідження по проекту «Розвиток можливостей спільного впровадження в Україні» / Датське Агентство з охорони навколишнього природного середовища та Міністерство охорони навколишнього природного середовища України. Київ, 2007 р.
17. Меліоровані агроєкосистеми. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2017, 696 с.
18. Органічне виробництво і продовольча безпека. Житомир : «Полісся», 2013. 492 с.
19. European Commission (2020), A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-annex-farm-fork-greendeal\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-annex-farm-fork-greendeal_en.pdf)
20. Постанова Кабінету Міністрів України від 22 лютого 2006 р. № 206 Про затвердження Порядку підготовки, розгляду, схвалення та реалізації проектів, спрямованих на скорочення обсягу антропогенних викидів парникових газів.
21. World Bank (2020), State and Trends of Carbon Pricing 2020, World Bank Group, Washington DC. URL: <http://hdl.handle.net/10986/33809>
22. Довгострокові стаціонарні польові дослідження України. Реєстр атестатів. Харків : «Друкарня № 13», 2006р. 120 с.
23. Формирование устойчивых агроєкосистем. Київ : ДИА, 2007. 560 с.
24. Нормативи ґрунтозахисних контурно-меліоративних систем землеробства. Київ, 1998. 158 с.

#### References

1. Blandford, D., & C. Hassapoyannes (2018). "The Role of Agriculture in Global Greenhouse Gas Mitigation", OECD Papers on Food, Agriculture and Fisheries. OECD Publishing, Paris. DOI: <https://doi.org/10.1787/da017ae2-en>
2. OECD. (2019). Enhancing Climate Change Mitigation through Agriculture, OECD Publishing, Paris. DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/e9a79226-en>
3. Eory, Vera & Vapasola, A & Boyd, I & Campbell, J & Cole, Lorna & Genk, K & Allan, G & Kay, Alison & Macleod, Michael & Moran, Darwin & Moxley, Janet & Rees, Bob & Sherrington, C & Watson, Christine. (2017). Evidence review of the potential wider impacts of climate change Mitigation options: Agriculture, forestry, land use and waste sectors. DOI: 10.13140/RG.2.2.27098.54722
4. Tian, H. et al. (2016). The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. *Nature*, Vol. 531, Issue 7593, 225–232.
5. Fellmann, T. et al. (2018). Major challenges of integrating agriculture into climate change mitigation policy frameworks. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 23/3, 451–468. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11027-017-9743-2>
6. Govers, G., Merckx, R., Van Oost, K., & Van Wesemael, B. Soil Organic Carbon Management for Global Benefits: A Discussion Paper. In Proceedings of the Workshop organised by the Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environmental Facility. Soil Organic Carbon Benefits: A Scoping Study. Nairobi, Kenya, 10–12 September 2012.
7. Kuzyakov, Y., Horwath, W.R., Dorodnikov, M., Blagodatskaya, E. (2019). Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles. *Soil Biol. Biochem.*, 128, 66–78.
8. Carlson, K. et al. (2016). Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nature Climate Change*, Vol. 7/1, 63–68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3158>.
9. Amundson, R., and L. Biardeau (2018)/ Opinion: Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *PNAS*, Vol. 115/46, 11652–11656. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>
10. Bossio, D., et al. (2020), «The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, Vol. 3, 391–398. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
11. Wollenberg, E. et al. (2016). Reducing emissions from agriculture to meet the 2°C target. *Global Change Biology*, Vol. 22, Issue 12, 3859–3864.
12. Valin H. et al. (2013). Agricultural productivity and greenhouse gas emissions: Trade-offs or synergies between mitigation and food security *Environmental Research Letters*, Vol. 8, No. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035019>

13. Tishchenko, L.M., Korniienko, S.I., & Dubrovin V.A. (2015). Tekhnolohichni karty vyroshchuvannya silskohospodarskykh kultur: monohrafiia. L.M. Tishchenka (Ed). Khark. nats. tekhn. un-t s.-h. im. Petra Vasylenka. Kharkiv : KhNTUSH. [in Ukrainian].
14. Havlík, P. (2014). Climate change mitigation through livestock system transitions», Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 111/10, 3709–3714. DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1308044111>
15. Herrero, M., et al. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector, Nature Publishing Group. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2925>
16. Zvit pro doslidzhennia po proektu Rozvytok mozhlyvostei spilnoho vprovadzhennia v Ukraini. (2007). Doslidzhennia danykh pro diialnist ta koefitsiiientiv vykydiv vuhlekysloho hazu pry vykorystanni vapniaku i dolomite. Datske Ahentstvo z okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha ta Ministerstvo okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha Ukrainy. Kyiv [in Ukrainian].
17. Romashchenko, M.I., & Tarariko, Yu.O. (Eds.). (2017). Meliorovani ahroekosystemy. Nizhyn : Vydavets PP Lysenko M.M. [in Ukrainian].
18. Orhanichne vyrobnytstvo i prodovolcha bezpeka. (2013). Zhytomyr : Polissia.[in Ukrainian]
19. European Commission (2020). A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-annex-farm-fork-greendeal\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-annex-farm-fork-greendeal_en.pdf)
20. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy. (2006). Pro zatverdzhennia Poriadku pidhotovky, rozghliadu, skhvalennia ta realizatsii proektiv, spriamovanykh na skorochennia obsiahu antropohennykh vykydiv parnykovykh haziv. № 206 vid 22 liutoho 2006 r. [in Ukrainian].
21. World Bank (2020). State and Trends of Carbon Pricing 2020. World Bank Group, Washington DC. URL: <http://hdl.handle.net/10986/33809>
22. Kovalenko, P.I., Kysil, V.I., & Lisovy, M.V. (Eds.). (2006). Dovhostrokovi statsionarni polovi doslidy Ukrainy. Reiestr atestatativ. Kharkiv : “Drukarnia № 13”.
23. Tarariko, Yu.O. (2007). Formyrovanye ustoichyvykh ahroekosystem. Kyiv : DYA.[in Russian]
24. Normatyvy gruntozakhysnykh konturno-melioratyvnykh system zemlerobstva. (1998). Kyiv. [in Ukrainian].

**Yu.O. Tarariko, Yu.V. Soroka, H.I. Lychuk**

#### **Low-carbon system of agricultural production in the Left Bank Forest-Steppe of Ukraine**

**Abstract.** Based on the research results it was determined that to significantly reduce the “carbon footprint” of the obtained products, it is necessary to optimize the distribution of produced biomass among food, energy raw materials, soil, and gaseous losses. When accumulating 10 t/ha of dry matter of plant biomass in the typical zonal crop rotation of the Left Bank Forest-Steppe, it is advisable to transform it into 0.8–1.0 t/ha of meat and dairy products, 1.3–1.5 t/ha of oil and sugar, 1.2–1.5 t/ha of methane and 0.6–0.8 t/ha of stable humus substances. In the process of such transformation, half of the organic carbon accumulated in the process of photosynthesis is used for the needs of the biological components of the agroecosystem, namely plants, animals, and microbial soil coenosis. Allocation of part of biomass for the energy supply of agro-technological processes is accompanied by minimization of the use of non-renewable energy sources. The final products extracted from the agro-ecosystem in the form of fats, proteins, and carbohydrates have mainly carbon-oxygen elemental composition. As a result, a closed cycle of macro- and microelements is formed, which, along with total disinfection of all wastes, minimizes the use of agrochemicals, the production of which is also accompanied by the entry into the atmosphere of large amounts of greenhouse gases (GHG). In the example of a typical Left Bank Forest-Steppe agricultural enterprise a close to an optimal model of agricultural production was worked out, which synchronized and balanced operation of components provides not only high economic efficiency but also in the long run allows to obtain additional profits from reducing GHG emissions. It is shown that when implementing the proposed system of agricultural production, its profitability will be about 3.5 thousand USD/ha, taking into account the value of emission quotas, this figure will increase by 20%. In doing so that does not take into account the possibility of increasing the competitiveness of products with a short carbon footprint, their labeling as organic and other benefits.

**Key words:** low-carbon system of agricultural production, agroecosystem, agro-resource potential.



DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-323>Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/323>

УДК 635.658: 631.5: 631.6: 519.71

## СУЧАСНІ АСПЕКТИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОДУКЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ СОЧЕВИЦІ ЗА РІЗНИХ УМОВ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

С.О. Лавренко<sup>1</sup>, канд. с.-г. наук, Н.М. Лавренко<sup>2</sup>, канд. с.-г. наук, М.В. Максимов<sup>3</sup>, канд. с.-г. наук

<sup>1</sup> Херсонський державний аграрно-економічний університет; 73006, вул. Стрітенська, 23, м. Херсон, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-3491-1438>; e-mail: [lavrenko.sr@gmail.com](mailto:lavrenko.sr@gmail.com)

<sup>2</sup> Херсонський державний аграрно-економічний університет; 73006, вул. Стрітенська, 23, м. Херсон, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-6924-7437>; e-mail: [lavrenkonatalia89@gmail.com](mailto:lavrenkonatalia89@gmail.com)

<sup>3</sup> Херсонський державний аграрно-економічний університет; 73006, вул. Стрітенська, 23, м. Херсон, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-3068-9254>; e-mail: [maksmaxsimov@meta.ua](mailto:maksmaxsimov@meta.ua)

**Анотація.** У статті наведені результати застосування сучасних систем моделювання та прогнозування продукційного процесу сочевиці в умовах Південного Степу України. Проведений кореляційно-регресійний аналіз свідчить про високу достовірність та практичну цінність отриманих математичних моделей вирощування сочевиці на зерно залежно від основного обробітку ґрунту, дози добрив та густоти рослин за різних умов зволоження, що підтверджують криві, отримані у досліді експериментальних даних та розрахунковим шляхом. Згідно з отриманими коефіцієнтами регресії та вільного члена була складена математична модель урожаю зерна сочевиці за різних умов зволоження: Без зрошення –  $Y = 1,5896 + 0,0032 \times X_1 + 0,0007 \times X_2 - 0,2561 \times X_3$ ; Зрошення –  $Y = 1,0200 + 0,0051 \times X_1 + 0,0022 \times X_2 + 0,2656 \times X_3$ .

Провівши регресійний нормований аналіз досліджуваних чинників з урожаєм зерна сочевиці, були отримані такі результати для залежної змінної для різних умов вологозабезпечення, де: без зрошення –  $R = 0,7059$ ;  $R_2 = 0,4983$ ; скоректований  $R_2 = 0,4682$ ;  $F(3,50) = 16,551$   $p < 0,00000$  та стандартна похибка оцінки –  $0,1232$ ; зрошення –  $R = 0,6131$ ;  $R_2 = 0,3759$ ; скоректований  $R_2 = 0,3385$ ;  $F(3,50) = 10,04$   $p < 0,00003$  та стандартна похибка оцінки –  $0,2591$ .

Вперше створені нелінійні багатопарові штучні нейронні моделі для прогнозування врожайності зерна сочевиці. Створена узагальнююча регресійна штучна нейронна мережа GRNN (4-12-7-1) з 12 нейронами в першому прихованому шарі і сьома – в другому; продуктивність навчання –  $0,215$ ; контрольна –  $0,290$ ; тестова –  $0,362$ ; похибка навчання –  $0,136$ ; контрольна –  $0,049$ ; тестова –  $0,066$ . Множинна кореляція з урахуванням нелінійних закономірностей впливу чинників на врожайність зерна сочевиці склала  $0,96$ . Згідно з отриманими результатами ранжування досліджуваних чинників на динаміку формування та величину врожайності зерна сочевиці встановлено, що на першому місці є умови зволоження (величина водоспоживання,  $m^3/га$ ) з коефіцієнтом впливу  $4,21$ , який перевищує інші досліджувані чинники майже в  $2,2$  рази. На другому місці густина рослин ( $млн/га$ ), де показник склав  $1,62$ . На третьому – доза мінеральних добрив ( $кг/га$  діючої речовини), яка незначно поступилася густоті стояння рослин, склавши у підсумку  $1,61$ . На останньому четвертому місці з коефіцієнтом впливу  $1,01$  була глибина основного обробітку ґрунту ( $см$ ).

**Ключові слова:** моделювання, прогнозування, нейрона модель, регресія, сочевиця.

**Актуальність дослідження.** Сучасні системи математичної обробки даних еволюціонують дуже стрімко. Щоденно з'являються нові програми, які допомагають обробляти не тільки цифровий потік інформації, а також виявити закономірності, будувати прогностичну модель розвитку спираючись на багатопарові бази даних. В цьому сенсі не відстає від основних тенденцій і сільськогосподарська наука. За високої вартості основних складових технологічного процесу вирощування культур

(енергетичні агрегати, паливо, праця людей тощо) правильна і чітко налагоджена праця є запорукою ефективної роботи сільськогосподарського підприємства. Цей технологічний розвиток нерозривно поєднаний з науковими дослідженнями.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На сьогодні найбільш поширеною методикою обробки отриманих експериментальних даних є кореляційно-регресійний аналіз. Його основою є побудова та аналіз математичних

моделей шляхом побудови рівняння регресії, яка фіксує залежність результативної ознаки від визначальних ознак і дає оцінку міри щільності зв'язку. Кореляційний аналіз зв'язку здійснюють після встановлення його наявності і характеру зв'язку (прямий чи зворотній) [1; 3; 4; 12].

Нині на піку популярності встановлення нелінійних взаємозв'язків. Штучна нейронна мережа – обчислювальна нелінійна модель, в основі якої лежить нейронна структура мозку, здатна навчатися виконанню завдань класифікації, передбаченню, прийняттю рішень, візуалізації та деяким іншим лише завдяки розгляду прикладів [2; 6; 7; 12; 13; 20].

Завдяки своїй гнучкості та надійності штучні нейронні моделі використовують у багатьох галузях [9; 19], особливого значення та поширення вони набули в сільському господарстві [8; 11; 14].

Будь-яка архітектура штучна нейронна мережа складається з штучних нейронів – елементів обробки, що мають структуру з пов'язаними один з одним шарів. [2; 6; 7; 12; 13; 20].

Штучні нейронні мережі дозволяють змодельовувати простими математичними моделями функціонування біологічного нейрона. За цих умов найважливіші якості нервової системи визначаються не складністю нейронів, а їх великою кількістю та наявністю складної системи зв'язків між ними, що створює виключно комплексну структуру. Ця структура не є статичною. Накопичення досвіду виявляється у зміні характеру та сили зв'язків між нейронами [2; 7; 10; 16; 18; 20].

Вхідний шар складається з нейронів, які передають інформацію до прихованого шару. Прихований шар, своєю чергою, передає інформацію у вихідний. Кожен нейрон має синапси, функцію активації, що визначає вихідну інформацію при заданій вхідній та один вихід. Виважена сума з входів проходить через функцію активації для виведення даних із нейрона. Навчання – процес оптимізації, у якому мінімізується помилка передбачення та нейронна мережа досягає необхідного рівня точності. За допомогою додаткових прихованих шарів можна зробити систему більш гнучкою і потужною [2; 6; 12; 13]. Кожен шар пов'язаний із сусідніми шарами за допомогою вагових коефіцієнтів та коефіцієнтів зміщення. Навчання нейронної мережі означає, що для заданого набору заздалегідь відомих вхідних і вихідних даних необхідно підібрати оптимальні коефіцієнти штучної нейронної мережі так, щоб квадратична помилка між точним вихідним значенням і вихідним значенням,

отриманим за допомогою поширення вхідних значень через нейронну мережу, прагнула мінімуму [2].

**Мета дослідження** – застосування сучасних підходів до математичного моделювання та прогнозування і створення з високою достовірністю моделей врожаю, застосування яких на виробництві дозволить вдосконалити технологію вирощування сільськогосподарських культур та спрогнозувати динаміку врожаю зерна залежно від кількісної зміни елементів технології вирощування.

**Матеріали і методи дослідження.** Моделювання та прогнозування продукційного процесу сочевиці було виконане на основі проведеного чотирьохфакторного польового дослідження на території сільськогосподарського кооперативу «Радянська земля» Білозерського району Херсонської області.

Землекористування господарства належить до першого агрокліматичного району Херсонської області, клімат якого помірно жаркий та дуже посушливий. За багаторічними даними, середньорічна температура повітря дорівнює 9,8 °С. Найхолодніший місяць – січень, із середньомісячною температурою повітря мінус 3,0 °С, найтепліший – липень, із середньомісячною температурою плюс 21,9 °С. Початок накопичення активних температур повітря починається в останній декаді березня й закінчується в другій декаді листопада. Останні весняні заморозки спостерігаються в другій декаді квітня, перші осінні – у третій декаді жовтня. Середня тривалість безморозного періоду складає 233 доби, а вегетаційного – 188 діб. Річна сума опадів, у середньому, складає 441 мм при щорічному випаровуванні 900–1000 мм. За вегетаційний період випадає 275 мм опадів, найбільша їх кількість – у липні – 49 мм. Пануючими вітрами на території господарства є вітри східного та північно-східного напрямків з критичною швидкістю 10,4–11,7 м/с. Суховії спостерігаються щорічно, особливо інтенсивні, приблизно у 40% років. За теплий період спостерігається від 15 до 33 днів із суховіями.

Ґрунт темно-каштановий солонцюватий з чіткою диференціацією ґрунтового профілю. Глибина гумусового горизонту 50–55 см із вмістом гумусу 2,5%. Скипання від НСІ відбувалося з глибини 60–70 см. Реакція ґрунтового розчину у верхніх шарах ґрунту була близькою до нейтральної (рН 7,0), а нижче по профілю зростала і наближалася до лужної (рН 7,4–7,9). Гідролітична кислотність становила 0,36–1,9 мг-екв на 100 г ґрунту. За результатами агрохімічного обстеження ґрунтовой

покрив зрошуваних, вилучених зі зрошення та незрошуваних земель господарства характеризується низьким вмістом легкогідролізованого азоту – 35, підвищеним і високим рухомого фосфору – 32 та високим обмінним калієм – 430 мг/кг ґрунту. Щільність складення метрового шару ґрунту становила – 1,35 г/см<sup>3</sup>, щільність його твердої фази – 2,66 г/см<sup>3</sup>, загальна пористість – 49–50%. Ґрунт містить незначну кількість обмінного натрію 0,1–2,0 мг-екв на 100 г ґрунту. Ступінь насиченості основами складає 98–100%, ємність поглинання 30–35, а сума поглинальних основ 24–28 мг-екв в 100 г ґрунту. Водопроникність ґрунту за першу годину вбирання складала 1,3–2,2 мм/хв.

Ґрунтові води слабкомінералізовані із загальним вмістом солей 1–3 г/л, хімізм засолення – сульфатно-хлоридний. На території господарства залягають глибше 5 м і не впливають на ґрунтоутворюючі процеси та сумарне водоспоживання сільськогосподарських культур.

Зрошення земель у господарстві здійснюється водами Інгулецької зрошувальної системи. Поливна вода системи за агрономічними показниками належить до II класу (обмежено придатна), а за екологічними – до I класу, і повинна використовуватися за умови обов'язкового застосування комплексу заходів попередження деградації ґрунтів.

Польові дослідження були закладені в чотириразовій повторності за такою схемою: Фактор А – основний обробіток ґрунту: полицевий на глибину 20–22 см; полицевий на глибину 28–30 см. Фактор В – фон живлення: без добрив; N<sub>45</sub>P<sub>45</sub>; N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>. Фактор С – густина рослин, млн/га: 2,0; 2,5; 3,0. Фактор D – умови зволоження: без зрошення; зрошення. Розташування варі-

антів здійснювали методом розщеплених ділянок із частковою рендомізацією. Облікова площа ділянок четвертого порядку – 57,6 м<sup>2</sup>. За проведення досліджень керувалися загально визнаною методикою польових дослідів [5].

Для обробки та перевірки прогнозних моделей вирощування зерна сочевиці використано статистичні критерії оцінки достовірності на базі програм Statistica Advanced та Automated Neural Networks for Windows v.10.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Результати кореляційного і регресійного аналізів даних урожаю зерна сочевиці, отриманих у досліді, свідчать, що в незрошуваних умовах сила зв'язку з густиною рослин ( $X_3$ ) середня та складає 0,625, а напрям зворотній. З іншими досліджуваними чинниками кореляція слабка та складає з глибиною основного обробітку ґрунту ( $X_1$ ) та дозою мінеральних добрив ( $X_2$ ) 0,077 і 0,320, а напрям зв'язку – прямий. Множинний коефіцієнт кореляції свідчить про сильний взаємозв'язок (0,706) урожайності зерна сочевиці з досліджуваними елементами технології вирощування (табл. 1).

В умовах зрошення коефіцієнти кореляції зв'язку врожайності зерна сочевиці з досліджуваними чинниками були відмінні порівняно з незрошуваними умовами. Так, сила зв'язку глибини основного обробітку ґрунту ( $X_1$ ) з врожаєм зерна сочевиці складає 0,065 і є слабкою, а доза мінеральних добрив ( $X_2$ ) та густина рослин ( $X_3$ ) – середня та складає 0,504 і 0,343.

Сила зв'язку усіх досліджуваних елементів технології вирощування сочевиці з урожаєм зерна середня – 0,613. Напрямок зв'язку з усіма досліджуваними елементами технології вирощування сочевиці – прямий.

### 1. Результати кореляційного і регресійного аналізів даних урожаю зерна сочевиці

До якого $X_i$ належать дані	$R$ – множинний і $r_i$ – парні коефіцієнти кореляції	$D$ – загальний і $d_i$ – часткові коефіцієнти детермінації	$b_0$ і $b_i$ – коефіцієнти регресії	$t$ – критерій	
				фактичний	0,05
Без зрошення					
$X_1X_2X_3$	0,706	0,498	1,5896	–	
$X_1$	0,077	0,006	0,0032	0,7730	2,01
$X_2$	0,320	0,102	0,0007	3,1917	
$X_3$	–0,625	0,391	–0,2561	–6,2345	
Зрошення					
$X_1X_2X_3$	0,613	0,376	1,0200	–	
$X_1$	0,065	0,004	0,0051	0,5777	2,01
$X_2$	0,504	0,254	0,0022	4,5089	
$X_3$	0,343	0,118	0,2656	3,0746	

**Примітки.**  $X_1$  – глибина основного обробітку ґрунту, см;  $X_2$  – доза мінеральних добрив, кг/га діючої речовини;  $X_3$  – густина рослин, млн/га.

Коефіцієнт регресії показує, що в незрошуваних умовах збільшення глибини основного обробітку ґрунту на 1 см збільшує врожайність зерна сочевиці на 3,2 кг; збільшення дози мінеральних добрив на 1 кг/га діючої речовини – на 0,7 кг/га, а густоти рослин на 1 тис/га, навпаки зменшує показник на 0,2561 кг/га.

В умовах зрошення показники коефіцієнта регресії були вищими. Так, збільшення глибини основного обробітку ґрунту на 1 см підвищує врожайність зерна сочевиці на 5,1 кг; дози мінеральних добрив на 1 кг/га діючої речовини – на 2,2 кг/га, а густоти рослин на 1 тис/га – 0,2656 кг/га.

Згідно з отриманими коефіцієнтами регресії та вільного члена була складена математична модель урожаю зерна сочевиці за різних умов зволоження:

Без зрошення –  $Y = 1,5896 + 0,0032 \times X_1 + 0,0007 \times X_2 - 0,2561 \times X_3$ ;

Зрошення –  $Y = 1,0200 + 0,0051 \times X_1 + 0,0022 \times X_2 + 0,2656 \times X_3$ .

Одним з удосконалених методів математичного моделювання врожаю сільськогосподарських культур є регресійний нормований аналіз. Рівняння нормованої множинної регресії має вид:

$$\frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} = k_1 \frac{\delta_{x_1}}{\delta_y} \frac{x_1 - \bar{x}_1}{\delta_{x_1}} + k_2 \frac{\delta_{x_2}}{\delta_y} \frac{x_2 - \bar{x}_2}{\delta_{x_2}}$$

або  $\tilde{y} = \beta_1 \tilde{x}_1 + \beta_2 \tilde{x}_2$  (1)

Коефіцієнт  $\beta_1$  і  $\beta_2$  називають  $\beta$  – коефіцієнтами значущі або шляховими коефіцієнтами. Вони на відміну від коефіцієнтів регресії не залежать від одиниць візиту і характеризують на скільки  $\delta_y$  зміниться у середньому результуюча ознака при зміні відповідного чинника впливу на  $\delta_x$ .

Провівши регресійний нормований аналіз досліджуваних чинників з урожаем зерна

сочевиці, були отримані такі результати для залежної змінної для різних умов вологозабезпечення (табл. 2), де:

Без зрошення –  $R = 0,7059$ ;  $R^2 = 0,4983$ ; скоригований  $R^2 = 0,4682$ ;  $F(3,50) = 16,551$   $p < 0,00000$  та стандартна похибка оцінки – 0,1232.

Зрошення –  $R = 0,6131$ ;  $R^2 = 0,3759$ ; скоригований  $R^2 = 0,3385$ ;  $F(3,50) = 10,04$   $p < 0,00003$  та стандартна похибка оцінки – 0,2591.

Згідно з отриманими даними рівняння має такий вигляд:

Без зрошення:

$$\tilde{Y} = 0,0774 \times \tilde{X}_1 + 0,3197 \times \tilde{X}_2 - 0,6245 \times \tilde{X}_3$$

Зрошення:

$$\tilde{Y} = 0,0645 \times \tilde{X}_1 + 0,5037 \times \tilde{X}_2 + 0,3435 \times \tilde{X}_3$$

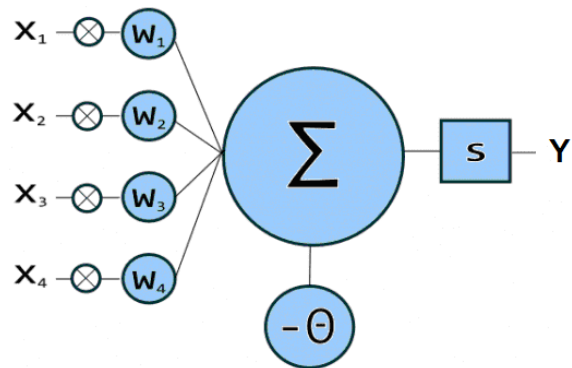


Рис. 1. Модель штучної нейронної мережі [6; 17]

Представлена схема математичної моделі нейронної мережі для програмування врожайності сільськогосподарських культур з  $n$  входами (дендритами, тобто кількістю чинників), причому синапс цих дендритів мають ваги  $w_1, w_2, \dots, w_n$ . До синапсу надходять імпульси сили  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , відповідно (чинники впливу), тоді після проходження синапсу та дендритів

## 2. Результати регресійного нормованого аналізу для залежної змінної

Показник	Коефіцієнт $\beta$	Стандартна похибка	$t$ (50)	$p$ -рівень
без зрошення				
Вільний член			10,66012	0,00000
Фактор $X_1$	0,0774	0,1002	0,77296	0,44319
Фактор $X_2$	0,3197	0,1002	3,19165	0,00245
Фактор $X_3$	-0,6245	0,1002	-6,23454	0,00000
зрошення				
Вільний член			3,25327	0,00205
Фактор $X_1$	0,0645	0,1117	0,57770	0,56606
Фактор $X_2$	0,5037	0,1117	4,50895	0,00004
Фактор $X_3$	0,3435	0,1117	3,07457	0,00341

Примітки:  $X_1$  – глибина основного обробітку ґрунту, см;  $X_2$  – доза мінеральних добрив, кг/га діючої речовини;  $X_3$  – густина рослин, млн/га.

до нейронів надходять імпульси  $w_1X_1, w_2X_2, \dots, w_nX_n$ . Нейрон перетворює отриманий сумарний імпульс  $S = w_1X_1 + w_2X_2 + \dots + w_nX_n$  відповідно до деякої передавальної функції  $F(S)$ . Сила вихідного імпульсу (урожайність) дорівнює:  $Y = F(S) = F(w_1X_1 + w_2X_2 + \dots + w_nX_n)$  [15].

Не завжди нейронна мережа досягає хороших результатів навчання та узагальнення. Серед можливих причин можна виділити такі: невдало обрана архітектура мережі; недостатня вибірка даних для навчання; невдало обрані чинники, які мінімально або максимально впливають на результативний чинник; відсутність залежності [10; 16; 18].

Проведені нами дослідження довели ефективність обраних чинників та вплив їх на результуючий показник (табл. 3).

Для оцінки і уточнення ранжирування чинників впливу на врожайність зерна сочевиці була створена узагальнююча регресійна штучна нейронна мережа (рис. 2) GRNN (4-12-7-1)

з 12 нейронами в першому прихованому шарі і сьома – в другому; продуктивність навчання – 0,215; контрольна – 0,290; тестова – 0,362; похибка навчання – 0,136; контрольна – 0,049; тестова – 0,066. Множинна кореляція з урахуванням нелінійних закономірностей впливу чинників на врожайність зерна сочевиці склала 0,96 (табл. 4).

4. Оцінка похибки регресійної нейронної моделі прогнозування врожайності зерна сочевиці

Критерії	Похибка моделі
середнє даних, т/га	1,551
стандартне відхилення даних, т/га	0,520
середнє похибки, т/га	-0,014
стандартне відхилення похибки, т/га	0,144
середнє абсолютної похибки, %	0,111
відношення стандартного відхилення	0,276
кореляція	0,961

3. Результати регресійної нейронної моделі прогнозування врожайності зерна сочевиці

Архітектура	Продуктивність			Похибка			Навчання / елементи	Входи	Скриті (1)	Скриті (2)
	навчання	контрольна	тестова	навчання	контрольна	тестова				
МП 4:4-12-7-1:1	0,215	0,290	0,362	0,136	0,049	0,066	OP100, СГ20, СГ0b	4	12	7

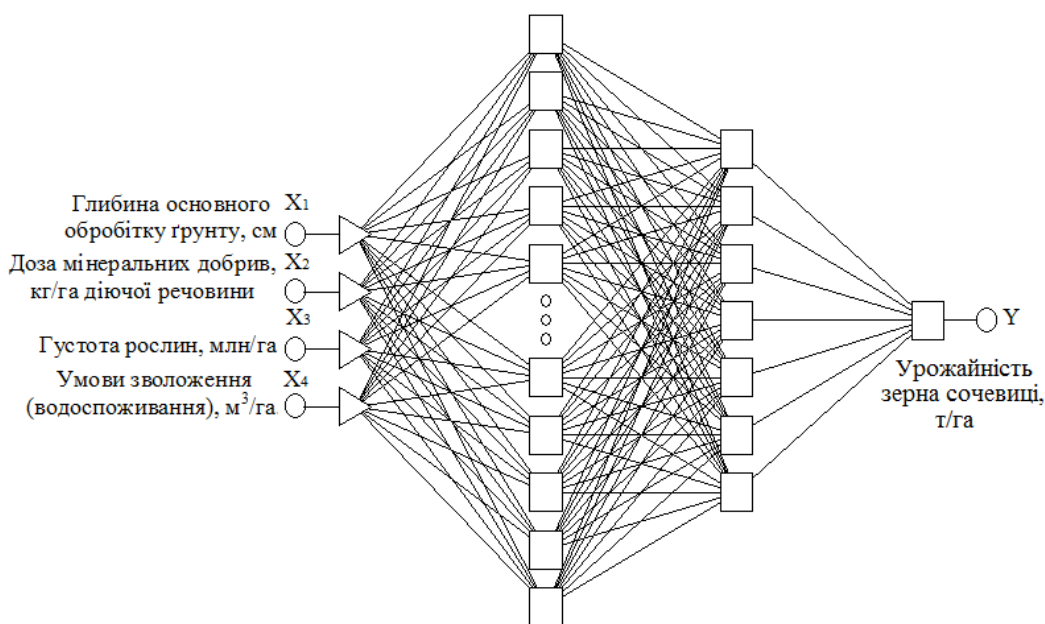


Рис. 2. Архітектура GRNN прогнозування врожайності зерна сочевиці ( $X_1$  – глибина основного обробітку ґрунту, см;  $X_2$  – доза мінеральних добрив, кг/га діючої речовини;  $X_3$  – густина рослин, млн/га;  $X_4$  – умови зволоження (водоспоживання), м<sup>3</sup>/га)

Функція відгуку регресійної нейронної мережі має вигляд:

$$S_n = \sum_{n=1}^4 w_n^{(1)}(t)x_n^{(t)}; S_j = \sum_{j=1}^{12} w_j^{(2)}(t)f(S_n);$$

$$S_m = \sum_{m=1}^7 w_m^{(3)}(t)f(S_j);$$

$$y_i(t) = f(S_m), \text{ де } i = \overline{1,4}$$

Систему формул можна представити у вигляді:

$$y_i(t) = f\left(\sum_{m=1}^7 w_m^{(3)}(t) f\left(\sum_{j=1}^{12} w_j^{(2)}(t) f\left(\sum_{n=1}^4 w_n^{(1)}(t) x_n^{(t)}\right)\right)\right), \text{ де } i = \overline{1,4},$$

де  $t$  – дискретне значення часового ряду;

$w$  – матриця вагових коефіцієнтів;

$x_n^{(t)}$  –  $n$ -на координата вхідного вектора у визначений момент  $t$ ;

$f(S_n; S_j; S_m)$  – передавальна функція прихованих і вихідних шарів нейронної мережі.

Аналіз чутливості полягає в оцінюванні впливу зміни вихідних параметрів (елементів

технології вирощування) на його кінцеві характеристики (рівень урожаю). Аналіз чутливості проекту дозволяє оцінити, як змінюються результуючі показники реалізації проекту при різних значеннях заданих змінних, необхідних для розрахунку. Цей вид аналізу дозволяє визначити найбільш критичні змінні, які найбільшою мірою можуть вплинути на здійсненість і ефективність впровадження досліджуваних елементів технології вирощування культури у виробництво [15].

Згідно з отриманими результатами ранжування (табл. 5) досліджуваних чинників на динаміку формування та величину врожайності зерна сочевиці встановлено, що на першому місці є умови зволоження (величина водоспоживання, м<sup>3</sup>/га) з коефіцієнтом впливу 4,21. який перевищує інші досліджувані чинники майже в 2,2 раза. На другому місці густота рослин (млн/га), де показник склав 1,62. На третьому – доза мінеральних добрив (кг/га діючої речовини), яка незначно поступилася густоті стояння рослин, склавши у підсумку 1,61. На останньому четвертому місці з коефіцієнтом впливу 1,01 була глибина основного обробітку ґрунту (см).

#### 5. Аналіз чутливості досліджуваних елементів технології вирощування на врожайність зерна сочевиці

Показники	Досліджувані елементи			
	$X_1$ – глибина основного обробітку ґрунту, см	$X_2$ – доза мінеральних добрив, кг/га діючої речовини	$X_3$ – густота рослин, млн/га	$X_4$ – умови зволоження (водоспоживання), м <sup>3</sup> /га
відношення	1,01	1,61	1,62	4,21
ранг	4	3	2	1

**Висновки.** Проведений кореляційно-регресійний аналіз свідчить про високу достовірність та практичну цінність отриманих математичних моделей вирощування сочевиці на зерно залежно від основного обробітку ґрунту, дози добрив та густоти рослин за різних умов зволоження, що підтверджують криві, отримані у досліді експериментальних даних та розрахунковим шляхом.

Рівень урожаю є досить стійким до зміни досліджуваних елементів технології вирощування культури сочевиці. Коливання будь-якого з розглянутих параметрів як у бік зменшення,

так і в бік його збільшення, істотно не впливають на рівень. Результати статистичного аналізу даних урожаю зерна сочевиці свідчать про високий ступінь ефективності досліджуваних прийомів вирощування та доцільності впровадження зазначених елементів технології у виробництво.

**Роботу виконано в межах проекту** «Сучасні аспекти інформатизації сільськогосподарського виробництва на основі моделювання та прогнозування продукційних процесів в агроєкосистемах» (номер державної реєстрації 0120U100997).

#### Бібліографія

1. Лазер П.Н., Міхеев Є.К. Інструментарій і технології організації інформації у землеробстві : навчальний посібник. Херсон : Видавництво ХДУ, 2006. 372 с.
2. Нейронные сети для трейдеров. Extreme Trading, Sep 17, 2019. URL: <https://medium.com/@ExtremeTrading/нейронные-сети-для-трейдеров-395d6e04b024> (Дата звернення 23.05.2022).

3. Дисперсионный и корреляционный анализ в растениеводстве и луговодстве. / Ушкаренко В.А. и др.. Монография. Москва : Изд. РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, 2011. 336 с.
4. Використання персональних комп'ютерів для вирішення задач оптимізації сільсько-господарського виробництва : навчальний посібник / Ушкаренко В.О. та ін. Херсон : Айлант, 2001. 94 с.
5. Наукові дослідження в агрономії : навчальний посібник / Ушкаренко В.О. та ін. Херсон : Грін Д.С., 2016. 316 с.
6. 7 архитектур нейронных сетей для решения задач NLP. 14 октября 2018. URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/7-arhitektur-nejronnyh-setej-nlp/> (Дата звернення 23.05.2022).
7. Alyoshin S., Borodina E., Hafiak A., Nosach O. Neural Network Technology of the Financial and Economic Model Synthesis of Production as the Fragment of the Economy Digitalization. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.8). P. 355–363.
8. Govindaraju R.S. Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *J. Hydrol. Eng.* 2000. Vol. 5. P. 115–123.
9. Hansen L.K., Salamon P. Neural network ensembles. *IEEE T. Pattern Anal. Mach. Intell.* 1990. Vol. 10. P. 993–1001.
10. Hebb D.O. The organization of behavior. New York : Wiley, 1949. 335 p.
11. Irmak A., Kamble B. Evapotranspiration data assimilation with genetic algorithms and SWAP model for on-demand irrigation. *Irrig. Sci.* 2009. Vol. 28. P. 101–112.
12. Jarratano D., Riley G. Expert systems. Principles of programming development. Ed. Williams, 2006. 2104 p.
13. Khaikin S. Neural networks: Full course. 2nd edition. Williams, 2006. 1104 p.
14. Kumar M., Raghuvanshi N.S., Singh R. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: A review. *Irrig. Sci.* 2011. Vol. 29. P. 11–25.
15. Lavrenko S., Lavrenko N., Pichura V. Neural network modeling of chickpea grain yield on ameliorated soils. *Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2015. Vol. 2 (18). P. 16–30.
16. McCulloch W.S., Pitts W.H. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys.* 1943. Vol. 5. P. 115–133.
17. Michie D., Spiegelhalter D.J., Taylor C.C. Machine Learning, Neural and Statistical Classification. Chichester : Ellis Horwood, 1994. 304 p.
18. Minsky M., Papert S.A. Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1969. 258 p.
19. Schumann J.M.P., Liu Y. Applications of Neural Networks in High Assurance Systems. Springer : Berlin, Germany, 2010. Vol. 268. 345 p.
20. Turan N.G., Mesci B., Ozgonenel O. Artificial neural network (ANN) approach for modeling Zn(II) adsorption from leachate using a new biosorbent. *Chemical Engineering Journal*. 2011. Vol. 173. No. 1. P. 98–105.

### References

1. Lazer, P.N., & Miheyev, Ye.K. (2006). Instrumentarij i tehnologiyi organizaciyi informaciyi u zemlerobstvi : navchalnij posibnik. Herson : Vidavnictvo HDU. [in Ukrainian].
2. Extreme Trading. (2019). Neironnye seti dlya trejderov. Extreme Trading. URL: <https://medium.com/@ExtremeTrading/neironnye-seti-dlya-trejderov-395d6e04b024> [in Russian].
3. Ushkarenko, V.A., Lazarev, N.N., Goloborodko, S.P., & Kokovihin, S.V. (2011). Dispersionnyj i korrelyacionnyj analiz v rastenievodstve i lugovodstve : Monografiya. Moskva : Izd. RGAU-MSHA im. K.A. Timiryazeva. 336 s. [in Russian].
4. Ushkarenko, V.O., Kovalenko, V.P., Plotkin, S. Ya., & Polyakov, M.G. (2001). Viktoristannya personalnih komp'yuteriv dlya virishennya zadach optimizaciyi silskogospodarskogo virobnictva : navchalnij posibnik. Kherson : Ajlant. [in Ukrainian].
5. Ushkarenko, V.O., Najdenova, V.O., Lazer, P.N., Sviridov, O.V., Lavrenko, S.O., & Lavrenko, N.M. (2016). Naukovi doslidzhennya v agronomiyi : navchalnij posibnik. Kherson : Grin D.S. [in Ukrainian].
6. Milyutin, I. (2018). Arhitektur nejronnyh setej dlya resheniya zadach NLP. URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/7-arhitektur-nejronnyh-setej-nlp/> [in Russian].

7. Alyoshin, S., Borodina, E., Hafiak, A., & Nosach, O. (2018). Neural Network Technology of the Financial and Economic Model Synthesis of Production as the Fragment of the Economy Digitalization. *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (4.8), 355–363.
8. Govindaraju, R.S. (2000). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 5, 115–123.
9. Hansen, L.K., & Salamon, P. (1990). Neural network ensembles. *IEEE T. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 10, 993–1001.
10. Hebb, D.O. (1949). *The organization of behavior*. New York : Wiley.
11. Irmak, A., & Kamble, B. (2009). Evapotranspiration data assimilation with genetic algorithms and SWAP model for on-demand irrigation. *Irrig. Sci.*, Vol. 28, 101–112.
12. Jarratano, D., & Riley, G. (2006). *Expert systems. Principles of programming development*. Ed. Williams
13. Khaikin, S. (2006). *Neural networks: Full course*. 2nd edition. Williams.
14. Kumar, M., Raghuvanshi, N.S., & Singh, R. (2011). Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: A review. *Irrig. Sci.*, Vol. 29, 11–25.
15. Lavrenko, S., Lavrenko, N., & Pichura, V. (2015). Neural network modeling of chickpea grain yield on ameliorated soils. *Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*, Vol. 2 (18), 16–30.
16. McCulloch, W.S., & Pitts, W.H. (1943). A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys.*, Vol. 5, 115–133.
17. Michie, D., Spiegelhalter, D.J., Taylor, C.C. (1994). *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*. Chichester: Ellis Horwood.
18. Minsky, M., & Papert, S.A. (1969). *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
19. Schumann, J.M.P., & Liu, Y. (2010). *Applications of Neural Networks in High Assurance Systems*. Springer: Berlin, Germany, Vol. 268. 345 p.
20. Turan, N.G., Mesci, B., & Ozgonenel, O. (2011). Artificial neural network (ANN) approach for modeling Zn(II) adsorption from leachate using a new biosorbent. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 173, 1, 98–105.

**S.O. Lavrenko, N.M. Lavrenko, M.V. Maksymov**

**Modern aspects of informatization of agricultural production based on modeling and forecasting the production process of lentils under different conditions of moisture supply**

**Abstract.** *The article presents the results of the application of modern systems for modeling and forecasting the production process of lentils in the Southern Steppe of Ukraine. The correlation-regression analysis shows the high reliability and practical value of the obtained mathematical models of growing lentils for grain depending on the conventional tillage, fertilizer rate, and plant density under different moisture conditions; that is confirmed by the curves based on the experimental data and calculations. Mathematical models of lentils grain yield under different moisture conditions were compiled according to the obtained regression coefficients and free members: without irrigation –  $Y = 1,5896 + 0,0032 \times X1 + 0,0007 \times X2 - 0,2561 \times X3$ , and when applying irrigation  $Y = 1,0200 + 0,0051 \times X1 + 0,0022 \times X2 + 0,2656 \times X3$ .*

*The following results were obtained for the dependent variable for different conditions of moisture supply after conducting a regression-normalized analysis of the researched factors in view of yield of lentils, where: in variant without irrigation  $R = 0.7059$ ;  $R^2 = 0.4983$ ; adjusted  $R^2 = 0.4682$ ;  $F(3,50) = 16,551$   $p < 0,00000$  and standard estimation error was 0,1232; in variant with irrigation  $R = 0,6131$ ;  $R^2 = 0.3759$ ; adjusted  $R^2 = 0.3385$ ;  $F(3,50) = 10.04$   $p < 0.00003$  and the standard estimation error was 0,2591.*

*Nonlinear multilayer artificial neuron models have been developed for the first time to predict lentils grain yields. Generalized regression artificial neural network GRNN (4-12-7-1) with 12 neurons in the first hidden layer and seven ones in the second hidden layer; learning productivity was 0.215; control productivity was 0.290; test productivity was 0.362; learning error was 0.136; control error was 0.049; test error was 0.066. Taking into account nonlinear patterns of factor effect on lentils grain yield the multiple correlation was 0.96. Based on the results of ranking the researched factors' effect on the dynamics of formation and yield of lentils, it was found that moisture conditions (water consumption, m<sup>3</sup>/ha) with an impact factor of 4.21 which exceeds other researched factors by almost 2.2 times, are in the first place. Plant density (million/ha) was in second place with a factor of 1.62. The rate of mineral fertilizers (kg/ha of active substance) was in third place, which was slightly inferior to the density of standing plants, resulting in a total of 1.61. The depth of tillage (cm) was in the last fourth place with an impact factor of 1.01.*

**Key words:** modeling, forecasting, neuron model, regression, lentils.



DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-326>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/326>

УДК 632.51:633.854.78:635.657:631.674

## ЗАБУР'ЯНЕНІСТЬ ПОСІВІВ СОНЯШНИКУ І НУТУ ЗАЛЕЖНО ВІД СПОСОБІВ МІКРОЗРОШЕННЯ

А.П. Шатковський<sup>1</sup>, докт. с.-г. наук, Ф.С. Мельничук<sup>2</sup>, докт. с.-г. наук, М.С. Ретьман<sup>3</sup>,  
канд. с.-г. наук, О.І. Гуленко<sup>4</sup>, В.В. Калілей<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-4366-0397>; e-mail: andriy-1804@ukr.net

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-2711-5185>; e-mail: melnichukf@ukr.net

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-6972-2410>; e-mail: retman\_m.s@ukr.net

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-1007-5677>; e-mail: gulenkoai@gmail.com

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0001-7875-1240>; e-mail: vkaliley@gmail.com

**Анотація.** У статті наведено результати експериментальних досліджень із вивчення впливу способів мікрозрошення (краплинного з наземним укладанням поливних трубопроводів (ПТ) та підґрунтового краплинного зрошення з укладанням ПТ на глибину 30 см) на видовий і кількісний склад бур'янів. Умовним контролем був варіант з природним вологозабезпеченням – без зрошення. Польові дослідження проведено в період 2020–2021 рр. на землях Брилівського дослідного поля Інституту водних проблем і меліорації НААН (підзона Степу Сухого) на культурах соняшнику і нуту. Облік чисельності та видового складу бур'янів проводили шляхом накладання облікової рамки за методикою Інституту захисту рослин НААН протягом третьої декади травня і третьої декади серпня. За результатами експериментальних досліджень доведено, що способи зрошення (а відтак – умови вологозабезпечення) достовірно впливали на ступінь забур'яненості посівів соняшнику і нуту. Встановлено, що впровадження підґрунтового краплинного зрошення в середньому за роки досліджень знижувало ступінь забур'яненості посівів соняшнику і нуту в 1,65 і 1,55 рази відповідно порівняно із класичним наземним укладанням краплинних поливних трубопроводів. Врешті-решт це знижувало пестицидне навантаження на агроєкосистему поля шляхом зменшення кількості гербіцидних обробіток посівів в середньому на 33–50%. На видовий склад бур'янів спосіб зрошення суттєво не вплинув. Крім цього, дослідження показали, що незалежно від способу зрошення забур'яненість посівів суттєво знижувала продуктивність досліджуваних сільськогосподарських культур: соняшнику на 18,0–21,2% і нуту на 27,9–29,7%. Одночасно, в незрошуваних умовах ступінь забур'яненості мав більший вплив на врожайність культур: зниження цього параметра на контрольному варіанті без зрошення становило 24,6% за вирощування соняшнику і 30,0% – нуту.

**Ключові слова:** забур'яненість, способи мікрозрошення, краплинне зрошення, підґрунтове краплинне зрошення, врожайність.

**Актуальність дослідження.** Актуальність контролю забур'яненості посівів сільськогосподарських культур зумовлена істотним негативним впливом бур'янів на продуктивність культурних рослин: відомо, що бур'яни, проростаючи одночасно з культурними рослинами, конкурують з останніми за світло, вологу та елементи живлення. Вони знижують врожайність культурних рослин, погіршують якість продукції, сприяють поширенню шкідників та хвороб [1–3].

Особливо актуальним є захист культурних рослин від бур'янів у зрошуваних умовах, адже оптимізуючи чинники зовнішнього середовища

ми одночасно провокуємо активний розвиток забур'яненості [4; 5].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Зважаючи на актуальність тематики в різні роки проведено значний комплекс різнопланових досліджень із впливу зрошення на фітосанітарний стан агроєкосистем. Найбільш системні дослідження за цією тематикою виконано вченими Інституту зрошуваного землеробства НААН [6], Інституту водних проблем і меліорації НААН [5; 7; 8], Херсонського державного аграрно-економічного університету [9], а також вченими закордонних науково-дослідних установ [10–13]. Характерно, що

в цих дослідженнях вивчали вплив дощування і краплинного зрошення, а також незрошуваних умов на видовий і кількісний склад бур'янів. Однак вплив підґрунтового краплинного зрошення (*subsurface drip irrigation*) [14] на фітосанітарний стан агроєкосистем досліджено недостатньо.

Отже, метою дослідження було вивчення впливу способів мікрозрошення (краплинного та підґрунтового зрошення) на видовий та кількісний склад бур'янів у посівах соняшнику і нуту в умовах Степу Сухого України.

**Матеріали і методи дослідження.** Польові дослідження проведено на землях Брилівського дослідного поля ІВПіМ НААН (с. Привітне, Виноградівська сільська громада Херсонського району Херсонської області, підзона Степу Сухого, 46°40' пн.ш. 33°12' сх.д.) протягом 2020–2021 рр. Вивчали вплив на забур'яненість двох способів поливу: краплинного зрошення (КЗ) із наземним укладанням поливних трубопроводів (ПТ) та підґрунтового краплинного зрошення з укладанням ПТ на глибину 30 см. Умовним контролем був варіант із природним вологозабезпеченням – без зрошення. Дослідження проводили за загальноприйнятими методиками: розміщення ділянок – систематичне, повторність – чотириразова,

площа облікових ділянок – 32 м<sup>2</sup> [15; 16], гібрид соняшнику кондитерського напрямку використання – Український F1, сорт нуту – Буджак.

З метою об'єктивного аналізування впливу способів зрошення на кількісний і видовий склад бур'янів, у межах облікових ділянок, нами було виділено окремі елементарні ділянки площею 8 м<sup>2</sup> у чотириразовій повторності. Вказані елементарні ділянки вкривали агроволоком під час внесення гербіцидних препаратів, отже рослинність у межах цих ділянок не зазнавала дії гербіцидів.

Облік чисельності та видового складу бур'янів проводили шляхом накладання облікової рамки згідно з методикою [17] Інституту захисту рослин НААН у третю декаду травня та третю декаду серпня.

Ґрунт дослідної ділянки – темно-каштановий легкосуглинковий, щільність складення шару 0–50 см – 1,47 г/см<sup>3</sup>, вміст гумусу – 1,44%, азоту лужногідролізованого (метод визначення – за Корнфілдом) – 7,0 мг/100 г ґрунту, рухомих сполук фосфору та калію в ґрунті за методом Чирикова – 32,3 мг/100 г та 9,3 мг/100 г ґрунту відповідно.

Кількість продуктивних опадів була різною за роки досліджень протягом вегетаційного періоду соняшнику і нуту. Так, у 2020 р. випало лише

#### 1. Чисельність бур'янів на посівах соняшнику залежно від способів зрошення

Спосіб зрошення	Видовий склад і чисельність бур'янів, шт./м <sup>2</sup>													Всього дводольних	ВСЬОГО
	<i>Setaria viridis</i> L.	<i>Setaria glauca</i> L.	<i>Apera spica ventii</i> L.	<i>Avena fatua</i> L.	Всього однорічних	<i>Amarantus retroflexus</i> L.	<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	<i>Datura stramonium</i> L.	<i>Panicum capillare</i> L.	<i>Galeopsis ladanum</i> L.	<i>Stellaria media</i> L.			
22 травня															
краплинне зрошення	3,0	3,0	3,3	3,2	<b>12,5</b>	–	–	3,1	3,0	3,0	3,1	2,1	<b>14,3</b>	<b>26,8</b>	
підґрунтове зрошення	2,0	2,5	2,5	2,0	<b>9,0</b>	–	–	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	<b>9,5</b>	<b>18,5</b>	
без зрошення	1,5	2,0	1,1	1,8	<b>6,4</b>	–	–	1,0	2,2	2,5	1,5	1,4	<b>8,6</b>	<b>15,0</b>	
НІР														2,05	
22 серпня															
краплинне зрошення	4,0	3,0	5,0	5,0	<b>17,0</b>	4,0	3,0	4,0	4,0	3,7	3,8	4,0	<b>26,5</b>	<b>43,5</b>	
підґрунтове зрошення	2,1	2,7	2,5	3,0	<b>10,3</b>	3,0	2,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,5	<b>16,0</b>	<b>26,3</b>	
без зрошення	2,1	2,5	2,0	2,2	<b>8,8</b>	1,5	1,0	1,8	2,5	3,0	3,0	2,1	<b>14,9</b>	<b>23,7</b>	
НІР														3,10	

68,0 мм, що складає лише 31,9% від кліматичної норми за вегетацію, а протягом 2021 р. – 205,5% від кліматичної норми, що також є аномальним явищем для умов Степу Сухого.

Рівень передполивної вологості в досліді – 80% від НВ 0–50 см шару ґрунту. Для призначення строків поливу використано інструментальні комплекси: зонд-воломір Drill and Drop компанії Sentek та станцію вологості ґрунту iMetos із датчиками Echo Probe EC-5 [18]. Враховуючи технологічну специфіку підґрунтового краплинного зрошення сходи рослин у незрошуваних умовах досліді отримували за рахунок природних вологозапасів ґрунту. Статистичний аналіз результатів досліджень проводили за дисперсійним, кореляційним і регресійним методами з використанням програми «Statistica 6.0».

**Результати дослідження та їх обговорення.**

Контрольні обліки показали, що видовий склад бур'янів було представлено однорічними злаковими (*Setaria viridis L. glauca*, *Setaria glauca L.*, *Avena fatua L.*) та дводольними (*Amarantus retroflexus L.*, *Ambrosia artemisifolia L.*, *Galinsoga parviflora Cav.*, *Datura stramonium L.*, *Panicum capillare L.*, *Galeopsis ladanum L.*, *Stellaria media L.*) бур'янами. Розрахунок найменшої істотної різниці однофакторного досліді засвідчив, що спосіб зрошення достовірно впливав на забур'яненість посівів соняшнику (табл. 1).

Так, станом на 22 травня в умовах природного вологозабезпечення загальна кількість бур'янів становила 15,0–6,4 шт./м<sup>2</sup> однорічних злакових видів та 8,6 шт./м<sup>2</sup> дводольних. Водночас, у зрошуваних умовах чисельність бур'янів закономірно збільшувалась у 1,2–1,8 раза – до 18,5–26,8 шт./м<sup>2</sup>. Як у незрошуваних умовах, так і на зрошенні переважали дводольні бур'яни (≈ 51,3–57,3% від загальної їх кількості). У розрізі зрошуваних варіантів достовірно (найменша істотна різниця у досліді становила 2,05) збільшення чисельності бур'янів відмічали на варіанті з наземним краплинним зрошенням – до 26,8 шт./м<sup>2</sup>. Водночас, підґрунтове краплинне зрошення знижувало забур'яненість на 31,0% порівняно із класичним краплинним зрошенням. Відмітимо також відсутність ярих пізніх бур'янів виду *Amarantus retroflexus L.* та *Ambrosia artemisifolia L.* на цей період часу.

Другий контрольний облік, проведений 22 серпня, засвідчив динамічне зростання забур'яненості на всіх дослідних ділянках на 58,0–62,1% порівняно з першим обліком 22 травня. За цього, найбільший ріст забур'яненості відмічено на варіанті краплинного зрошення та в умовах природного вологозабезпечення. На контролі цей факт пояснюємо поступовим з'явленням сходів бур'янів за мірою випадання продуктивних опадів протягом літніх

**2. Чисельність бур'янів на посівах нуту залежно від способів зрошення**

Спосіб зрошення	Видовий склад і чисельність бур'янів, шт./м <sup>2</sup>													
	<i>Setaria viridis L.</i>	<i>Setaria glauca L.</i>	<i>Apera spica venti L.</i>	<i>Avena fatua L.</i>	<b>Всього однорічних</b>	<i>Amarantus retroflexus L.</i>	<i>Ambrosia artemisifolia L.</i>	<i>Galinsoga parviflora Cav.</i>	<i>Datura stramonium L.</i>	<i>Panicum capillare L.</i>	<i>Galeopsis ladanum L.</i>	<i>Stellaria media L.</i>	<b>Всього дводольних</b>	<b>ВСЬОГО</b>
<b>23 травня</b>														
краплинне зрошення	2,0	2,5	3,0	3,0	<b>10,5</b>	–	–	3,0	3,0	3,0	2,5	2,0	<b>18,0</b>	<b>28,5</b>
підґрунтове зрошення	1,5	2,0	2,0	1,5	<b>7,0</b>	–	–	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0	12,5	19,5
без зрошення	1,5	2,0	1,0	1,5	<b>6,0</b>	–	–	1,0	2,0	2,0	1,5	1,5	<b>10,0</b>	<b>16,0</b>
<i>НІР</i>														2,29
<b>23 серпня</b>														
краплинне зрошення	3,7	3,5	4,2	3,2	<b>14,6</b>	3,1	3,6	4,2	3,6	3,5	3,5	3,5	<b>25,0</b>	<b>39,6</b>
підґрунтове зрошення	2,0	2,5	3,0	3,0	<b>10,5</b>	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	<b>15,0</b>	<b>25,5</b>
без зрошення	2,0	1,5	2,0	2,0	<b>7,5</b>	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	3,0	2,0	<b>14,5</b>	<b>22,0</b>
<i>НІР</i>														2,95

місяців. У розрізі зрошуваних варіантів зростання цього показника становило 42,1–62,1%, а вищим він був на ділянках із краплинним способом зрошення – до 43,5 шт./м<sup>2</sup>. Загалом, у розрізі варіантів досліду, видовий склад бур'янів та його співвідношення не змінилися. Ступінь забур'яненості посівів соняшнику у однофакторному досліді визначаємо як середній, наближений до сильного (23,7–43,5 шт./м<sup>2</sup>).

Практично аналогічно варіював видовий і чисельний склад бур'янів за вирощування нуту залежно від умов зволоженості ґрунту (табл. 2).

Перший контрольний облік, проведений 23 травня, показав наявність на дослідних ділянках сходів трьох видів однорічних та п'яти видів дводольних бур'янів у кількості 6,0–10,5 шт./м<sup>2</sup> та 10,0–18,0 шт./м<sup>2</sup> відповідно. Констатуємо, що різниця у чисельності бур'янів між варіантами з природним вологозабезпеченням та підґрунтовым зрошенням хоч і перевищувала відносну похибку польового досліду, проте була несуттєвою і становила 21,9%. Одночасно, за наземного розташування

ПТ чисельність бур'янів зростала на 46,2% порівняно з підґрунтовым зрошенням та 78,1% і становила 28,5 шт./м<sup>2</sup>.

Протягом другого контрольного обліку (23 серпня) чисельність бур'янів на посівах нуту закономірно збільшилась. Додатково також фіксували появу на всіх варіантах досліду пізніх ярих видів бур'янів *Amarantus retroflexus* L. та *Ambrosia artemisifolia* L. Порівняно з першим обліком чисельність бур'янів за краплинного зрошення зросла на 39,0% (до 39,6 шт./м<sup>2</sup>), за підґрунтового зрошення – на 30,8% (до 25,5 шт./м<sup>2</sup>) і за умов природного вологозабезпечення – на 37,5% (до 22,0 шт./м<sup>2</sup>).

За цього констатуємо, що підґрундове укладання ПТ, за якого поверхня ґрунту залишається сухою протягом вегетації, знижувало чисельність бур'янів на 31,6% та 35,6% на момент першого та другого контрольних обліків відповідно. Врешті-решт, це практично знижує пестицидне навантаження на агроєкосистему поля, адже зменшується кількість гербіцидних обробітків посівів, дозволяє економити матеріальні

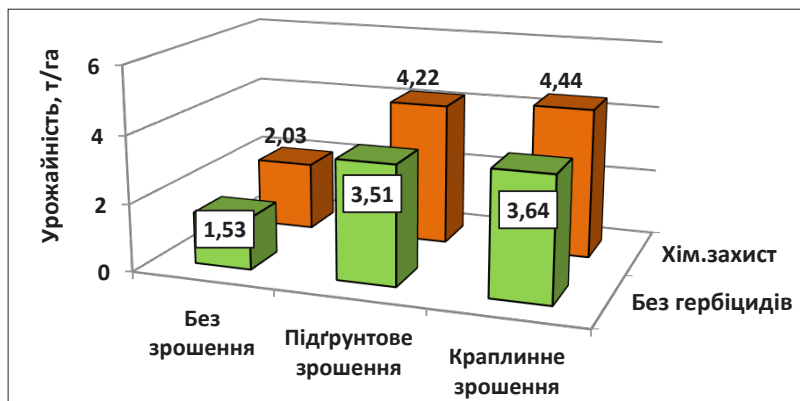


Рис. 1. Вплив забур'яненості на врожайність соняшнику за різних способів зрошення (т/га)

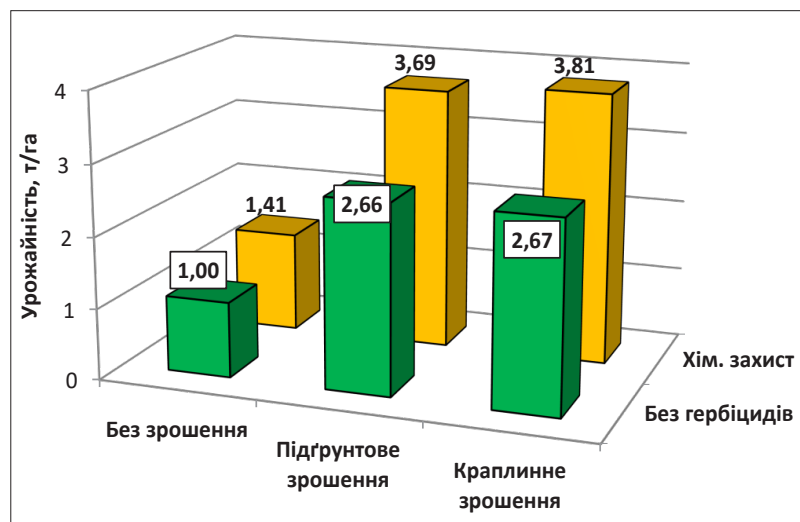


Рис. 2. Вплив забур'яненості на врожайність нуту за різних способів зрошення (т/га)

і трудові ресурси. До прикладу, в умовах 2020 року за краплинного зрошення на нуті було проведено дві гербіцидні обробки, а за підґрунтового зрошення – одну, а в умовах 2021 р. – три та дві відповідно.

Додатково було досліджено вплив забур'яненості посівів на врожайність соняшнику і нуту (рис. 1–2).

Встановлено, що незалежно від способу зрошення забур'яненість посівів значно знижувала продуктивність досліджуваних сільськогосподарських культур: соняшнику на 18,0–21,2% і нуту на 27,9–29,7%. Ця статистика підтверджує дані про те, що нут є однією з найбільш чутливих сільськогосподарських культур до негативного впливу бур'янів [19; 20]. В умовах природного вологозабезпечення забур'яненість більш суттєво вплинула на врожайність культур: зниження цього параметра становило 24,6% за вирощування соняшнику і 30,0% – нуту.

**Висновки.** Результатами експериментальних досліджень доведено, що спосіб зрошення достовірно впливав на ступінь забур'яненості

посівів соняшнику і нуту. Встановлено, що впровадження підґрунтового краплинного зрошення з укладанням поливних трубопроводів на глибину 30 см знижувало ступінь забур'яненості посівів соняшнику і нуту в 1,65 і 1,55 рази відповідно порівняно із класичним наземним укладанням краплинних поливних трубопроводів. Врешті це знижувало пестицидне навантаження на агроєкосистему поля шляхом зменшення кількості гербіцидних обробок посівів в середньому на 33–50%.

На видовий склад бур'янів спосіб зрошення не вплинув.

Крім цього, дослідження показали, що незалежно від способу зрошення забур'яненість посівів суттєво знижувала продуктивність досліджуваних сільськогосподарських культур: соняшнику на 18,0–21,2% і нуту на 27,9–29,7%. Одночасно, в незрошуваних умовах ступінь забур'яненості більше вплинула на врожайність культур: зниження цього параметра на цьому варіанті досліду становило 24,6% за вирощування соняшнику і 30,0% – нуту.

#### Бібліографія

1. Іващенко О.О. Загальна гербологія. Київ : Фенікс, 2019. 702 с.
2. Довідник із захисту рослин / Бублик Л.І. та ін. ; ред. М.П. Лісового. Київ : Урожай, 1999. 744 с.
3. Шевчук І.В. Сучасні методи захисту плодово-ягідних та овочевих культур від шкідливих організмів. Київ : Паритет, 2003. 176 с.
4. Coolong T. Using Irrigation to Manage Weeds: A Focus on Drip Irrigation. In book S. Soloneski, & M. Larramendy (Eds.), Weed and Pest Control – Conventional and New Challenges. IntechOpen. 2013. P. 161–169. DOI: <https://doi.org/10.5772/54153>
5. Мельничук Ф.С. Наукові основи регуляції фітосанітарного стану зрошуваних агроєкосистем : автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук : 03.00.16 «Екологія». Дніпро, 2021. 38 с.
6. Коковіхін С.В., Завірюхін В.І., Черненко В.Г. Ефективність технологічних схем боротьби з бур'янами при вирощуванні різних за скоростиглістю сортів сої в умовах зрошення. *Таврійський науковий вісник*. 2008. № 57. С. 35–44.
7. Melnychuk F., Marchenko O., Shatkovskiy A., Kovalenko I. Features of protection of row crops under irrigation conditions. *Scientific Horizons*, 2020, 23 (12), P. 36–45. DOI: [10.48077/scihor.23\(12\).2020.36-45](https://doi.org/10.48077/scihor.23(12).2020.36-45)
8. Ромащенко М.І., Шатковський А.П., Конаков Б.І., Мельничук Ф.С. Ефективність внесення гербіцидів з поливною водою при мікродощуванні моркви. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2007. Вип. 105. С. 171–175.
9. Макуха О.В. Аналіз фітосанітарного стану Херсонської області за поширенням карантинних бур'янів. *Аграрні інновації*. 2021. № 8. С. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2021.8.9>
10. Bhowmik P.C. Invasive weeds and climate change: past, present and future. *Journal of Crop and Weed*. 2014. 10 (2). P. 345–349.
11. Khaffagy A.E., Mazrou S.A., Morsy, A.R., Mansoury A.M., Tokhy A.I., Hafez Y. Impact of Irrigation Levels and Weed Control Treatments on Annual Weeds, Physiological Traits and Productivity of Soybean under Clay Soil Conditions. *Agronomy*, 2022, 12 (5), 1037. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051037>
12. Shabani F., Ahmadi M., Kumar L., Solhjoui-fard S., Shafapour Tehrani M., Shabani F., Kalantar D., Esmaeili A. Invasive weed species' threats to global biodiversity: future scenarios of changes in the number of invasive species in a changing climate. *Ecological Indicators*, 2020. Volume 116, 106436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106436>

13. M.deFreitas, S. Hamurábi A. Héliida, C. Mesquitab, M. TeófiloLaís, T. Rego, K. Pereiraa C. Grangeiroa, D. Silvaa. Can irrigation systems alter the critical period for weed control in onion cropping? *Crop Protection*. 2021. Volume 147, 105–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105457>
14. Devasirvatham V. A Review of Subsurface Drip Irrigation in Vegetable Production. Irrigation Matters Series. 2009. № 03/09. Darling Heights, Cooperative Research Center for Irrigation Futures. URL: [https://www.academia.edu/3216790/A\\_Review\\_of\\_Subsurface\\_Drip\\_Irrigation\\_in\\_Vegetable\\_Production](https://www.academia.edu/3216790/A_Review_of_Subsurface_Drip_Irrigation_in_Vegetable_Production)
15. Методика польового досліджу (зрошуване землеробство) / Ушкаренко В.О. та ін. Херсон : Грінь Д.С., 2014. 448 с.
16. Методичні рекомендації з проведення досліджень за краплинного зрошення / Ромащенко М.І. та ін. Київ : ТОВ «ДІА», 2014. 46 с.
17. Методики випробувань і застосування пестицидів / Трибель С.О. та ін. Київ : Світ, 2001. 448 с.
18. Шатковський А.П., Журавльов О.В. Управління краплинним зрошенням на основі використання інтернет-метеостанцій iMetos®. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2016. № 2 (59). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/6489/6373>
19. Коляніді Н.О. Вплив гербіцидів та способів сівби на продуктивність нуту в умовах Південного Степу України : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук : 06.01.09 «Рослинництво». Миколаїв, 2021. 20 с.
20. Сміх В.М. Наукове обґрунтування конкурентної спроможності посівів нуту і розробка ефективної системи захисту їх від бур'янів у Правобережному Лісостепу України : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук : 06.01.13 «Гербологія». Київ, 2020. 18 с.

#### References

1. Ivashchenko, O. O. (2019). *Zahalna herbolohiia [General herbology]*. Kyiv : Feniks [in Ukrainian].
2. Lisovyi, M.P., Bublyk, L.I., Vasechko, G.I., & Vasyliiev, V.P. (1999). *Dovidnyk iz zakhystu roslyn [Handbook of plant protection]*. Kyiv : Urozhai [in Ukrainian].
3. Shevchuk, I. V. (2003). *Suchasni metody zakhystu plodovo-yahidnykh ta ovochevykh kultur vid shkidlyvykh orhanizmiv [Modern methods of protecting fruit and vegetable crops from harmful organisms]*. Kyiv : Rarytet. [in Ukrainian].
4. Coolong, T. (2013). Using Irrigation to Manage Weeds: A Focus on Drip Irrigation. In S. Soloneski, & M. Larramendy (Eds.), *Weed and Pest Control – Conventional and New Challenges*. Intech Open, 161–169. DOI: <https://doi.org/10.5772/54153>
5. Melnychuk, F. S. (2021). *Naukovi osnovy rehuliatsii fitosanitarnoho stanu zroshuvanykh ahroekosystem [Scientific basis of the phytosanitary condition of irrigated agroecosystems]*. Extended abstract of candidate's thesis. Dnipro [in Ukrainian].
6. Kokovikhin, S. V., Zavirukhin, V. I., & Chernenko, V. G. (2008). Efektyvnist tekhnolohichnykh skhem borotby z burianamy pry vyroshchuvanni riznykh za skorostyhlituu sortiv soi v umovakh zroshennia [Effectiveness of technological schemes for weed control when growing soybean varieties of different precocity under irrigation conditions]. *Tavriys'kyi naukovy visnyk*, 57, 35–44 [in Ukrainian].
7. Melnychuk, F. S., Marchenko, O. A., Shatkovskiy, A. P., & Kovalenko, I. O. (2020). Features of protection of row crops under irrigation conditions. *Scientific Horizons*, 23 (12), 36–45. DOI: [10.48077/scihor.23\(12\).2020.36-45](https://doi.org/10.48077/scihor.23(12).2020.36-45)
8. Romashchenko, M. I., Shatkovskiy, A. P., Konakov, B. I. & Melnychuk, F. S. (2007). Efektyvnist vnesennia herbitsydiv z polyvnoiu vodoiu pry mikrodoshchuvanni morkvy [Effectiveness of application of herbicides with irrigation water during micro-irrigation of carrots]. *Naukovi visnyk Natsionalnoho ahrarnoho universytetu*, 105, 171–175 [in Ukrainian].
9. Makukha, O. V. (2021). *Analiz fitosanitarnoho stanu Khersonskoi oblasti za poshyrenniam karantynnykh burianiv [Analysis of the phytosanitary state of the Kherson region according to the spread of quarantine weeds]*. *Ahrarni innovatsii*, 8, 61–66. DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2021.8.9> [in Ukrainian].
10. Bhowmik, P. C. (2014). Invasive weeds and climate change: past, present and future. *Journal of Crop and Weed*, 10 (2), 345–349.
11. Khaffagy, A. E., Mazrou, S. A., Morsy, A. R., Mansoury, A. M., Tokhy, A. I. & Hafez, Y. I. (2022). Impact of Irrigation Levels and Weed Control Treatments on Annual Weeds, Physiological

Traits and Productivity of Soybean under Clay Soil Conditions. *Agronomy*, 12 (5), 1037. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051037>

12. Shabani, F. et al. (2020). Invasive weed species' threats to global biodiversity: future scenarios of changes in the number of invasive species in a changing climate. *Ecological Indicators*, 116, 106436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106436>

13. M.deFreitas, S. Hamurábi, A. Héliida, C. Mesquitab, M. TeófiloaLaís, T. Rego, K. Pereiraa C. Grangeiroa & D. Silvaa. (2021). Can irrigation systems alter the critical period for weed control in onion cropping? *Crop Protection*, 147, 105–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105457>

14. Devasirvatham, V. (2009): A Review of Subsurface Drip Irrigation in Vegetable Production. *Irrigation Matters Series № 03/09*. Darling Heights, Cooperative Research Center for Irrigation Futures. DOI: [https://www.academia.edu/3216790/A\\_Review\\_of\\_Subsurface\\_Drip\\_Irrigation\\_in\\_Vegetable\\_Production](https://www.academia.edu/3216790/A_Review_of_Subsurface_Drip_Irrigation_in_Vegetable_Production)

15. Ushkarenko, V. O. et al. (2014). Metodyka polovoho doslidu (zroshuvane zemlerobstvo) [Methodology of field experiment (irrigated agriculture)]. Kherson : Hrin D.S. [in Ukrainian].

16. Romashchenko, M.I. et al. (2014). Metodychni rekomendatsii z provedennia doslidzhen za kraplynnoho zroshennia [Methodological recommendations for conducting research on drip irrigation]. Kyiv: DIA [in Ukrainian].

17. Trybel, S. O. et al. (2001). Metodyky vyprobuvan i zastosuvannia pestytsydiv [Test methods and application of pesticides]. Kyiv : Svit.[in Ukrainian].

18. Shatkovskiy, A. P., & Zhuravlov, O. V. (2016). Upravlinnia kraplynnym zroshenniam na osnovi vykorystannia internet-meteostantsii iMetos® [Management of drip irrigation based on the use of Internet weather stations]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy*, 2 (59). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/6489/6373> [in Ukrainian].

19. Koloyanidi, N. O. (2021). Vplyv herbicydiv ta sposobiv sivyby na produktyvnist nutu v umovakh Pivdennoho Stepu Ukrainy [The influence of herbicides and sowing methods on chickpea productivity in the conditions of the Southern Steppe of Ukraine]. Extended abstract of candidate's thesis. Mykolaiv [in Ukrainian].

20. Smikh, V. M. (2020). Naukove obruntuvannia konkurentnoi spromozhnosti posyviv nutu i rozrobka efektyvnoi systemy zakhystu yikh vid burianiv u Pravoberezhnomu Lisostepu Ukrainy [Scientific substantiation of the competitiveness of chickpea crops and the development of an effective system for protecting them from weeds in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine]. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv [in Ukrainian].

**A.P. Shatkovskiy, F.S. Melnychuk, M.S. Retman, O.I. Gulenko, V.V. Kaliley**

#### **Weed development in sunflower and chickpea crops depending on micro-irrigation methods**

**Abstract.** The article presents the results of experimental studies on the effect of micro-irrigation methods (drip irrigation with the surface laying of irrigation pipelines (IP) and subsoil drip irrigation with laying of IP at a depth of 30 cm) on the species and quantitative composition of weeds. The variant with a natural moisture supply (without irrigation) served as a reference area. Field research was conducted in the period 2020–2021 on the lands of the Brylivs'ke experimental field of the Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS (Dry Steppe subzone) in sunflower and chickpea crops. Monitoring of the number and species composition of weeds was carried out by applying the recording framework by the method of the Institute of Plant Protection of NAAS during the third decade of May and the third decade of August. Based on the results of experimental research, it was proved that the irrigation methods (and hence the conditions of moisture supply) reliably influenced the degree of weed development in sunflower and chickpea crops. It was specified that the implementation of subsoil drip irrigation on average over the years of research reduced the degree of weed development in sunflower and chickpea crops by 1,65 and 1,55 times, respectively, compared to the typical surface laying of drip irrigation pipelines. Ultimately, that reduced the pesticide load on the field agro-ecosystem by reducing the number of herbicide treatments of crops by an average of 33–50%. The species composition of weeds was not significantly affected by the method of irrigation. In addition, the researchers have shown that, regardless of the irrigation method, weed development in crops significantly reduced the productivity of the investigated crops: sunflower by 18,0–21,2% and chickpea by 27,9–29,7%. At the same time, in non-irrigated conditions, the degree of weed development had a greater impact on crop yield; thus, yield reduction in the reference variant without irrigation was 24,6% for sunflower and 30,0% for chickpeas.

**Key words:** weed development, methods of micro-irrigation, drip irrigation, subsurface drip irrigation, crop productivity.

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-319>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/319>

УДК 628.1

## АДАПТИВНА СИСТЕМА ЗНЕЗАРАЖЕННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ ЯК ОСНОВА НОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ДО УСТАНОВОК ЗАМКНЕНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

А.П. Левчук<sup>1</sup>, наук. співробітник, В.І. Максін<sup>2</sup>, д-р хім. наук, О.В. Зоріна<sup>3</sup>, д-р біол. наук, С.А. Шевчук<sup>4</sup>, канд. тех. наук, Є.М. Мацелюк<sup>5</sup>, канд. тех. наук

<sup>1</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-5127-0110>; e-mail: andriylevchuk@ukr.net

<sup>2</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; Науково-дослідний інститут «Ресурс» Держагентства України «Резерв», м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-8903-6744>; e-mail: vimaksin@ukr.net

<sup>3</sup> ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва Національної академії медичних наук України»; <https://orcid.org/0000-0002-1557-8521>; e-mail: wateramnu@ukr.net

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-5844-4980>; e-mail: sergey\_shevchuk\_@ukr.net

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-7231-1188>; e-mail: evgen1523@ukr.net

**Анотація.** Сучасні умови промислового вирощування риби супроводжуються неконтрольованою дією природних чи техногенних чинників, що впливають на якість води, яка, своєю чергою, впливає на показники якості продукції. Одним із специфічних чинників є негативна дія на показники якості води мікроводоростей та їхніх токсинів. Виникає необхідність створення механізмів з усунення чинників розвитку мікроводоростей та прояву дії їхніх токсинів, за можливості – деструкції самих токсинів. Промислові господарства мають мати систему, яка в превентивному автоматичному режимі зможе усунути негативні чинники проявів у водному середовищі мікроводоростей, водночас така система має бути безпечною для навколишнього середовища і людини. Наведено обґрунтування технологічно-конструктивного рішення складу та опис роботи зразка системи знезараження мікроводоростей з використанням адаптивного підходу до конструкції загалом, а також окремих блоків та вузлів на основі застосування імпульсних електрохімічних методів як головного чинника впливу на стан води. Використання електродних методів знешкодження мікроводоростей дозволяє одночасно реалізувати механізм зміни токсичного впливу сечі гідробіонтів при її накопиченні на нетоксичний. Це здійснюється через перетворення, окиснення і відновлення її водних розчинів, що забезпечує зміну властивостей розчину на оптимальні для живлення рослин. Використання електродних методів перетворення є основою нового підходу до інноваційної технології установок замкненого водопостачання (УЗВ) для рибних господарств чи тепличних комплексів, що може у своєму єдиному технологічному циклі виконувати одну, дві чи більше важливих задач. Перша – знезараження небезпечних біоагентів та деструкція і вилучення мікроводоростей. Друга – кероване перетворення сечі гідробіонтів на поживний розчин із необхідною іонною формою для вживання кореневою системою рослин. Третя – синтез та отримання важливих компонентів, таких як кисень та водень. Четверта – збір і подальше використання згущеної фракції мікроводоростей. За головний контролюючий параметр води прийнято світлопроникність – як спрощений, узагальнений показник наявності мікроводоростей у водному середовищі. У системі використано ефективний процес деструктивного впливу на мікроводорості та їхні токсини – імпульсний струм навантаження електродів зі зміною його параметрів та форми з підготовкою структури води для кращої дії струму за рахунок кавітаційних блоків, що також діють деструктивно на мікроводорості і токсини. В умовах зміни світлопроникності та рН робочого розчину параметри імпульсного струму навантаження також змінюються адаптивним джерелом живлення на найефективніші. Запропоноване рішення може бути покращено за використання відомих напрацювань, що використовуються для більш якісного очищення води в адаптивних системах очищення води. Одним із перспективних напрямків є відбір і спрямування мікроводоростей та згущеної фракції виділень гідробіонтів одночасно на адаптивну біогазову систему (АБС) задля отримання якісних органічних добрив та біогазу. Інший напрямок – можливість створення адаптивних систем контролю параметрів води для гідропікі та систем аквапонікі. Важливим додатковим чинником нового технологічного підходу є отримання в процесі роботи електролі-

© Левчук А.П., Максін В.І., Зоріна О.В., Шевчук С.А., Мацелюк Є.М., 2022



зеру з нерозчинним анодом та мембраною кисню, що може інжектуватися у водне середовище з гідробіотами, та водню для використання його як джерела електроенергії чи теплової енергії.

**Ключові слова:** водокористування, мікрководорості, токсини, очищення води, знезараження води, УЗВ, кавітація, імпульсний електроліз, кисень, водень, аквапоніка, адаптивне джерело живлення, форма струму, адаптація.

**Актуальність дослідження.** Проблема розвитку мікрководоростей та негативного впливу їхніх токсинів є актуальною для рибогосподарських господарств та водних ареалів. Постійний розвиток промислового рибного господарства та перехід до промислового вирощування цінних порід риб потребує сталого середовища вирощування риби, яке буде наділено оптимальними властивостями для отримання найбільшого приросту живої маси товарного продукту. Отже, обслуговуючий персонал промислових господарств із вирощування риби чи інших гідробіонтів має мати механізм та технологічні можливості контролювати показники водного середовища та впливати на них. Сучасний підхід до впливу на параметри води через класичні технологічні рішення в УЗВ є простим та іноді виправданим при оптимальних (спрощених) умовах його використання. Якщо умови змінюються чи стають багатофакторними, то необхідна універсальна керована система, яка б могла вирішити комплекс проблем: знезараження, очищення, синтез необхідних речовин для вживання рослинами. Якщо комплекс розведення гідробіонтів пов'язаний з рослинами, то необхідне одночасне підтримання в цій системі концентрації кисню у воді з гідробіонтами та температури в теплиці та басейні.

Відомо багато визначальних показників, що впливають на стан розвитку та якість кінцевого товарного продукту рибного господарства, але існують ще не вирішені питання. Одним із них є вплив розвитку синьо-зелених мікрководоростей та їхніх токсинів на загальні показники параметрів водного середовища, загальний потенціал росту промислового об'єкта та як додатковий ускладнюючий вплив на показники органолептичної якості самого м'яса тушки риби.

До вирішення цього питання слід підходити з урахуванням декількох завдань:

1. Усунення сприятливих чинників утворення та розвитку мікрководоростей та небезпечних біоагентів.

2. Очищення водного середовища та/чи деструкція водоростей, якщо існує наявність у воді синьо-зелених мікрководоростей чи небезпечних біоагентів протягом всього часу промислового регламенту чи в певний період.

3. Очищення вже самої риби від прояву прониклих токсинів синьо-зелених мікрводостей.

4. Можливість превентивного знезараження відомих та невідомих небезпечних агентів, що можуть потрапити у водне середовище з гідробіонтами чи в водні розчини живлення для рослин.

5. Перетворення токсичної форми виділень гідробіонтів на оптимальну форму для вживання кореневою системою рослин.

У сучасному світі постійно збільшуються вимоги до якості продукції рибогосподарських підприємств. До того ж господарства мають враховувати можливість зміни асортименту продукції, що змінює вимоги до якості водного середовища. При вирощуванні риби у відкритих водних басейнах слід враховувати зміну зовнішніх чинників, таких як мінливість погодних показників тощо. Тому басейни чи озера мають бути обладнані необхідним устаткуванням, яке контролює показники параметрів води, змінює їх на потрібні та може адаптивно впливати на якість води відповідно до змін періоду року вирощування, непередбачуваних чинників та можливих змін вимог до якості продукції, а також бути ефективним при повній зміні виду породи риби для промислового розведення. Потрібно враховувати також наявну епідеміологічну ситуацію з вірусами, що можуть передаватися через воду. Враховуючи перспективи розвитку інноваційних форм комбінованих і інтегрованих рибогосподарських технологій та комплексів з вирощування рослин, виникає потреба в особливих оптимальних технологічних рішеннях, які враховують особливості двох названих концепцій. Необхідно визначити шляхи пошуку технологічних рішень, які зможуть одночасно зменшити за рахунок свого функціонування навантаження на енергетичні затрати та зменшити собівартість продукції. Отже, актуальною є розробка нової концепції технологічного підходу до контролю та очищення води рибогосподарських підприємств. Технічні рішення мають гарантувати якість очищення води, а процес очищення має бути максимально автоматизованим. За можливості він має покращувати енергетичний баланс загальної системи. Новітня концепція має бути наділена превентивними властивостями дезінфекційного впливу та забезпечувати очищення води від відомих та невідомих забруднювачів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Ми не розглядаємо вирішення завдання

зnezараження мікрободоростей хімічними методами, які можуть бути ефективними, але при цьому існує вірогідність накопичення діючої речовини та проявів непередбачуваних чинників суміжної їх дії. Розглянемо інші методи прямого впливу на водорості. Сучасні технологічні рішення [4–6] мають суттєві недоліки, що впливають на якість продукції, продуктивність виробництва та показники характеристик води. Сучасні рішення для систем УЗВ описані в [1].

Технологічні рішення, які базуються на розробках Гончарова Ф.І., пропонують використання електролізних методів для систем аквапоніки [7–8]. Аналізуючи їх публікації, ми дійшли до висновку, що в них є правильне бачення вектора руху, проте при висвітленні використання бездіафрагмового електролізера не описано базову конструкцію електролізного блоку, немає акценту на таку особливість як розчинний чи нерозчинний анод. Якщо врахувати конструктивну особливість, а саме бездіафрагмовий електролізер, можна дійти висновку, що не відбуваються необхідні для систем аквапоніки процеси. Бездіафрагмові електролізери не здатні роздільно синтезувати кисень та водень, здійснювати ефективну рН-корекцію та синтезувати задані речовини в іонній формі. А враховуючи, що в роботі [8] використаний термін «засипні електроди з інертного матеріалу», можна зробити висновок, що найімовірніше, був використаний електролізер із розчинними електродами. Електролізери з розчинними електродами (анодом) є ефективними для інших задач, але за своєю технологічною особливістю для систем аквапоніки не ефективні, а в деяких режимах шкідливі. Якщо припускалось, що це графітові електроди, то такі електроди не ефективні при синтезі газу, крім того недосконалою є конструкція самого електролізера. В цих публікаціях немає і частки ідей, спрямованих на заміну біофільтра, як ядра системи УЗВ, а пропонується лише стабілізація його роботи за допомогою електролізного блоку.

Враховуючи наші напрацювання і досвід щодо обґрунтування систем УЗВ та аквапоніки [10–13], є підстави стверджувати, що потрібно використовувати електролізер мембранного типу з нерозчинними електродами та системою відбору газів. Базові недоліки класичних систем очищення води описані в статті [9–10], вони по суті належать як до систем зnezараження чи очищення води від мікрободоростей, так і для нового підходу до УЗВ. До них можна віднести:

1. Монотехнологічність головного методу впливу: тільки фільтрація, системи з використанням тільки ультразвуку чи ультрафіолету, електролізних методів впливу, електролізер із

розчинним анодом чи, навпаки, тільки з нерозчинним анодом.

2. Технологічна та гідравлічна обмеженість: проходження не всього об'єму води резервуару вирощування риби через блок впливу, відсутній контроль часу перебування під впливом факторів обробки, не контрольований час перебування в міжелектродному просторі чи під дією ультрафіолетового опромінювання.

3. Технологічна обмеженість для покращення якості обробки, відсутність загальної концепції та уніфікації з іншими технологічними блоками, за потреби. Використовується тільки можливість дозування або синтезу одного коагулянта чи одного дезінфектанта, що значно звужує технологічні можливості зnezараження води, часто умови використання є взаємовиключними.

4. Використання в якості діючої дезінфікуючої речовини будь-яких іонів металу, найпоширеніші – це Ag, Cu тощо, створює умови їх накопичення та проблемності дії іонів, яким байдуже, що руйнувати – чи потрібну нам мікрофлору, чи шкідливу. Вони «сліпі» у своїй дії.

5. Відсутність мінімальних технологічних адаптивних можливостей як загалом, так і в окремих технологічних вузлах, що робить систему неспроможною гнучко реагувати на зміни: якості води, природніх чинників чи технологічного регламенту для кожної окремої породи риби.

6. Один із головних недоліків – відсутність спроможності впливу на енергетичний баланс системи, як окремо, так і загалом.

**Мета досліджень** – сформувати нову технологічну модель комплексу зnezаражуючих та деструктивних впливів на небезпечні біоагенти і мікрободорості та розробити автоматичну насосну станцію – адаптивну систему зnezараження мікрободоростей (АСЗМ) з реалізацією ідей синтезу речовин в іонній формі, а також кисню та водню, через адаптивний підхід до технологічних впливів.

Технологічний цикл має виконувати три завдання:

1. Зnezараження, деструкція та очищення води від небезпечних біоагентів та мікрободоростей.

2. Перетворення виділень гідробіонтів у нетоксичну форму та перетворення їх в оптимальну форму споживання кореневою системою рослин – іонну.

3. Відокремлення згущеної фракції виділень гідробіонтів та мікрободоростей і переправлення їх на біогазову систему з одночасним синтезом кисню і водню, що комплексно дозволить покращити енергетичний баланс системи.

У спрощену систему буде закладено принцип знезараження, деструкції та руйнування мікробіодоростей та деструкції їхніх токсинів без вилучення рештків із потоку, як таких, що не впливають суттєво на показники росту та органолептичні показники м'яса риби після вилову та не можуть негативно вплинути на рослини після дезінфекції.

Нова система вирішуватиме такі питання: гарантоване за будь-яких умов знезараження та деструкції більшості небезпечних біоагентів і мікробіодоростей, деструкції їхніх токсинів, руйнування та окиснення органічних забруднювачів та небезпечних біологічних агентів. Одночасно буде проходити перетворення амонію до нітратів та відновлення азоту на аноді.

Весь цей комплекс вирішуваних питань досягається технологічно-конструктивним поєднанням адаптивних способів знезараження води та синтезу речовин, що посилюють один одного. Одночасно в комплексі буде реалізований відвід концентрату згущених фракцій на біогазову систему та синтез кисню і водню з можливістю їх відбору та подальшого використання.

#### **Матеріали та методика досліджень.**

Технологічний процес роботи АСЗМ буде використовувати в собі принципи адаптивного підходу, закладеного при розробці адаптивної системи очищення води (АСОВ) [11]. Вони будуть закладені в загальну гідравлічну схему, режим роботи, технологічні вузли, блоки системи та у джерело живлення електролізного блоку.

Попередніми дослідженнями підтверджено ефективність запропонованих концепцій, технологічних методів та конструктивних рішень [12].

Пропонується спрощена концепція об'ємної десорбції мікробіодоростей у водному розчині з частковою зміною структури води, через використання мінімально необхідних технологічних методів впливу для подальшої деструкції мікробіодоростей та їхніх токсинів, яка використовує адаптивне нарощування інтенсивності синергічної послідовності технологічного впливу, що представлено підготовчими впливами та одним головним впливом – електролізною деструкцією імпульсним струмом. Процес знезараження та деструкції мікробіодоростей планується проводити через контроль параметра світлопроникності водного потоку, як узагальнений показник наявності мікробіодоростей, та додаткового контролю рН. За необхідності кількість параметрів для контролю можливо збільшити.

Враховуючи попередні результати дослідів, ми дійшли висновку, що робота АСЗМ має бути на засадах превентивно-профілактичної адаптації технологічних процесів та автоматичної

оптимізації вибору параметрів імпульсно-струмових режимів електролізу. Застосування оптимальних параметрів кавітації та струму надають системі гарантованої ефективності роботи та превентивних властивостей і дозволять зменшити питомі витрати електроенергії від 20 до 50 %, порівняно зі стаціонарним електролізом.

Робота АСЗМ можлива як на упередження, так і за наявності проблеми. Розглядаємо варіант включення АСЗМ в роботу за місяць до вилову риби – як базовий підхід для випробувань, що, на нашу думку, дасть ефект очищення води водойми та в кінцевому варіанті гарантує прийнятні органолептичні показники м'яса риби.

Нова система АСЗМ буде побудована на рециркуляційному контурі на весь об'єм вирощування риби чи інших гідробіонтів, що включатиме гідродинамічну кавітаційну обробку, ультразвукову обробку та електролізну. Зрештою це призводить до гарантованого знезараження та деструкції мікробіодоростей. Адаптивний та рециркуляційний підхід в АСЗМ гарантовано не допускає «проскоку» незруйнованих об'єктів мікробіодоростей з наданням дезінфекційних властивостей всьому об'єму води, який пройшов обробку, пролонгованої дії за рахунок електроактивації води.

Технологічна особливість АСЗМ полягає в наділенні її спектром методів впливу з адаптивними можливостями для гарантування деструкції мікробіодоростей та їхніх токсинів. При використанні цих методів впливу особливу увагу слід приділяти екологічно-природному та оздоровчому фактору впливу на воду, аби не синтезувати непередбачуваних токсинів та речовин, які неможливо ідентифікувати та виділити з води. Запропонована система буде використовувати параметри електролізних перетворень, які є притаманними природним процесам. Якщо якість знезараження мікробіодоростей у воді не досягнута за один прямий прохід через систему, оскільки кінцевий об'єкт – озеро, резервуар чи система аквапоніки, то відбувається повернення всього об'єму води на повторну обробку, аж поки запланований результат та якість не будуть досягнуті.

Для гарантування процесу знезараження мікробіодоростей та деструкції їхніх токсинів з одночасним зменшенням витрат електроенергії в технологічно-конструктивній схемі АСЗМ будемо використовувати адаптивне джерело живлення електролізного процесу, що надасть адаптивності налаштуванням параметрів імпульсного струму навантаження електролізного блоку. Буде застосовано низькочастотний імпульсний струм загальної форми

з можливими високочастотними включеннями. Обґрунтування впливу форми струму та застосування загальних низькочастотних імпульсів доведено дослідженнями [13–14], а для гарантування їх дії при деструкції та знезараженні мікробіодоростей пропонується наділити їх високочастотними елементними вставками в загальному низькочастотному сигналі імпульсного струму.

**Результати досліджень.** З урахуванням проведених нами попередніх дослідів та накопиченого досвіду розроблено та представлено концептуальну технолого-гідралічну схему АСЗМ із використанням гідродинамічної каві-

тації, акустичної кавітації та електролізного блока з імпульсним живленням від адаптивного джерела живлення, що буде базуватися на принципі побудови автоматичної насосної станції, яка зображена на рисунку 1.

Розроблений експериментальний зразок електролізера для різноманітних завдань АСЗМ, що є складовим похідної системи від АСОВ, представлений на рисунку 2.

Вигляд на адаптивне джерело живлення АСЗМ представлено на рисунку 3.

Функціонує АСЗМ таким чином: можливі два варіанти роботи АСЗМ. Перший – система включається в роботу у превентивному режимі,

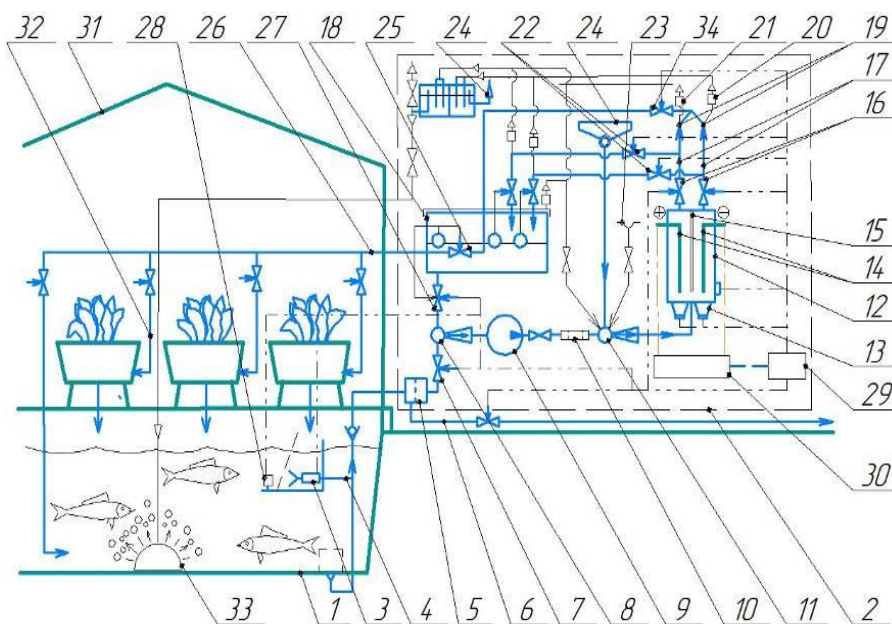


Рис. 1. Принципова функціонально-технологічна та загальна гідралічна схема АСЗМ з новим підходом до УЗВ та одночасним синтезом та відбором кисню і водню:

- 1 – резервуар для вирощування риби (гідробіонтів); 2 – АСЗМ; 3 – вузол відбору води з блоком контролю параметрів водного розчину; 4 – всмоктуючий патрубок водного розчину;
- 5 – фільтр із комбінованим плаваючим завантаженням; 6 – патрубок відводу концентрату мікробіодоростей та виділень гідробіонтів на біогазову систему; 7 – вентиль корегування балансу продуктивності на всмоктування; 8 – головний інжектор; 9 – робочі насоси АСЗМ;
- 10 – гідродинамічний блок; 11 – інжектор; 12 – мембранний (діафрагмовий) з нерозчинними електродами; 13 – акустичні ультразвукові випромінювачі; 14 – нерозчинні електроди (анод); 15 – мембрана (діафрагма); 16 – вентилі рН-корекції та балансу продуктивності; 17 – патрубки рециркуляції; 18 – блок узгодження рециркуляції та подачі водного розчину; 19 – патрубки подачі води з системи; 20 – повітропускник відбору водню; 21 – повітропускник відбору кисню; 22 – автоматичні вентилі контролю граничного рівня води; 23 – сапун; 24 – відвід водню з гідрозамкової системи на накопичення чи енергетичний блок; 25 – автоматичний вентиль контролю граничного рівня води; 26 – магістраль подачі знезараженої води та заданого розчину; 27 – вентиль контролю балансу рециркуляції; 28 – блок відлякування риби від зони водозабору; 29 – блок інтелектуального керування та блок ультразвукових генераторів; 30 – адаптивне джерело живлення електролізерів; 31 – тепличний комплекс для вирощування рослин із керованими параметрами (як складовий елемент аквапонічної системи); 32 – подача очищеного водного розчину із заданими параметрами на систему вирощування рослин; 33 – система подачі кисню в ємність з гідробіонтами.



Рис. 2. Зовнішній вигляд виготовленого зразка АСЗМ на базі АСОВ:  
 а – вигляд на електролізер зверху та на систему окремого відбору кисню та водню;  
 б – вигляд на електролізер знизу та на встановлені кавітаційні випромінювачі.



Рис. 3. Зовнішній вигляд адаптивного джерела живлення електролізних блоків:  
 а – вигляд на передню панель керування та контролю параметрів, включаючи інтегрований портативний осцилограф; б – вигляд на внутрішні складові елементи джерела.

на упередження, та працює відповідний час за заданим регламентом превентивної дії. Другий варіант – робота за наявного рівня забруднення. Така робота можлива в комбінованому режимі, для економії енергозатрат. Можливий варіант робити, коли виявлено мікрободорості у воді рибгосподарського комплексу, – включається АСЗМ в повноцінному варіанті дії. Або в оптимальному режимі роботи – з оцінкою забруднення мікрободоростями та включення при досягненні встановлених показників. АСЗМ включається в роботу, в режимі оцінювання концентрації мікрободоростей чи небезпечних біоагентів в превентивному варіанті у водному середовищі, чи вже при наявності у воді мікрободоростей. У режимі оцінки АСЗМ працює в автоматичному адап-

тивному режимі. Розглянемо його як найбільш перспективний на прикладі мікрободоростей. В АСЗМ працює блок оцінювання якості води на контроль концентрації мікрободоростей, усі інші блоки для енергозбереження вимкнено. Оцінюємо воду з джерела водозабору на наявність мікрободоростей блоком 3, рис. 1: якщо концентрація мікрободоростей починає перевищувати задані параметри, то поступає команда на включення всіх технологічних блоків обробки води АСЗМ. Вода всмоктується зі спеціалізованого вузла водозабору 5, що включає блоки відлякування від вузла риби 28, рис. 1. Далі вода може потрапляти у фільтр із комбінованим плаваючим завантаженням 5, при використанні якого в АСЗМ концентрат мікрободоростей відводиться в адаптивну

біогазову систему. Можливий також варіант роботи АСЗМ без фільтра 5, як мінімальний, чи можливе встановлення додаткового фільтра перед подачею водного розчину на рослини та до гідробіотів. Технологічна компоновка АСЗМ може доповнюватися до повноти всіх технологічних прийомів, як і в АСОВ, зі своєю специфікою, якщо в конкретному випадку потрібні високі вимоги до параметрів якості води на рівні з вимогами до питного водозабезпечення. Проходячи фільтр 5, чи без нього, вода потрапляє у вихровий головний інжектор 8, що служить для задавання головного рециркуляційного циклу та балансу продуктивності відбору води з резервуару та часу знаходження в обробці, через всю систему АСЗМ. З головного інжектора воду відбирає насосний агрегат(ти) 9 і подає її на вузол гідродинамічної кавітаційної підготовки води 10, де проходить розбивка колоїдних згущень та гомогенізація розчину з частковим руйнуванням органіки, можлива робота на теплову зміну параметрів води, за потреби. З гідродинамічного блоку вода потрапляє у вихровий інжектор 11, що служить допоміжним технологічним вузлом, через який в систему повертаються гази з повітроспускників 20, які утворюються при електролізі чи проводиться інжектування повітря, за потреби через сапун 23, та можливе інжектування допоміжних речовин з блоку 24 для синтезу дезінфектантів чи речовин контролю електропровідності водного розчину та можливого додаткового рН-корегування. З блоку 11 вода потрапляє в головний технологічний блок 12, мембранний електролізер з нерозчинними електродами 14, анод із рутенієвим покриттям (оксидно-рутенієвий титановий анод – ОРТА) та мембраною 15. На електролізері встановлено ультразвукові випромінювачі 13, що гарантують депасивацію електродів та якість роботи електролізного блоку з додатковим деструктивним впливом на забруднювачі. На електроди 14 струм навантаження подається з адаптивного джерела живлення електролізерів 30, яке керується блоком інтелектуального керування та блоком ультразвукових генераторів 29. З електролізера 12 вода виходить розділена на аналіт та каталіт, їх баланс регулюють вентилі рН-корекції та балансу продуктивності 16. В рециркуляційному режимі роботи вода патрубками 17 повертається в блок узгодження рециркуляції та подачі водного розчину 18. Граничний рівень повернення води в блок 18 в автоматичному режимі контролюють вентилі контролю граничного рівня води 22. Вода з електролізного блоку 12 в озеро чи резервуар 1 подається через патрубки 17,

які об'єднуються в одну магістраль 26, з якої проходить розподілення обробленої води по системі вирощування рослин через патрубки 32 чи окремим патрубком одразу в озеро або резервуар. Загальний баланс подачі обробленої води в озеро чи резервуар 1, рис. 1, регулює автоматичний вентиль 34, а гранично низький рівень води в блоці 18 регулює автоматичний вентиль допоміжного контролю балансу 25. Рециркуляційну пропорцію повернення води через всю систему АСЗМ також задає реагуючий вентиль 27. Через регулювання вентилю 7, вентилю 34, вентилів 22 патрубків 17, вентилю 27 встановлюється одна з головних технологічних особливостей роботи АСОВ та АСЗМ: рециркуляційний об'єм внутрішньої циркуляції за продуктивністю перевищує об'єм всмоктування та виходу води в озеро чи резервуар у чотири рази (або можливі інші співвідношення), що формує проходження через блоки обробки та збільшення часу знаходження в міжелектродному просторі в чотири рази на один умовний об'єм за той же час, що всмоктується, та об'єм, що подається в озеро чи резервуар.

При роботі системи за рахунок технологічних блоків 10, 13 та 12 формується спрощена зміна структурних властивостей води – часткова об'ємна десорбція. Це служить допоміжним чинникам полегшення обробки води та знезараження мікрободоростей електролізером 12, киснем та іншими чинниками знезараження.

Одним із головних інноваційних рішень технології є встановлений повітроспускник 20, що дозволяє виділити з водного потоку водень та перенаправити його з системи на накопичення чи пряме використання в енергетичних рішеннях. Через повітроспускник 21 проводиться відвід кисню та відновленого азоту, який також можна направити на накопичення чи пряме використання в технології вирощування гідробіотів, що призводить до додаткових позитивних шляхів покращення енергетичного балансу системи. Окремо частина кисню чи повітря може податися в інжектор 11. Всі ці рішення вирішують питання безпечності технології АСЗМ.

Запропонована базова схема АСЗМ дозволяє одночасно вирішити всі проблемні питання класичних біологічних фільтрів УЗВ: зменшення об'єму блока, покращення ефективності роботи та можливість керування, через заміну його на електролізний блок із нерозчинним анодом, що усуває всі три недоліки та додатково надає позитиву – формування водних розчинів із заданими властивостями та перетворення виділень гідробіотів у форму, сприятливу для живлення рослин – іонну.

Електролізні методи дозволяють керовано проводити пряме перетворення амонію до нітратів, швидко минаючи стадію нітритів, не використовуючи бактеріальне перетворення, що є перспективним.

Запропонована система АСЗМ є науково-технологічним рішенням із гарантованим ефектом роботи. Використання імпульсного струму навантаження з комбінованою формою імпульсного струму, який оптимізується залежно від задач та рН, суттєво зменшує енергозатрати на самі електролізні процеси, деструктивно впливає на мікробіодорості та їхні токсини та формує покращення енергетичного балансу системи через отримання додаткової енергії від біогазової системи та від джерел генерації тепла чи електроенергії, що можуть жити воднем. Попередні розрахунки показують, що споживана електрична потужність системи з трьома включеними насосними агрегатами (один насосний агрегат з орієнтовною потужністю – 6,2 кВт/год) та робочим електролізером з ультразвуковими випромінювачами в мінімальному режимі обробки вийдуть на такі витрати електроенергії – 19,5 кВт/год. При повному спектрі задіяних блоків впливу та насосів, джерела живлення електролізерів, генераторів ультразвуку та системи управління, споживана електрична потужність становить – 21,8 кВт/год. У такому випадку на місяць роботи розрахункові затрати будуть становити – 15500 кВт/міс. при очищенні загального об'єму води озера чи резервуару з орієнтовним об'ємом  $V \approx 49300 \text{ м}^3$ , орієнтований плюс на зменшення затрат електроенергії від біогазової системи та систем генерації енергії від водню буде на рівні 20240%.

Проведений у попередніх роботах теоретичний аналіз та лабораторні дослідження дозволили сформулювати принцип побудови та концепцію АСЗМ, яка була реалізована в готовому зразку АСОВ, що має в собі складові АСЗМ.

За результатами лабораторних досліджень теоретично обґрунтовано ефективність роботи запропонованого процесу для знезараження мікробіодоростей і біонебезпечних агентів та їхніх токсинів, що реалізовано у зразку АСЗМ, і для подальшого відпрацювання оптимального технологічного процесу знезараження води озера чи резервуару для систем окремого вирощування гідробіонтів або в системах аквапоніки, що дозволяє найкраще використати плюси комбінованої технології – дезінфекція води, заміна біологічного фільтра на електролізний блок та синтез з виділень гідробіонтів речовин для живлення рослин в сприятливій формі для їхньої кореневої системи – іонній, при одночасному синтезі кисню і водню.

В АСЗМ буде використовуватися принцип побудови систем знезараження води – незалежно від технологічного рішення система має набути адаптивних властивостей як в цілому, так і в кожному окремому технологічному вузлові чи блоці.

Обґрунтовано доцільність реалізації адаптивного джерела живлення зі зміною форми імпульсного струму, допрацьовано та запропоновано комбінацію складових частот, які адаптуються під показники параметрів води на вході в АСЗМ.

Вперше запропоновано та інтегровано в систему знезараження води від мікробіодоростей та інших токсинів блок узгодження рециркуляції та подачі водного розчину, блок гідродинамічної обробки з можливістю нагріву води за потреби, комбінований вузол вихрового інжектування речовин, рециркуляційний підконтур електролізера з нерозчинними електродами з можливістю корекції рН та одночасного прямого синтезу дезінфектантів у спрощеному варіанті, встановлено повітроспускники на патрубках та запропоновано збільшену внутрішню рециркуляцію води в чотири рази чи інші пропорції відносно об'єму всмоктування та подачі води в озеро за один і той же час.

Вперше запропоновано новітній принцип змін до УЗВ, у частині технології впливу на амоній електрохімічним методом, використовуючи електролізер з нерозчинними електродами мембранної конструкції, через заміну некерованого класичного біологічного фільтра на керований адаптивний електролізний блок, що використовує електрохімічні методи перетворення, як нове ядро інноваційних технологічних рішень до УЗВ.

Вперше запропоновано використати технологічні особливості електролізних методів для синтезу кисню, який є необхідний гідробіонтам, та відразу його застосування на місці з паралельним синтезом водню, який може бути використаний в енергетичній системі для зменшення собівартості сільгосппродукції. В систему закладено можливість згущення мікробіодоростей та виділень гідробіонтів за рахунок використання фільтра з комбінованим плаваючим завантаженням та можливість відправляти згущену фракцію на біогазову систему, що додатково покращить енергетичний баланс системи.

Вперше запропоновано замінити класичний барабанний фільтр на початку технологічних блоків класичної УЗВ на фільтр оригінальної конструкції з комбінованим плаваючим завантаженням, як на початку технологічного циклу впливів, так і з можливістю встановлення в кінці технологічної послідовності, перед виходом із системи.

Запропонована система АСЗМ є перспективним зразком для проведення експериментів із знезараження та деструкції мікроводоростей і їхніх токсинів в реальних умовах. При виявленні недостатнього знезаражувального ефекту без електротехнологічного синтезу дезінфектантів, через попередню відмову від внесення у водний потік системи сторонніх речовин, можливе поступове ускладнення технології АСЗМ до варіанту АСОВ. При цьому можливе поступове додавання в АСЗМ блоку електролізних гідроциклонів та їх супутніх вузлів для збільшення часу реакції і ефективності знезараження. Якщо дооснащення АСЗМ блоком гідроциклонів буде недостатнім, проведемо включення в технологічну послідовність АСЗМ блоку розчинення та закаламучування тощо. Відповідно, можливе залучення блоку електролізного синтезу дезінфектантів та коагулянтів із використанням методу коагуляційного вилучення мікроводоростей на адаптивному фільтрі. Ідею коагуляційного вилучення мікроводоростей описано в літературі [15]. Так, АСЗМ може поступово або регламентовано відтворити технологічний базис АСОВ у різноманітних поєднаннях зі своєю специфікою під очищення води для рибогосподарських підприємств та комплексів тепличного господарства. Причём найперспективнішою формою вважаємо поєднання їх у системи аквапоніки, аквааеропоніки, що дозволить максимально використати на місці всі плюси технології.

В подальшому необхідно створити зразок АСЗМ із розрахунковими параметрами щодо продуктивності і конструктивної компоновки в стандартному морському контейнері та здій-

снити дослідження ефективності та надійності роботи АСЗМ в реальних умовах.

### Висновки

1. Теоретично обґрунтовано принцип побудови системи, що реалізує адаптивну технологію знезараження і очищення води від біоагентів і мікроводоростей.

2. Створено експериментальний зразок адаптивної системи знезараження мікроводоростей (АСЗМ), в якому реалізовано низку технологічних і конструктивних особливостей, а саме:

- адаптивне джерело живлення зі зміною параметрів та форми імпульсного струму;
- інтегровано в систему знезараження води блок узгодження рециркуляції та подачі води, який включає підконтур електролізера з можливістю корекції рН води;

– використано електролізер із нерозчинними електродами мембранної конструкції, що забезпечує необхідний технологічний вплив на амоній, перетворюючи його на нітрати в іонній формі, що підходить для прямого живлення рослин, формуючи нову концепцію підходу до технології УЗВ та аквапоніки, а також проходить синтез кисню та водню, кисень необхідний для гідробіонтів, водень може бути використаний для покращення енергетичного балансу систем аквапоніки чи тепличних блоків.

3. Створений експериментальний зразок системи буде використаний для дослідження процесів знезараження мікроводоростей та їх токсинів в реальних умовах із метою визначення її оптимальних параметрів, які забезпечать необхідну якість обробленої води для питного водопостачання та рибогосподарських підприємств.

### Бібліографія

1. Проскуренко И.В. Замкнутые рыбоводные установки. Москва : ВНИРО. 2003. 152 с.
2. Machiels M.A.M. and Henken A.M. A dynamic simulation model for growth of the African Cat- fish, *Clarias gariepinus* // (Burchell, 1822). III. The effect of body composition on growth and feed intake. *Aquaculture*, 1986. 60. P. 55–71.
3. Wikimedia Foundation. (2021, August 19). Аквапоника. *Wikipedia*. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Aquaponics> (дата звернення 1 травня 2022).
4. Продовольственной и сельскохозяйственной организация ООН (FAO). (2021, August 19). Состояние мирового рыболовства и аквакультуры. *FAO*. URL: <http://www.fao.org/3/i3720r/i3720r.pdf> (дата звернення 1 травня 2022).
5. Перспективні напрями розвитку вітчизняних систем водоочищення з поверхневими джерелами водопостачання в умовах глобальних кліматичних, антропогенних і соціально-економічних змін / Чарний Д.Ю. та ін. *Водопостачання та водовідведення*. № 4. 2021. С. 23–38.
6. Shidlovskiy M. S., Dyman M.M., Zakhovaiko O.P., Odydko D.G. Spatial deformations of osteosynthesis systems. Experimental results. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020. № 2 (89). P. 29–35.
7. Козырь А. В., Штепа В.Н. Влияние электролизных процессов на содержание азотистых соединений и продуктивность фитомодуля для аквапонической системы. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Вип. 211 «Інноваційне, технічне та технологічне забезпечення галузі тваринництва». 2021. С. 40–43.
8. Козырь А. В., Штепа В.Н. Установка замкнутого водоснабжения для выращивания рыб с аквапоническим модулем. *Проблеми екології та енергозбереження* : матеріали



XIV Міжнародної науково-технічної конференції, 17–19 вересня 2021 року / Національний університет кораблебудування. Миколаїв : Видавець Торубара В.В. 2021. С. 133–135.

9. Гончаров Ф. І., Левчук А.П. Обґрунтування енергоефективного способу управління джерелом живлення електролітичних систем очищення водних розчинів. *Науковий вісник НУБіП України*. 2015. Вип. 209, ч. 1. С. 235–239.

10. Левчук А.П. Адаптивна система знезараження води. *Науковий вісник НУБіП України*. Вип. 252. 2016. С. 158–165.

11. Левчук А. П., Максін В.І. Використання адаптивного підходу до розробки системи очищення води. *Меліорація і водне господарство*. 2020. Вип. 112. С. 126–135.

12. Левчук А. П., Максін В.І. Апробація гідравлічної рециркуляції та струму навантаження в прототипі адаптивної системи знезараження води : тези допов. міжнар. наук.-техн. конф. 27–28 грудня 2017 р. Польща, м. Родим : Radom academy of economics, 2017. С. 188–190.

13. Левчук А.П. Обґрунтування енергоефективного способу живлення електротехнологічних систем очищення водних розчинів. *Науковий вісник НУБіП України*. 2014. Вип. 194, ч. 3. С. 280–290.

14. Гончаров Ф. И., Левчук А.П. Влияние формы импульсного тока на энергоэффективность получения коагулянта путем анодного растворения железа в зависимости от начального рН раствора. *Инновации в сельском хозяйстве*. Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Москва, 2014. Вип. 4(9). С. 53–57.

15. Кульский Л. А., Гребенюк В.Д., Савлук О.С. Электрохимия в процессах очистки воды. Київ : Техніка, 1987. 220 с.

#### References

1. Proskurenko, Y. V. (2003). Zamknutue rubovodnue ustanovky [Closed fish farms]. Moskva : VNYRO [in Russian].

2. Machiels, M., & Henken, A. (1986). Dynamichna imitatsiina model rostu afrykanskooho kota – ryby Clarias gariepinus [A dynamic simulation model for growth of the African Cat-fish, Clarias gariepinus]. *Aquaculture*, 60, 55–71 [in English].

3. Wikimedia Foundation. (2021). Aquaponica. Wikipedia. ru.wikipedia.org. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Aquaponics> [in Russian].

4. Prodovolstvennoi y selskokhoziaistvennaia orhanyzatsiia OON (FAO). Sostoianye myrovoho rubolovstva y akvakultury. FAO (2021). fao.org URL: <http://www.fao.org/3/i3720r/i3720r.pdf> [in Ukrainian].

5. Charnyi, D. V., Novytskyi, D. Iu., Nikitin, A. M., Kostiuk, V. A., Lopata, L. M., & Kupriiets, O. L. (2021). Perspektyvni napriamy rozvytku vitchyznianskykh system vodoochyschennia z poverkhnevymy dzherelamy vodopostachannia v umovakh hlobalnykh klimatychnykh, antropohennykh i sotsialno-ekonomichnykh zmin [Perspective directions of development of domestic water purification systems with surface water supply sources in the conditions of global climate, anthropogenic and socio-economic changes]. *Vodopostachannia ta vodovidvedennia*, 4, 23–38 [in Ukrainian].

6. Aftanaziv, I., Strutyńska, L., Strohan, O., & Svidrak, I. (2020). Vibrozonansnyi kavitator dlia homohenzatsii vodorostei prysnovodnykh vodoim yak syrovyny bioenerhetyky [Vibration resonance cavitator for homogenization of freshwater algae as raw materials of bioenergy]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 89(2), 29–35 [in Ukrainian].

7. Kozyr, A. V., & Shtepa, V. N. (2021). Vlyianye elektrolyznykh protsessov na sodержanye azotistykh soedyneni y produktyvnost fyto modulia dlia akvaponycheskoi systemy [Influence of electrolytic processes on the content of nitrogen compounds and phytomodule productivity for aquaponic system]. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture*, Vol. 211, 40–43 [in Russian].

8. Kozyr, A. V., & Shtepa, V. N. (2021). Ustanovka zamknutoho vodosnabzhenia dlia vyrashchyvanyia ryb s akvaponycheskym modulem [Installation of a closed water supply for fish farming with an aquaponic module]. *Materialy XIV Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii, 17–19 veresnia 2021 roku. Problemy ekolohii ta enerhoberezhennia*. Natsionalnyi universytet korablobuduvannia. Mykolaiv : Vydavets Torubara V.V., 133–135 [in Ukrainian].

9. Kozyr, A. V., & Shtepa, V. N. (2015). Ustanovka zamknutoho vodosnabzhenia dlia vyrashchyvanyia ryb s akvaponycheskym modulem [Substantiation of energy efficient method of power supply control of electrolytic systems for purification of aqueous solutions]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy*, 209(1), 235–239 [in Ukrainian].

10. Levchuk, A. P. (2016). Adaptive systema znezarazhennia vody [Adaptive water disinfection system]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy*, 252, 158–165 [in Ukrainian].
11. Levchuk, A. P., & Maksin, V. I. (2020). Vykorystannia adaptivnoho pidkhodu do rozrobky systemy ochyshchennia vody [Using an adaptive approach to the development of water purification system]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 112, 126–135 [in Ukrainian].
12. Levchuk, A. P., & Maksin, V. I. (2017). Aprobatsiia hidravlichnoi retsyrkuliatsii ta strumu navantazhennia v prototypi adaptivnoi systemi znezarazhennia vody [Approbation of hydraulic recirculation and load current in the prototype of the adaptive water disinfection system]. *Tezy dopov. mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Polshcha, m. Rodym: radom academy of economics*, 188–190 [in Polish].
13. Levchuk, A. P. (2014). Obgruntuvannia enerhoefektyvnoho sposobu zhyvlennia elektrotekhnolohichnykh system ochyshchennia vodnykh rozchyniv [Substantiation of energy efficient method of power supply of electrotechnological systems for purification of aqueous solutions]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy*, 194, 280–290 [in Ukrainian].
14. Honcharov, F. Y., & Levchuk, A. P. (2014). Vlyanye formy ympulsnoho toka na enerhoefektyvnost polucheniya koahulianta putem anodnoho rastvoreniya zheleza v zavysymosti ot nachalnoho pH rastvora [Influence of pulsed current shape on energy efficiency of coagulant production by anodic dissolution of iron depending on initial pH of solution]. *Ynnovatsyy v selskom khoziaistve. Federalnyi nauchnyi ahroyntzhenernyi tsentr VYM. Moskva*, 4(9), 53–57 [in Russia].
15. Kul'skyi, L. A., Hrebenuk, V. D., & Savluk, O. S. (1987). *Elektrokhymiya v protsessakh ochystky vody* [Electrochemistry in water purification processes]. Kiev: Tekhnika [in Ukrainian].

**A.P. Levchuk, V.I. Maksin, O.V. Zorina, S.A. Shevchuk, E.M. Matselyuk**  
**Adaptive microalgae disinfection system as the basis of a new technological approach to closed water supply installations**

**Abstract.** Modern conditions of industrial fish farming are accompanied by the uncontrolled influence of natural or man-made factors that affect water quality, which in turn affects the quality of products. One of the specific factors is the negative effect of microalgae and their toxins on water quality indicators. There is a need to create mechanisms to eliminate the factors of microalgae development and the manifestation of their toxins, if possible – the destruction of the toxins themselves. Industrial farms must have a system that can eliminate in a preventive automatic mode the negative effect of microalgae on the aquatic environment, while such a system must be safe for the environment and humans. Substantiation of technological and constructive solutions for the microalgae disinfection system operation using an adaptive approach to the structure in general, as well as individual blocks and units based on pulsed electrochemical methods as the main factors influencing water condition. The use of electrolytic methods of microalgae neutralization enables us to simultaneously realize the mechanism of change of toxic effect of aquatic organisms' urine when it is accumulating into nontoxic. This is done through the transformation, oxidation, and reduction of its aqueous solutions, which provides a change in the solution properties to optimal for plant nutrition. The use of electrolytic transformation methods is a new approach to the innovative technology of closed water supply systems (CWSS) for fisheries or greenhouse complexes, which can perform one, two, or more important tasks in a single technological cycle. The first one is the disinfection of hazardous bioagents as well as the destruction and removal of microalgae. The second one is the controlled transformation of the urine of aquatic organisms into a nutrient solution with the necessary ionic form for use by the plant root system. The third one is the synthesis and production of important components such as oxygen and hydrogen. The fourth one is the collection and subsequent use of the condensed fraction of microalgae. The main control parameter of water is light transmission – as a simplified, generalized indicator of the presence of microalgae in the aquatic environment. The system uses an effective process of destructive action on microalgae and their toxins – pulsed load current of electrodes with changes in its parameters and shape to prepare the water structure for better current effect due to cavitation blocks, which also destructively affect microalgae and toxins. When changing light transmission and pH of the working solution, the parameters of the pulsed load current are also changed by the adaptive power supply source to the most efficient. The proposed solution can be improved by using known developments used for better water purification in adaptive water purification systems. One of the promising areas is the selection and direction of microalgae and the condensed fraction of aquatic organisms at the same time to the adaptive biogas system (ABS) to obtain quality organic fertilizers and biogas. Another area is creating adaptive control systems for water parameters for hydroponics and aquaponics systems. An important extra factor of the new technological approach is the use of an electrolyzer with an insoluble anode and oxygen membrane that can be injected into the aquatic environment with aquatic organisms, as well as hydrogen for use as a source of power or heat.

**Key words:** water use, microalgae, toxins, water purification, water disinfection, ultrasound, cavitation, pulsed electrolysis, oxygen, hydrogen, aquaponics, adaptive power supply source, current form, adaptation.

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-315>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/315>

УДК 628.132

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ДІЮЧИХ БІОІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ДООЧИЩЕННЯ ОСВІТЛЕНИХ ВОД ХВОСТОСХОВИЩА НА ПРИКЛАДІ ОЧИСНИХ СПОРУД ПРАТ «ПОЛТАВСЬКИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ»

Д.В. Чарний<sup>1</sup>, докт. техн. наук, Є.М. Мацелюк<sup>2</sup>, канд. техн. наук, С.А. Шевчук<sup>3</sup>, канд. техн. наук, Ю.А. Онанко<sup>4</sup>, В.Д. Левицька<sup>5</sup>, С.В. Марисик<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0001-6150-6433>; e-mail: dmitrych10@gmail.com

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0001-9960-6333>; e-mail: evgen1523@ukr.net

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0002-7401-8786>; e-mail: sergey\_shevchuk\_@ukr.net

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0002-7231-1188>; e-mail: yaonanko1@gmail.com

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0003-2213-1696>; e-mail: veral@ukr.net

<sup>6</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0002-0100-7787>; e-mail: sergsi.marisik@ukr.net

**Анотація.** Для встановлення можливого впливу біоінженерних споруд (БІС) на довкілля було проведено натурний експеримент зі встановлення діючих гідродинамічних характеристик БІС та перевірки гідроізоляційних властивостей захисного шару ложка БІС ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» (ГЗК). Використано методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а також картування поширення модельного розчину, що імітує забруднення в процесі його проходження площею БІС під час очищення. Встановлено, що час перебування води, яка проходить очищення в БІС, становить близько однієї доби. Таким чином, швидкість проходження очищеної води через БІС (швидкість фільтрації) становить близько 20 м/год., що не дає можливості очистити стічні води належним чином. Картування поширення модельного розчину виявило суттєві зміни його місцевих концентрацій, тобто зміни об'ємів вихідної води, які надходять до БІС, суттєво впливають на фронт поширення забруднень. Встановлено, що швидкість проходження очищеної води згідно з картами БІС значно більша за оптимальні швидкості для фіторе mediaційних споруд. Тобто відбувається суттєве перенавантаження одних частин поверхонь БІС і недонавантаження інших. Також статистично достовірно виявлено суттєвий гідравлічний зв'язок БІС із ґрунтовими водами, тобто дослідним шляхом підтверджено, що захисний гідроізоляційний екран пошкоджено, а в процесі роботи БІС відбувається забруднення навколишніх ґрунтових вод. Результати досліджень показали, що БІС є гідравлічно пов'язаним із навколишніми ґрунтовими водами і слугує джерелом їх вторинного забруднення. Отже існує потреба розроблення комплексу заходів для підвищення ефективності зазначеної БІС. Одним із перспективних напрямів досліджень є використання водної рослинності та гідробіонтів не лише з метою фіторе mediaції, а й для фітоекстракції та як джерела отримання чистих металів (легуючих присадок).

**Ключові слова:** вода, стоки, біоінженерні споруди (БІС), фіторе mediaція, гідроізоляційний екран.

**Постановка проблеми.** У відповідності до «Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну р. Дніпро на період до 2021 року» і Загальнодержавної цільової соціальної програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки, одним із найважливіших водоохоронних заходів у населених пунктах, господарських об'єктах і на сільськогосподарських угіддях є упорядкування існуючого водовідведення, при якому унеможли-

лено надходження до довкілля недостатньо очищених стічних вод. В умовах зростаючого антропогенного навантаження, насамперед на водні об'єкти, важливим є вирішення проблеми мінімізації впливу стічних вод на стан джерел водопостачання.

**Актуальність досліджень.** Одним із суттєвих забруднювачів природних вод є стічні води хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК). Актуальним є визначення ефективності діючих біоінженерних споруд (БІС), які були

© Чарний Д.В., Мацелюк Є.М., Шевчук С.А., Онанко Ю.А., Левицька В.Д., Марисик С.В., 2022

побудовані у 80-ті роки минулого століття, при доочищенні освітлених вод хвостосховищ та встановлення їх впливу на довкілля. Фактичні показники технологічних параметрів та ефективності роботи очисних споруд визначаються шляхом здійснення натурних досліджень на діючому об'єкті. В якості об'єкта досліджень були прийняті БІС із використанням вищої водної рослинності для доочищення вод м. Горішні Плавні Полтавської області.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. БІС широко використовують у світі при очищенні стічних вод із використанням вищої водної рослинності [1–7]. Дослідження проникності БІС та вплив на підземні води висвітлено в [6–7], проте в зазначених матеріалах не розкрито способи визначення ефективності дії БІС для доочищення освітлених вод хвостосховищ ГЗК та надійності захисних гідроізоляційних екранів в сучасних умовах.

Мета дослідження. Визначити вплив основних технологічних параметрів споруд водоочищення в системах БІС на довкілля при доочищенні стічних вод ГЗК.

Матеріали і методи дослідження. Були застосовані емпіричні методи досліджень: для визначення реальних технологічних характеристик діючої системи БІС застосовано методи натурального експерименту щодо встановлення гідродинамічних характеристик БІС, а також надійності функціонування гідроізоляційного захисту ложа споруди. Дослідження розповсюдження забруднень у воді по площі споруд доочищення стічних вод здійснювалось за допомогою дистанційного зондування Землі.

Для визначення гідродинамічних характеристик був обраний метод внесення флуоресцентної мітки з вихідною водою. Цей метод

дозволяє встановити, чи існує гідравлічний зв'язок діючих БІС із навколишніми ґрунтовими водами, тобто дозволяє встановити ефективність гідроізоляційного захисту. Також він дозволяє встановити реальний час перебування води в споруді та, відповідно, встановити швидкість проходження вихідної води у картах споруди.

Для проведення натурального експерименту флуоресцентний реагент вносився в сухі карти БІС 1а та БІС 1б біля труб надходження вихідної води на споруди. Далі насосна станція починала подавати вихідну воду. Досліди проводилися з 10 по 12 жовтня 2021р., за цей період на БІС було подано 56 000 м<sup>3</sup> води: 10 жовтня – 17 600 м<sup>3</sup>, 11 жовтня – 22 400 м<sup>3</sup>, 12 жовтня – 16 000 м<sup>3</sup>. У процесі надходження води через рівні проміжки часу відбиралися проби. Точки їх відбору наведено на рис. 1.

Серед усіх точок відбору проб виділяються дві контрольні. Точка № 845- це оглядовий колодязь визначення рівнів ґрунтових вод, проби з якого було використано для контролю поширення флуоресцентного реагенту в ґрунтових водах за межами БІС. Ще однією контрольною точкою є точка № К35. Це оглядовий колодязь на колекторі збору очищеної води з БІС, проби з якого були необхідні для встановлення часових характеристик перебування вихідної води у інфільтраційних спорудах БІС.

Відібрані проби консервувались і накопичувались у процесі експерименту. Після проведення аналізу концентрацій флуоресцентного реагенту в пробах проводився статистичний аналіз отриманих результатів.

Супутникові знімки високої роздільної здатності за останні роки отримано за допомогою програмного забезпечення Google Планета Земля (Google Earth <https://www.google.com/intl/uk/earth/download/gep/agree.html>).

Хронологічні зміни в процесі експлуатації об'єкта в 2021 р. визначено за даними супутникових знімків земної поверхні, які виконані Європейським космічним агентством (European Space Agency, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/>) і американською приватною компанією зі створення зображень Землі – Planet Labs Inc, що базується в м. Сан-Франциско, штат Каліфорнія (Planet Labs, Daily Satellite Imagery and Insights, <https://www.planet.com>). Для відстеження змін та визначення відповідних зв'язків використано щоденне зображення ділянок БІС.

На базі отриманих результатів і статистичного аналізу були побудовані карти розповсюдження флуоресцентного



Рис. 1. Точки відбору проб у районі БІС

реагенту по площі БІС в часі, які відтворюють розповсюдження забруднень по площі споруд.

**Результати дослідів та їх статистичної обробки.** Зміну значень концентрації флуоресцентного реагенту в точках відбору проб на картах БІС в умовних одиницях залежно від часу наведено на рис. 2.

Кореляційних зв'язків [8–9] між часом і концентрацією флуоресцентного реагенту за параметричним критерієм Пірсона по всіх точках відбору проб не виявлено. Результати непараметричної кореляції за Спірманом наведено у табл. 1.

Зміни концентрації флуоресцентного реагенту в колодязях спостереження рівнів ґрунтових вод на території БІС і поза її межами наведено на рис. 3 [10–12]: (точка відбору проб К35 – рис. 3а) і поза її межами (точка відбору проб № 845 – рис. 3б). Згідно з графіком на рис. 3а флуоресцентний реагент у концентраціях, доступних для виявлення в оглядовому

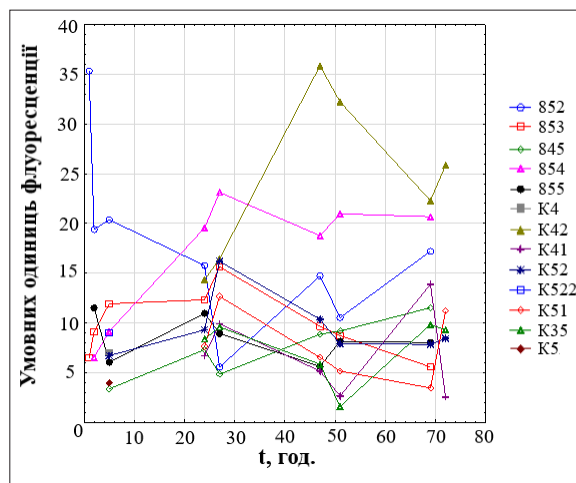


Рис. 2. Зміни концентрації флуоресцентного реагенту в часі в точках відбору проб

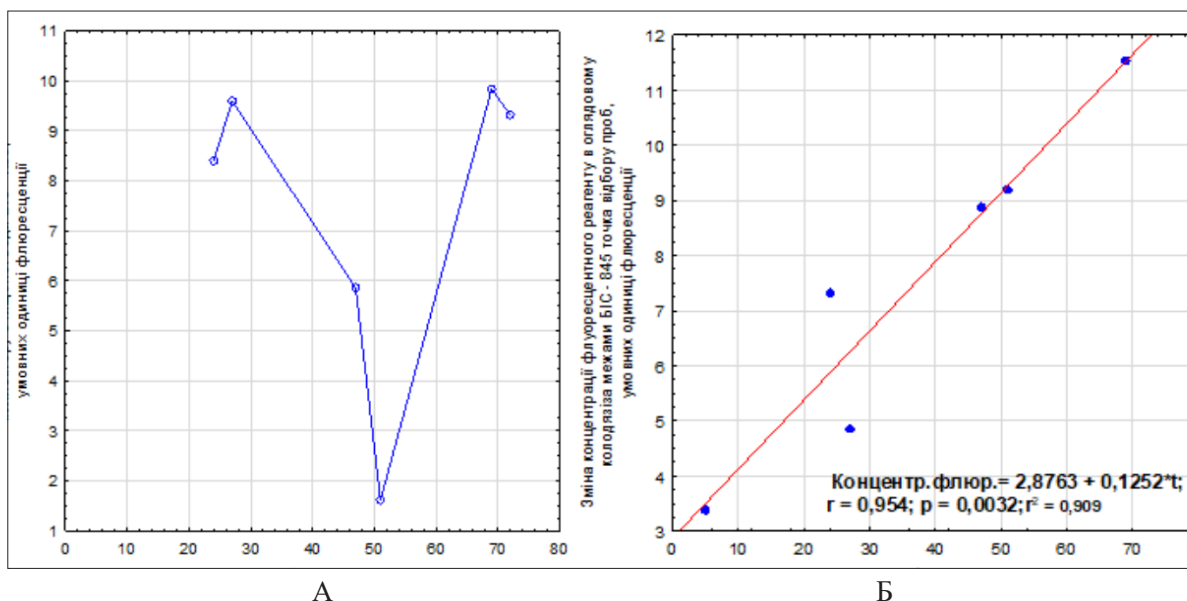


Рис. 3. Зміни концентрації флуоресцентного реагенту в оглядовому колодязі збірному колектору очищеної води БІС (точка відбору проб К35 – зліва) і поза межами БІС (точка відбору проб № 845)

1. Результати непараметричної кореляції між часом (t) і концентрацією флуоресцентного реагенту по точках відбору проб

Точки	Точки відбору проб (змінні)						
	T	852	853	845	854	855	K4
коефіцієнти кореляції відносно – t	1,000	–0,667	–0,167	0,943	0,679	–0,464	
точки	точки відбору проб (змінні)						
	K5	K42	K41	K52	K522	K51	K35
коефіцієнти кореляції відносно – t		0,486	–0,371	–0,036		–0,314	0,200

колодязі збірного колектору очищеної води БІС, з'явився на 24 годину після його введення. Тобто час перебування стічних вод у картах БІС становить близько доби. Отже швидкість проходження води в БІС становить близько 20 м/год., що є занадто високим показником для фіторемедіаційних споруд.

Згідно з графіком на рис. 3б флуоресцентний реагент у концентраціях, доступних для виявлення в оглядовому колодязі поза межами БІС, почав проявлятися на п'яту годину після його внесення і був наявний усі 69 год спостереження за змінами його концентрації в картах БІС і в колодязі. Дані наведено у вигляді точок, на рисунку також наведено суцільну лінію емпіричної моделі, що з достатньою достовірністю описує ці зміни. Характер (кут піднесення прямої) лінійної моделі свідчить про суттєвий гідрогеологічний зв'язок між усіма картами БІС і навколишніми ґрунтовими водами.

Тобто ми статистично достовірно можемо стверджувати про незадовільну якість роботи (гідроізоляційного екрану) ложа БІС.

Отримані з використанням розрахункового (генетичного) алгоритму з можливістю самоорганізації [13–21] мережеві моделі (крок 5 м) – карти зміни концентрації флуоресцентного реагенту в часі наведено на рис. 4.

Деяку невідповідність у змінах концентрацій флуоресцентного реагенту до часу перебування можливо пояснити недетермінованістю змін гідравлічних навантажень по спорудах під час їх роботи, обумовлених суттєвими змінами обсягів води, яка надходить на БІС.

Спираючись на данні ДЗЗ (European Space Agency, Planet Labs, Daily Satellite Imagery and Insights), виявлено суттєвий поверхневий стік на спорудах БІС, який виникає під час їх експлуатації. Результати наведено на рис. 5.

Цей факт пояснює значні швидкості проходження води по БІС, тобто за даної швидкості проходження води по спорудах у 20 м/год значна частина стоку йде по поверхні споруди та не відбувається належного очищення води.

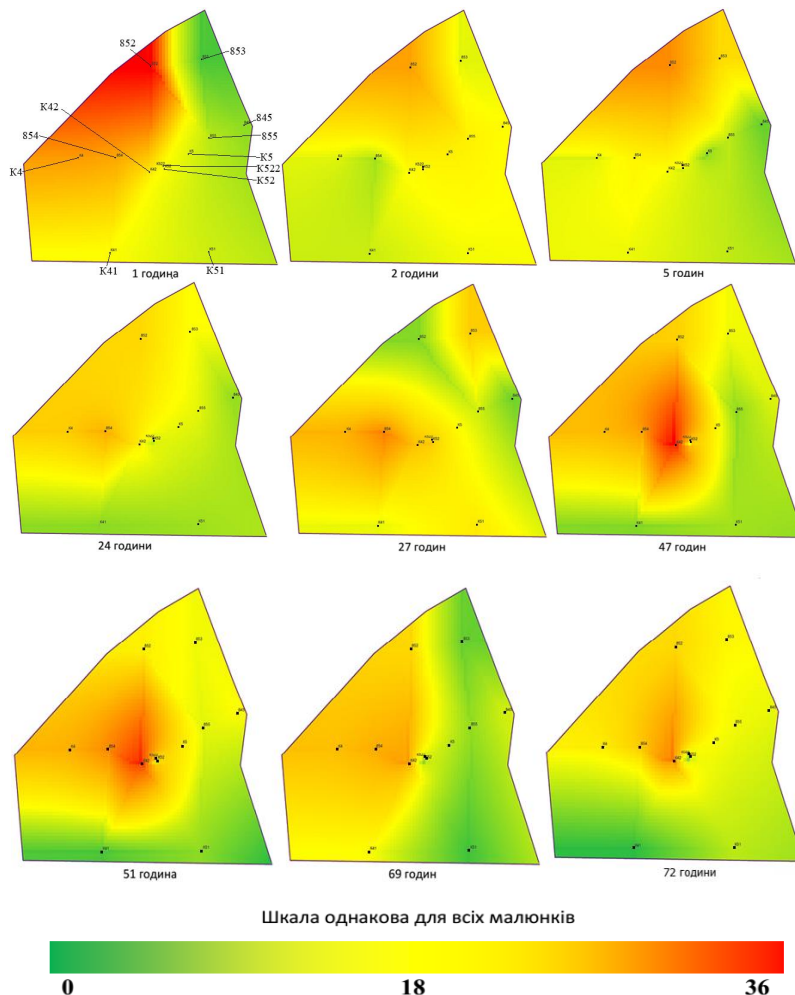


Рис. 4. Карти зміни концентрацій флуоресцентного реагенту в часі

### Висновки.

1. Внесений на вхід БІС флуоресцентний реагент було виявлено через п'ять годин в оглядовому колодязі підземних вод за межами БІС, що свідчить про гідравлічний зв'язок очисних споруд із навколишніми ґрунтовими водами.

Цей зв'язок фіксувався протягом всього терміну досліджень, відповідно він суттєвий і значна частина очищуваних вод потрапляє у ґрунтові води та слугує джерелом їх вторинного забруднення.

2. Швидкість проходження очищеної води картами БІС значно більша за оптимальні швидкості для фітореMediaційних споруд, а отже час перебування очищеної води в спорудах БІС є недостатнім для фітореMediaції рідких стоків.

3. Отримані результати засвідчили погіршення ефективності БІС, які не здатні забезпечити оптимальні значення швидкості та часу перебування води в них, а недостатньо очищена вода призводить до вторинного забруднення ґрунтових вод. Для покращення функціонування БІС слід розробити комплекс заходів, до яких відноситься недопущення потрапляння очищуваних стічних вод у ґрунтові води, оптимізація швидкості проходження води через очисні споруди, а також перероблення/утилізація фітомаси біоценозу БІС. Одним із перспективних напрямів є використання фітомаси не лише з метою фітореMediaції, а й фітоекстракції та як джерела отримання чистих металів (легуючих присадок), що широко досліджується і впроваджується міжнародною науковою спільнотою.

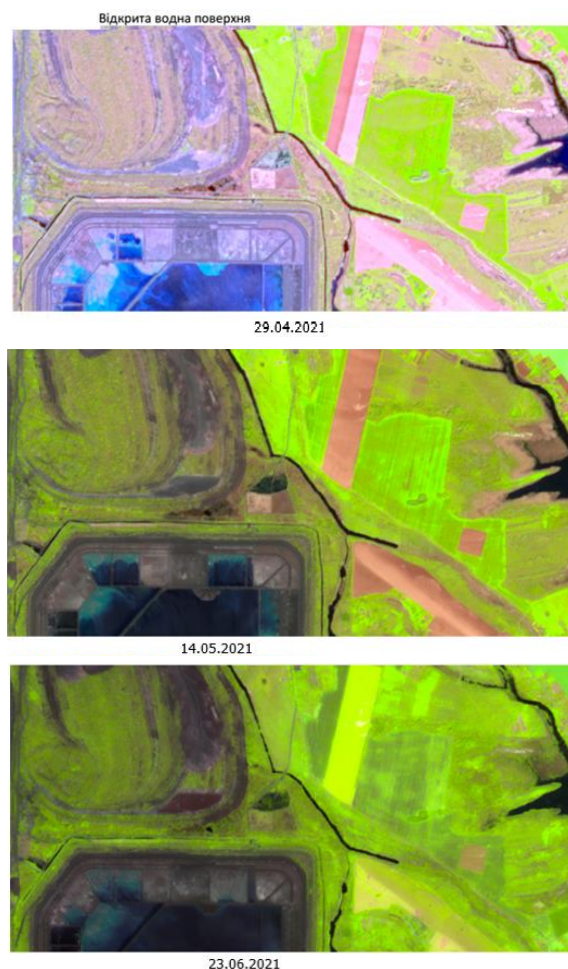


Рис. 5. Поверхневий стік у спорудах БІС, що формується під час їх експлуатації

### Бібліографія

1. Siegrist R.L. Treatment using constructed wetlands. Decentralized Water Reclamation Engineering. Cham : Springer; 2017. 1003 p.
2. Abou-Elela SI. Constructed wetlands: The green technology for municipal wastewater treatment and reuse in agriculture. Negm A, editor. Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt. *The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 75. Cham : Springer; 2017. Pp. 189–239.
3. Thorslund J., et al. Wetlands as large-scale nature-based solutions: Status and challenges for research, engineering and management. *Ecological Engineering*. 2017; 108 (Part B): P. 489–497. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.07.012
4. Christofilopoulos S., et al. Evaluation of a constructed wetland for wastewater treatment: Addressing emerging organic contaminants and antibiotic resistant bacteria. *New Biotechnology*. 2019. Vol. 52 p. 94–103. DOI: 10.1016/j.nbt.2019.05.006
5. Mięsiak-Wójcik K., Turczyński M., Sposób J. Diverse sediment permeability and implications for groundwater exchange in closed Lake-Wetland catchments (West Polesie, East Poland). *Wetlands*. 2018;38:779–792. DOI: 10.1007/s13157-018-1027-4
6. Wang H.X., Xu J.L., Sheng L.X., Liu X.J. A review of research on substrate materials for constructed wetlands. *Materials Science Forum*. 2018. P. 913–929.
7. Donde O.O., Cuicui T., Yingying T., Bangding X. Efficacy of macrophyte dominated wastewater enclosure as post-treatment alternative in domestic wastewater quality polishing for eradication of faecal pathogenic bacteria pollution. *Process Safety and Environment Protection*. 2018;114:192–205. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.023
8. Демьянов В.В. Геостатистика: теория и практика. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. Москва : Наука, 2010. 327 с.

9. Брандт З. Анализ данных статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров / пер. с англ. Москва : Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. 686 с.
10. Stevens James P. Applied multivariate statistics for the social sciences university of Cincinnati. Mahwah, New Jersey London : Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 2002. 709 с.
11. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб. : Наука, 2001. 295 с.
12. Горшков М.В. Экологический мониторинг : учебн. пособие. Владивосток : Изд-во ТГЭУ, 2010. 313 с.
13. Подлазова А.В. Генетические алгоритмы на примерах решения задач раскроя. *Проблемы управления*. 2008. № 2. С. 57–63.
14. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python / пер. с англ. А.А. Слинкина. Москва : ДМК Пресс, 2020. 286 с.
15. Батищев Д.И. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. Нижний Новгород : ННГУ, 2007. 85 с.
16. Королев Л.Н. Эволюционные вычисления, нейросети, генетические алгоритмы, формальные постановки задач. *Фундаментальная и прикладная математика, центр новых информационных технологий МГУ*. 2009. 15, № 3. С. 119–133.
17. Coley D.A. An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers. *World Scientific*, 1999. 240 p.
18. Chen Y., Elliot M., Sakshaug J. Genetic algorithms in matrix representation and its application in synthetic data. URL: [https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.46/2017/2\\_Genetic\\_algorithms.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.46/2017/2_Genetic_algorithms.pdf) (дата звернення 10.05.2022).
19. Ansotegui C., Malitsky Y., Samulowitz H., Sellmann M., Tierney K. Model-based genetic algorithms for algorithm configuration. *Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015)*. P. 733–739.
20. Hassanat A.B. On enhancing genetic algorithms using new crossovers. *Computer Science: Neural and Evolutionary Computing*. 2017. 15 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.02335>. (дата звернення 10.05.2022).
21. Johansson C., Evertsson G. Optimizing genetic algorithms for time critical problems. Master Thesis. Ronneby Sweden : Department of Software Engineering and Computer Science Blekinge Institute of Technology, 2003. 47 p.

### References

1. Siegrist, R.L. (2017) Treatment using constructed wetlands. In: *Decentralized Water Reclamation Engineering*. Cham : Springer.
2. Abou-Elela, S.I. (2017) Constructed wetlands: The green technology for municipal wastewater treatment and reuse in agriculture. In: Negm A, editor. *Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt*. The Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 75.
3. Thorslund J., Jarsjo J, Jaramillo F., Jawitz J.W., Manzoni S., & Basu N.B. (2017) Wetlands as large-scale nature-based solutions: Status and challenges for research, engineering and management. *Ecological Engineering*. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.07.012
4. Christofilopoulos, S., Kaliakatsos, A., Triantafyllou, K., & Gounaki, I. (2019). Evaluation of a constructed wetland for wastewater treatment: Addressing emerging organic contaminants and antibiotic resistant bacteria. *New Biotechnology*, Vol. 52, 94–103. DOI: 10.1016/j.nbt.2019.05.006. (in English).
5. Mięsiak-Wójcik, K., Turczyński, M., & Sposób, J. (2018). Diverse sediment permeability and implications for groundwater exchange in closed Lake-Wetland catchments (West Polesie, East Poland). *Wetlands*, 38, 779–792 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1027-4>
6. Wang H.X., Xu J.L., Sheng L.X., Liu X.J. (2018). A review of research on substrate materials for constructed wetlands. *Materials Science Forum*. Vol. 913, 917–929. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.913.917>
7. Donde, O.O., Cuicui, T., Yingying, T., & Bangding, X. (2018). Efficacy of macrophyte dominated wastewater enclosure as post-treatment alternative in domestic wastewater quality polishing for eradication of faecal pathogenic bacteria pollution. *Process Safety and Environment Protection*, Vol. 114, 192–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.023>
8. Demyanov, V. V. (2010) *Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice*. Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Power Engineering]. In-t problem bezopasnogo razvitiya atomnoy energetiki RAN. Moskva : Nauka. [in Russian].



9. Brandt, Z. (2003) Analiz dannykh statisticheskiye i vychislitel'nyye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Analysis of data, statistical and computational methods for scientists and engineers.] Moskva: Mir, OOO Izdatel'stvo AST. [in Russian].
10. Stevens, J. P. (2002). Applied multivariate statistics for the social sciences university of cincinnati. Mahwah, New Jersey, London : Lawrence erlbaum associates, publishers.
11. Badzinckiy, R.N. (2001). Spavochnik no vepoyatnostnym paspredeleniyam. [Handbook of Probability Distributions.]. SPb : Nauka. [in Russian].
12. Gorshkov, M.V. Ekologicheskyy monitoring. ucheb. posobiye. [Ecological monitoring. Study guide]. Vladivostok: Izd-vo TGEU. [in Russian].
13. Podlazova, A. V. (2008). Geneticheskiye algoritmy na primerakh resheniya zadach raskroya [Genetic algorithms on examples of solving problems of cutting]. Problemy upravleniya, 2, 57–62 [in Russian].
14. Virsanski, E. (2020). Geneticheskiye algoritmy v python [Genetic algorithms in python]. Moskva: DMK Press [in Russian].
15. Batishchev, D. I. (2007). Primeneniye geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach diskretnoy optimizatsii. [Application of genetic algorithms to discrete optimization problems]. Nizhniy Novgorod : NNGU [in Russian].
16. Korolev, L.N. (2009). Evolyutsionnyye vychisleniya, neyroseti, geneticheskiye algoritmy formalnyye postanovki zadach. [Evolutionary calculations, neural networks, genetic algorithms, formal problem statements.]. Fundamentalnaya i prikladnaya matematika, tsentr novykh informatsionnykh tekhnologiy MGU, Vol. 15, 3, 119–133 [in Russian].
17. Coley, D. A. (1999). An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers. World Scientific. (in English) [in Russian].
18. Chen, Y., Elliot, M., & Sakshaug, J. (2017). Genetic algorithms in matrix representation and its application in synthetic data. URL: [https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.46/2017/2\\_Genetic\\_algorithms.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.46/2017/2_Genetic_algorithms.pdf)
19. Ansotegui, C., Malitsky, Y., Samulowitz, H., Sellmann, M., & Tierney, K. (2015). Model-based genetic algorithms for algorithm configuration. Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015).
20. Hassanat, A., & Alkafaween, E. (2017). On Enhancing Genetic Algorithms Using New Crossovers. International Journal of Computer Applications in Technology, 55. DOI: 10.1504/IJCAT.2017.10005868
21. Johansson C., & Evertsson G. (2003). Optimizing genetic algorithms for time critical problems. Master Thesis. Ronneby Sweden: Department of Software Engineering and Computer Science Blekinge Institute of Technology. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:832349/FULLTEXT01.pdf>

**D.V. Charny, Ye.M. Matselyuk, S.A. Shevchuk, Yu.A. Onanko, V.D. Levitska, S.V. Marysyk**  
**Study of the environmental impact of existing bioengineering structures for treatment**  
**of clarified water of the tailing ponds by the case of treatment structures PJSC**  
**“Poltava ore mining and processing plant”**

***Abstract.** To determine the possible impact of bioengineering structures (BIS) on the environment, a field experiment was performed to specify the current hydrodynamic characteristics of BIS and test the waterproofing properties of the protective layer of the BIS bed of PJSC «Poltava Ore Mining and Processing Plant». The methods of remote sensing of the Earth were used, as well as mapping the distribution of the model solution, which simulates the pollution in the BIS area during treatment. It was established that the time of water treatment at BIS is about one day. Thus, the speed of treated water passage through BIS (filtration rate) is about 20 m/hour, which does not allow treating wastewater properly. Mapping the distribution of the model solution revealed significant changes in its local concentrations, so, the changes in the volume of source water entering the BIS significantly affect the spread of contaminants. It was established that the speed of wastewater passage by the BIS maps is much higher than the optimal speeds for phytoremediation facilities. That is, there is significant overloading of some parts of BIS surfaces and underloading of others.*

*Also, a significant hydraulic connection of BIS with groundwater was statistically significantly revealed; it was experimentally confirmed that the protective waterproofing screen was damaged, and there is a pollution of the surrounding groundwater in the process of BIS operation. Research results have shown that BIS is hydraulically bound to the surrounding groundwater and serves as a source of secondary pollution. Therefore, there is a need to develop a set of measures to improve the efficiency of the BIS. One of the promising areas of research is the use of aquatic vegetation and aquatic organisms not only for phytoremediation but also for phytoextraction and as a source of pure metals (alloying additives).*

**Key words:** water, sewage, bioengineering structure (BIS), phytoremediation, waterproofing screen.

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-325>

Available at (PDF): <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/325>

УДК 631:15 631.52

## РЕКОНСТРУКЦІЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ МІЖГОСПОДАРСЬКИХ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ – ОСНОВА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОПОДАЧІ НА ЗРОШЕННЯ

М.І. Ромащенко<sup>1</sup>, докт. техн. наук, М.В. Яцюк<sup>2</sup>, канд. геогр. наук, Р.В. Сайдак<sup>3</sup>, канд. с.-г. наук, Д.Я. Строкон<sup>4</sup>, Т.В. Матяш<sup>5</sup>, канд. техн. наук, В.М. Попов<sup>6</sup>, докт. техн. наук, І.В. Войтович<sup>7</sup>, канд. техн. наук, В.В. Книш<sup>8</sup>

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

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-5535-715X>; e-mail: [mv\\_yatsiuk@ukr.net](mailto:mv_yatsiuk@ukr.net)

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-0213-0496>; e-mail: [saidak\\_r@ukr.net](mailto:saidak_r@ukr.net)

<sup>4</sup> Експерт ЄБРР, e-mail: [dmitry.strokon@gmail.com](mailto:dmitry.strokon@gmail.com)

<sup>5</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-1225-086X>; e-mail: [t.v.matiash@gmail.com](mailto:t.v.matiash@gmail.com)

<sup>6</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-2024-0290>; e-mail: [v\\_poropov15@ukr.net](mailto:v_poropov15@ukr.net)

<sup>7</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ;  
<https://orcid.org/0000-0002-1543-3955>; [ivan.v.voytovich@gmail.com](mailto:ivan.v.voytovich@gmail.com)

<sup>8</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-3220-9883>; e-mail: [iwpim27@gmail.com](mailto:iwpim27@gmail.com)

**Анотація.** В роботі наведено результати аналізу сучасного стану, встановлені основні проблеми та напрями розвитку зрошення в Україні, проведено комплексний аналіз технічного стану та наявного потенціалу використання меліоративної інфраструктури, зокрема міжгосподарської інженерної інфраструктури зрошувальних мереж на пілотному об'єкті Нижньо-Дністровської зрошувальній системі (НДЗС). Встановлено, що обладнання насосних станцій НДЗС давно амортизовано і перебуває в дуже поганому технічному стані, втрати води при транспортуванні становлять 32–35% від первинного водозабору, інженерна інфраструктура практично вичерпала свій ресурс і за технічним станом та параметрами не відповідає необхідному рівню. Визначено середні питомі витрати електроенергії на перекачку води, встановлено, що експлуатація застарілого обладнання здійснюється в умовах жорсткого дефіциту бюджетного фінансування, практично повністю відсутні фінансові можливості для здійснення поточних і капітальних ремонтів обладнання і споруд. Визначена собівартість транспортування води на зрошення за м<sup>3</sup>, проведені розрахунки вартості 1 м<sup>3</sup> води для водокористувачів. Досліджено джерела формування фінансового забезпечення експлуатації НДЗС, встановлено, що система відшкодування вартості послуг не покриває витрати на подачу води на зрошення. За результатами проведеного техніко-економічного аналізу та енергетичного аудиту розраховано загальну потребу інвестицій на проєкт із модернізації та реконструкції НДЗС. Наведено основні результати реалізації проєкту, які дозволять збільшити обсяг валової сільськогосподарської продукції на 1,6–1,8 млрд грн/рік.

**Ключові слова:** зрошення, аудит, технічний стан, енергоефективність, модернізація, реконструкція, інвестиції.

**Актуальність.** Зважаючи на глобальні та регіональні кліматичні зміни [1–7], які супроводжуються погіршенням вологозабезпечення території України, головним заходом з активної адаптації землеробства до цих змін є створення можливостей для більш повного використання потенціалу наявної меліоративної інфраструктури, зокрема систем зрошення [8–12].

За даними інвентаризації меліоративних систем станом на 01.01.2017 р. в Україні обліковувалось 2178,3 тис. га зрошуваних земель із відповідною інфраструктурою (водосховища, магістральні та розподільні канали, захисні дамби, насосні станції, інші гідротехнічні споруди і об'єкти тощо) [11–13].

Наявна зрошувальна інфраструктура поділяється на міжгосподарську та внутрішньогос-

подарську. Перша і де-юре і де-факто перебуває у державній власності, знаходиться на балансі та експлуатується Держводагентством України. Незважаючи на те, що вся міжгосподарська зрошувальна інфраструктура побудована ще за радянських часів, вона здебільшого (понад 80%) перебуває у працездатному стані, хоча в технічному плані є застарілою, енергонеефективною і потребує реконструкції та модернізації. На жаль, наявний потенціал міжгосподарської зрошувальної інфраструктури використовується вкрай незадовільно. Так, за потенційної можливості забезпечити подачу води для поливу не менше 1,5–1,8 млн га, фактично міжгосподарською мережею здійснюється подача води на площу не більше 550 тис. га.

Експлуатація міжгосподарських мереж здійснюється в умовах хронічного недофінансування за практично повної, починаючи з 1990 р., відсутності робіт із реконструкції та модернізації. Тому в багатьох випадках, особливо на зрошувальних системах, що побудовані в 60–70-ті роки минулого століття (Інгулецька, Нижньо-Дністровська та інші), технічний стан міжгосподарської інженерної інфраструктури є критичним із загрозою повної руйнації, а подальше відкладання робіт з її реконструкції та модернізації створює загрози втрати можливості відновити зрошення на таких системах.

**Аналіз останніх досліджень.** Нарощування до 2030 р. площ зрошення і дренажу на 2–2,2 млн га та відновлення ефективного використання меліорованих земель на загальній площі понад 3,0 млн га передбачає прийнята КМ України у 2019 р. «Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» [13]. Досягнення таких амбітних цілей передбачається шляхом виконання «Плану заходів із реалізації Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року», що також схвалений КМ України [14]. Серед цих заходів важлива роль відводиться модернізації міжгосподарських мереж шляхом формування та реалізації інвестиційних проєктів. Методологію та механізми цього процесу передбачено опрацювати на прикладі пілотних проєктів. Першим досвідом обґрунтування такого проєкту стали роботи з підготовки проєктної пропозиції для НДЗС, однієї з найстаріших зрошувальних систем України, виконані авторами статті у 2017–2021 роках за ініціативи та фінансової підтримки ЄБРР відповідно до вимог постанови КМ України від 26 січня 2016 року № 70 «Про порядок підготовки, реалізації, проведення моніторингу та завершення реалізації проєктів економічного і соціального розвитку України, що підтримуються міжнародними фінансовими організаціями».

Основною метою реалізації проєктів із модернізації зрошувальних систем визначено підвищення ефективності використання води і електроенергії шляхом заміни насосно-силового обладнання на головних насосних станціях, станціях підкачки та дренажних станціях [15–17], здійснення протифільтраційних заходів на мережах транспортування води [18], оснащення міжгосподарських мереж сучасними засобами обліку води, автоматизації процесів водоподачі, водорозподілу та водовідведення [19–22] тощо.

**Матеріали та методи.** Дослідження проведено на основі даних технічних і фінансових звітів Держводагентства України, інвентаризації, технічного, енергетичного та фінансово-економічного аудиту роботи НДЗС з використанням методик і рекомендацій з оцінювання її технічного стану каналів меліоративних систем, енергоаудиту на об'єктах водогосподарських систем, функціонування зрошувальних систем за техніко-технологічними та економічними показниками, норм витрат електроенергії та палива на подачу води для зрошення, оцінювання технічного стану насосних агрегатів за рівнями вібрації та показниками енергоефективності [15–17; 23–25].

**Результати.** НДЗС розташована на лівому березі Дністровського лиману в Одеському районі Одеської області, експлуатується близько 50 років. Площа, яку охоплювала НДЗС після введення в експлуатацію, становила 37,6 тис. га. В 1996 р. фізична площа поливу становила 29,3 тис. га (максимальна, яка зафіксована за час експлуатації). В період з 1999 по 2020 рік відбувалося скорочення площ поливу – з 24,2 тис. га (1999 р.) до 9,5 тис. га (2020 р.). Водозабір на НДЗС здійснюється з річки Дністер по підвідному каналу довжиною 800 м і шириною 45 м. Від головної насосної станції (далі ГНС) вода двома нитками напірного трубопроводу довжиною 4,2 км та діаметром 1,8 м кожна подається на висоту 102 м у 2 розподільчі басейни. Загальна схема НДЗС наведена на **рисунку 1**.

Далі, згідно з проєктом, через розгалужену систему міжгосподарських каналів, трубопроводів, водосховищ і три насосні станції (далі НС) перекачки (рис. 1), вода повинна подаватись на 29 НС підкачки. Загальна довжина зрошувальної мережі становить 753 км, з них 558 км (79%) – це закрыта мережа, а 195 км – відкрита.

Як засвідчили результати технічного та енергетичного аудиту, наразі обладнання насосних станцій на НДЗС давно амортизовано і перебуває в дуже поганому технічному стані, із 29 НС підкачки діють лише 14, 3 – справні, але

не діють, 8 – підлягають капітальному ремонту або списанню, 4 – втрачені у 2001–2003 роках. Втрати води при транспортуванні становлять 32–35% від первинного водозабору.

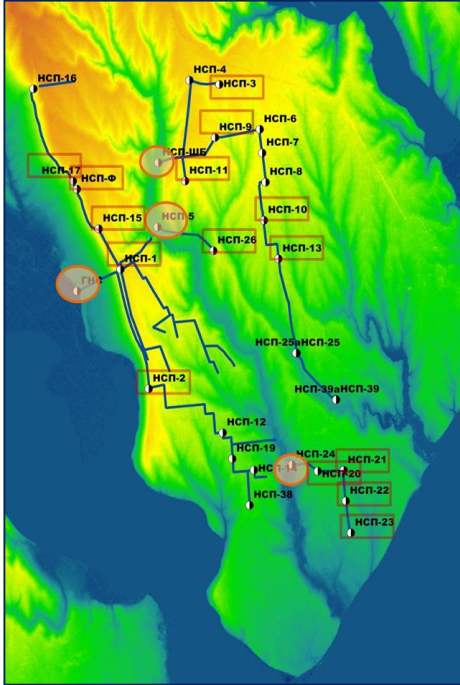


Рис. 1. Загальна схема та вигляд НДЗС

Господарська діяльність НДЗС в сучасних умовах зводиться до подачі води на зрошення та інші потреби шляхом експлуатації наявної, побудованої ще в 70-х роках минулого століття інженерної інфраструктури, яка вже практично вичерпала свій ресурс і за своїм технічним станом та параметрами є такою, що значно поступається сучасному рівню (рис. 2). Найбільш критичним на системі є ресурс ГНС та напірного трубопроводу, через зупинку яких постійно існує загроза виходу з ладу всієї НДЗС.

Основний режим роботи системи, передбачений проектом – безперервний, цілодобовий з роботою насосних агрегатів в сталому режимі. З 2012 р., враховуючи неповне завантаження та з метою економії платежів за електричну енергію, водоподача на системі здійснювалася щодоби протягом 7 нічних годин, що призвело до прискореного зносу насосного обладнання, і, як наслідок, виникнення аварійних ситуацій та зупинок на поточні ремонти на НДЗС за останні роки стали досить частим явищем.

Із загального водозабору 38,36 млн м<sup>3</sup> на зрошення у 2020 р. було подано 25,82 млн м<sup>3</sup>, тобто втрати та технічні витрати води разом склали 32,7%. Сучасні ультразвукові витратомірні комплекси на системі встановлено лише на восьми НС, на решті НС пристрої водообліку відсутні, і використовується так званий «непрямий водооблік», тобто адекватна система обліку води та диспетчерського управління на системі відсутня.

Середні питомі витрати електричної енергії на одну перекачку води у НДЗС в розрахунку на 1000 м<sup>3</sup> об'єму перекачаної води за звітними даними становили 351 кВт год.

Експлуатація застарілого обладнання здійснюється в умовах жорсткого дефіциту бюджетного фінансування (бюджетні кошти виділяються лише на заробітну плату обслуговуючого персоналу та частково оплату електроенергії) за практично повної відсутності фінансових можливостей для здійснення поточних і капітальних ремонтів обладнання і споруд.

Фінансове забезпечення експлуатації НДЗС у 2020 р. формувалось на 66% з державного бюджету і на 34% за рахунок надходжень від водокористувачів (максимальний рівень за останні 10 років). Цей рівень фінансування забезпечує лише покриття мінімальної по галузі оплати праці і не дає можливості фінансувати



Рис. 2. Стан та загальний вигляд окремих ділянок НДЗС

капітальні видатки та розвиток зрошення. Така ситуація виникла у зв'язку з тим, що існуюча система відшкодування вартості послуг не забезпечує повного покриття витрат на подачу води на зрошення і не містить інвестиційної складової, а також через малу площу фактичного поливу.

**Отже, результати виконаних аудитів, дали можливість до основних проблем діяльності НДЗС віднести такі:**

- **Відсутність системи автоматизованого обліку води та процесу водорозподілу** – не дозволяє забезпечити контроль та повний облік, а також оцінити об'єм та причини втрат води.

- **Відпрацьований ресурс насосно-силового обладнання** – не може забезпечити подачу води на проектну площу поливу, а також гарантувати безперебійну подачу води на полив через аварійні зупинки обладнання, 17,5 тис. га не мають доступу до води через несправність 15 НС.

- **Незадовільний технічний стан мереж транспортування та водорозподілу** – значна кількість поривів напірних трубопроводів, частішають аварії на гідротехнічних спорудах, значні втрати води від фільтрації та випаровування. Загалом, високий рівень втрат води на відкритих каналах є однією з ключових складових енергозатратності системи водоподачі.

- **Незадовільний стан електромереж та невідповідний клас (переважно другий) енергоспоживання** – значні втрати електроенергії у розподільчих мережах та високі тарифи на електроенергію.

За результатами досліджень обґрунтовано основні складові та напрями реконструкції та модернізації і за допомогою фінансового моделювання визначено загальну потребу інвестицій на проект із модернізації та реконструкції НДЗС (з ПДВ) у сумі близько 94 млн Євро.

Очікується, що основними результатами реалізації проекту будуть:

- відновлення, повна реконструкція та модернізація 29 НС (включно з ГНС) із заміною старих енерго-неефективних насосних агрегатів на сучасні з регульованим приводом, що забезпечить відповідне підвищення їх енергоефективності;

- проведення протифільтраційних робіт на відкритих каналах, зокрема і шляхом улаштування у руслі каналів безнапірних закритих водоводів, що

дозволить значно зменшити непродуктивні втрати води в процесі її транспортування;

- впровадження сучасних систем автоматизованого обліку електричної енергії та води і автоматизованої диспетчеризації водорозподілу.

Реалізація цього проекту протягом шести років дасть можливість забезпечити водоподачу на площу зрошення 39 тис. га з первинним річним водозабором 85 млн м<sup>3</sup> і подачею води в точки водовиділу 79 млн м<sup>3</sup>, тобто за рівня втрат і витрат води в системі близько 6% (проти 30–35% в сучасних умовах), рис. 3.

Такий обсяг водоподачі дозволить формувати режими зрошення вирощуваних сільськогосподарських культур, підтримання яких дозволить отримувати врожаї, близькі до потенційно можливих. За умови досягнення врожайності на рівні 6,5–7,0 т/га озимої пшениці, 12–14 т/га кукурудзи, 3,5–4,0 т/га сої, та 70–90 т/га овочів, буде можливо збільшити обсяг валової продукції на 1,6–1,8 млрд грн на рік порівняно з існуючим.

Завдяки впровадженню комплексу заходів із реконструкції НДЗС відповідно проекту, у визначений для кожної НС рік забезпечується заміна насосно-силового обладнання на

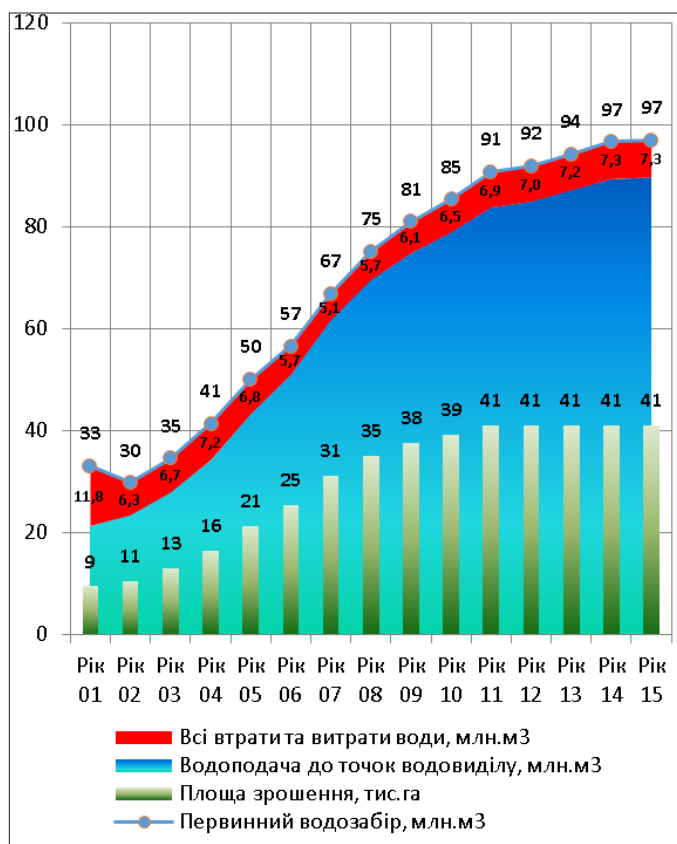


Рис. 3. Технічні показники роботи НДЗС за умов повної модернізації та реконструкції

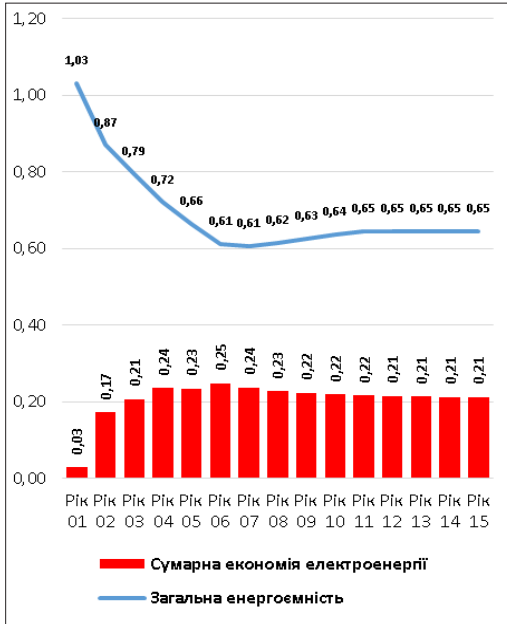


Рис. 4. Показники енергетичної ефективності роботи НДЗС, кВт·год/м<sup>3</sup> (у ТВВ), за умов повної модернізації та реконструкції

сучасне та, відповідно, більш енергоефективне. При цьому ККД насосів підвищується до 0,93, а електродвигунів – до 0,98. Це забезпечить поступове зниження рівня питомого енергоспоживання НС та системи в цілому.

Показник питомої енергоемності 1 м<sup>3</sup> води, що її водокористувачі відбирають на полив із точок водовиділу (ТВВ), є одним із комплексних критеріїв оцінки рівня енергетичної ефективності роботи зрошувальної системи. Станом на 2020 р. частка витрат на оплату спожитої електричної енергії в собівартості

поданої на зрошення води становила близько 60%. За умови заміни насосно-силового обладнання та повної модернізації системи забору та транспортування води до НС підкачки повна питома енергоемність подачі води у ТВВ зменшується від 1,03 кВт·год/м<sup>3</sup> до 0,65 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 37%. При цьому сумарна економія електроенергії становитиме від 0,03 до 0,21–0,25 кВт·год/м<sup>3</sup>, рис. 4. Динаміку прогнозованих змін компонентів питомої енергоемності води у ТВВ за різних заходів із реконструкції та модернізації наведено на рисунку 5.

**Висновки.** Отже, за сучасної структури посівів перехід на переважне застосування для проведення поливів низьконапірних із низькою інтенсивністю дощу сучасних широкозахватних машин фронтальної та колової дії та різних різновидів краплинного зрошення, включаючи підґрундове з імпульсним режимом водоподачі за одночасного застосування інформаційних, інформаційно-аналітичних та інформаційно-дорадчих систем управління зрошенням, відновлення зрошення по всій зоні обслуговування НДЗС із застосуванням новітніх технологій та способів зрошення дозволить збільшити обсяг валової сільськогосподарської продукції на 1,6–1,8 млрд грн/рік.

З іншого боку, економічну вигоду від розширення поливів на повну проектну потужність НДЗС (близько 40 тис. га) потрібно розглядати не тільки в аспекті можливого збільшення обсягів виробництва сільськогосподарської продукції, але і в створенні додаткових передумов для розвитку галузей переробки продукції і, відповідно, створення додаткових робочих місць саме на підприємствах переробної галузі.

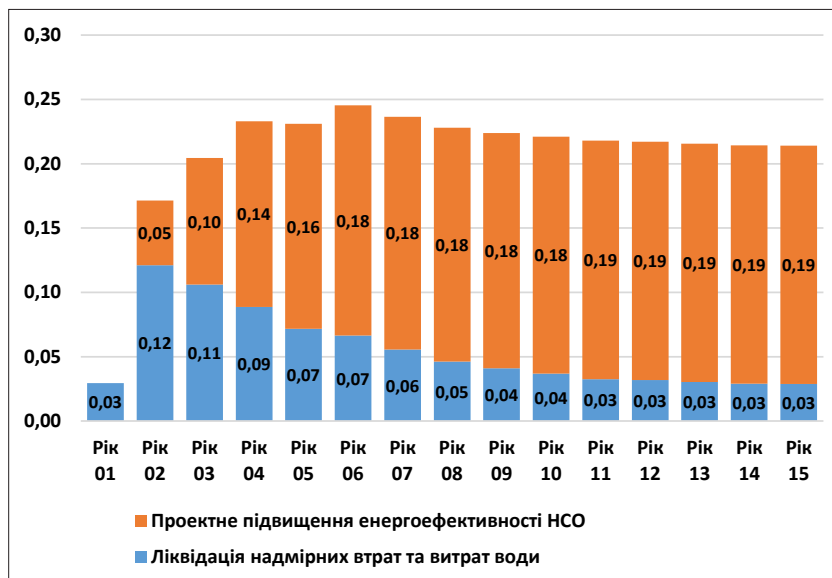


Рис. 5. Динаміка складових змін питомої енергоемності води у ТВВ

Оскільки в зоні обслуговування НДЗС єдиним природним джерелом води є річка Дністер, повна зупинка роботи системи призведе до супутніх екологічних і соціальних проблем, а саме – поступового заболочування двох водосховищ: Барабойського, на березі якого розташоване місто Теплодар (10 тис. насе-

лення), та Санжейського, на березі якого розташоване смт. Барабой (1,5 тис. населення).

Затягування реалізації проєкту реконструкції і модернізації НДЗС спричинить подальше прогресуюче скорочення площ поливу, а в перспективі і повне припинення зрошення в регіоні.

### Бібліографія

1. Cook, J., et al. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, Vol. 11, 4. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/048002
2. Anderegg, W. R., Prall, J. W., Harold, J., & Schneider, S. H. (2010). Expert credibility in climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107 (27), 12107–12109. DOI: 10.1073/pnas.1003187107
3. WMO. (2020). WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2019-concludes-decade-of-exceptional-global-heat-and-high-impact-weather> (дата звернення 19.05.2022).
4. NASA. (2020). Global Temperature. URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature> (дата звернення 19.05.2022).
5. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / М.І. Ромащенко та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2020. Вип. 1. С. 5–22. DOI: 10.31073/mivg202001-235
6. Тарарік Ю. О., Сайдак Р.В., Сорока Ю.В. Підсумки та перспективи досліджень з оцінки та раціонального використання агроресурсного потенціалу сільськогосподарських територій. *Меліорація і водне господарство*. 2019. Вип. 2. С. 186–198. DOI: 10.31073/mivg201902-194
7. Romashchenko M.I., Saydak R.V., Matyash T.V. Development of irrigation and drainage as the basis of sustainable agriculture in Ukraine in climate change. *Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction* : IX International scientific and technical conference, 22–27 July. Georgia. P. 243–250.
8. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь. / С.П. Іванюта, та ін. Київ : НІСД, 2020. 110 с. URL: [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5\\_sait.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf) (дата звернення 17.05.2022)
9. Сталій розвиток меліорації земель в Україні в умовах змін клімату / Ромащенко М.І. та ін. *Аграрні інновації*. 2020. № 3. С. 56–64. DOI:10.32848/agrar.innov.2020.3.10
10. Вожегова Р.А., Коковіхін С.В. Зрошуване землеробство – гарант продовольчої безпеки України в умовах змін клімату. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 11 (788). С. 28–34. DOI: 10.31073/agroviznyk201811-04
11. Romashchenko, M., Saidak, R., Matyash, T., & Yatsiuk, M. (2021). Irrigation efficiency depending on water cost. *Land Reclamation and Water Management*, (2), 150–159. DOI: 10.31073/mivg202102-308
12. Наукові засади розвитку аграрного сектора економіки південного регіону України / за наук. ред: Ромащенко М.І., Вожегової Р.А., Шатковського А.П. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. 438 с.
13. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року : Стратегія від 14 серп. 2019 року № 688-р. *Урядовий кур'єр*. 2019. № 170. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80#Text>
14. План заходів з реалізації Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року : Розпорядження КМ України від 21.10.2020 р. № 1567-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1567-2020-p#Text>
15. Чернишевська Л.Ю., Ігнатова О.С., Шевчук Я.В. Методологічне оцінювання технічного стану каналів меліоративних систем. *Меліорація і водне господарство*. 2010. Вип. 98. С. 243–251. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mivg\\_2010\\_98\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mivg_2010_98_27) (дата звернення 17.05.2022).
16. Методика проведення енергоаудиту на об'єктах водогосподарських систем: НД 33-6.2-01-2006. Київ : Держводгосп України, 2006. 46 с. (Нормативний документ).
17. Дехтяр О.О., Брюзгіна Н.Д., Антонюк А.В. Аналіз функціонування зрошувальних систем за техніко-технологічними та економічними показниками. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 3 (792) С. 50–56. DOI: 10.31073/agroviznyk201903-08

18. Коваленко О.В. Технологічні напрями підвищення експлуатаційної надійності та довговічності гідротехнічних споруд при їх ремонті та реконструкції. *Меліорація і водне господарство: міжвід. темат. наук. зб.* 2014. Вип. 101. С. 332–340.
19. Герасимов Г.Г. Проектування автоматизованих насосних станцій підкачки : навчальний посібник – довідник. Рівне : НУВГП, 2007. 552 с.
20. Зацерковний В.І., Плічко Л.В.. Аналіз системи управління водогосподарським комплексом України та пошук шляхів щодо її вдосконалення. *Наукоємні технології.* 2017. № 4(36). С. 358–367.
21. Коваленко П.І., Попов В.М. Управління водорозподільними системами за принципами ресурсо- та енергозаощадженнями. Київ : Аграрна наука, 2011. 368 с.
22. José M. Tarjuelo, Juan A. Rodriguez-Diaz, Ricardo Abadía, Emilio Camacho, Carmen Rocamora, Miguel A. Moreno. (2015) Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agricultural Water Management*, Volume 162, December 2015, Pages 67–77. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.08.009
23. Методика визначення норм витрат електроенергії та палива на подачу води для зрошення: Київ : Мін. АПК, 2008. 25 с.
24. Нормування питомих витрат електроенергії та палива на перекачування води насосними станціями : методичні вказівки: ВНД 33-3.1-08-2004. Затв. наказом Держводгоспу України від 12.01.2004 р. № 3 Київ, 2004. 30 с.
25. Попов В.М., Шліхта В.В. Методика оцінювання технічного стану насосних агрегатів за рівнями вібрації та показниками енергоефективності. *Вісник аграрної науки.* 2018. № 7 (784) С. 52–58. DOI: 10.31073/agrovisnyk201903-08

#### References

1. Cook, J., et al, (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, Vol. 11, 4. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/048002 [Text engl].
2. Anderegg, W. R., Prall, J. W., Harold, J., & Schneider, S. H. (2010). Expert credibility in climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107 (27), 12107–12109. [Text engl]. DOI: 10.1073/pnas.1003187107
3. WMO. (2020). WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2019-concludes-decade-of-exceptional-global-heat-and-high-impact-weather>
4. NASA. (2020). Global Temperature. URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>
5. Romashchenko, M.I., Husyev, Y.V., Shatkovskiy, A.P., Saidak, R.V., Yatsyuk, M.V., Shevchenko, A.M., & Matiash, T.V. (2020). Impact of climate change on water resources and agricultural production. *Land Reclamation and Water Management*, (1), 5–22. DOI: 10.31073/mivg201902-194 [in Ukrainian].
6. Tarariko Y. O., Saidak, R.V., Soroka Y.V. (2019). Pidsumky ta perspektyvy doslidzhen z otsinky ta ratsionalnoho vykorystannia ahroresursnoho potentsialu silskohospodarskykh terytorii. *Land Reclamation and Water Management*, 2, 186–198. DOI: /10.31073/mivg201902-194. [in Ukrainian].
7. Romashchenko M.I., Saydak R.V., Matyash T.V. Development of irrigation and drainage as the basis of sustainable agriculture in Ukraine in climate change. IX International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction», 22–27 July. Georgia, 243–250 [Text engl].
8. Ivaniuta, S.P., Kolomiets, O. O., Malynovska, O. A., & Yakushenko L.M. (2020). Zmina klimatu: naslidky ta zakhody adaptatsii: analit. dopovid. [Climate changes: consequences and adaptation: analytic report]. Retrieved from: [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5\\_sait.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf) [in Ukrainian].
9. Romashchenko, M.I., Baliuk, S.A., Verhunov, V.A., Vozhehova, R.A., Zhovtonoh, O.I., Rokochynskiy, A.M. Tarariko, Yu.O. & Truskavetskyi, R.S. (2020). Stalyi rozvytok melioratsii zemel v Ukraini v umovakh zmin klimatu *Agrarian innovations*, 3, 56–64 DOI:10.32848/agrar.innov.2020.3.10 [in Ukrainian].
10. Vozhehova, R.A., & Kokovikhin, S.V. (2018) Zroshuvane zemlerobstvo – harant prodovolchoi bezpeky Ukrainy v umovakh zmin klimatu. *Bulletin of Agricultural Science*, 11(788), 28–34. DOI: 10.31073/agrovisnyk201811-04 [in Ukrainian].
11. Romashchenko, M., Saidak, R., Matyash, T., & Yatsiuk, M. (2021). Irrigation efficiency depending on water cost. *Land Reclamation and Water Management*, 2, 150–159. DOI: 10.31073/mivg202102-308 [in Ukrainian].



12. Romashchenko, M.I., Vozhehova, R.A., & Shatkovskiy, A.P. (2017). Naukovi zasady rozvytku aharnoho sektora ekonomiky pivdennoho rehionu Ukrainy [Scientific principles of development of the agrarian sector of the economy of the southern region of Ukraine]. Kherson : Oldi-Plyus [in Ukrainian].
13. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030]: Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy № 688-p. (2019, August 14). Uriadovyi kurier, 170. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> [In Ukrainian].
14. Plan zakhodiv z realizatsii Stratehii zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku (rozporiadzhennia KM Ukrainy vid 21.10.2020 r. № 1567-r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1567-2020-p#Text> [In Ukrainian].
15. Chernyshevska, L. Iu., Ihnatova, O.S., & Shevchuk Ya.V. (2010) Metodolohichne otsiniuvannia tekhnichnoho stanu kanaliv melioratyvnykh system [Methodological assessment of the technical condition of the channels of reclamation systems]. Land Reclamation and Water Management, 98, 243–251. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mivg\\_2010\\_98\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mivg_2010_98_27) [in Ukrainian].
16. Normative document 33–6.2–01–2006. (2006). Metodyka provedennia enerhoaudytu na ob'ekтах vodohospodarskykh system. Derzhvodhosp Ukrainy. Kyiv.
17. Dekhtiar, O.O., Briuzghina, N.D., & Antoniuk, A.V. (2019) Analiz funktsionuvannia zroshuvalnykh system za tekhniko-tekhnolohichnymy ta ekonomichnymy pokaznykamy [Analysis of the functioning of irrigation systems by technical, technological and economic indicators]. Bulletin of Agricultural Science, 3(792), 50–56. DOI: 10.31073/agrovisnyk201903–08 [in Ukrainian].
18. Kovalenko, O.V. (2014). Tekhnolohichni napriamy pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti ta dovhovichnosti hidrotekhnichnykh sporud pry yikh remonti ta rekonstruktsii. [Technological directions of increase of operational reliability and durability of hydraulic engineering constructions at their repair and reconstruction]. Land Reclamation and Water Management, 101, 332–340 [In Ukrainian].
19. Herasymov, H.H. (2007). Proektuvannia avtomatyzovanykh nasosnykh stantsii pidkachky: Navchalnyi posibnyk – dovidnyk. [Design of automated pumping stations: Tutorial – handbook]. Rivne : NUVHP [in Ukrainian].
20. Zatserkovnyi, V.I., & Plichko, L.V. (2017). Analiz systemy upravlinnia vodohospodarskym kompleksom Ukrainy ta poshuk shliakhiv shchodo yii vdoskonalennia. [Analysis of the management system of the water management complex of Ukraine and search for ways to improve it]. Science-intensive technologies, 4(36), 358–367. [in Ukrainian].
21. Kovalenko, P.I., & Popov, V.M. (2011). Upravlinnia vodorozpodilnym y systemamy za pryntsypamy resurso- ta enerhozaoshchadzhenniamy [Management of water distribution systems according to the principles of resource and energy savings]. Kyiv : Aharna nauka. [in Ukrainian].
22. M. Tarjuelo, J, Rodriguez-Diaz, J. A., Abadía, R., Camacho, E., Rocamora, C., & Moreno, M.A.. (2015). Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. Agricultural Water Management, Volume 162, 67–77. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.08.009
23. Metodyka vyznachennia norm vytrat elektroenerhii ta palyva na podachu vody dlia zroshennia. [Methodology for determining the norms of electricity and fuel consumption for water supply for irrigation]. Min. APK. (2008). Kyiv.
24. VND33-3.1-08-2004. (2004). Normuvannia pytomykh vytrat elektroenerhii ta palyva na perekachuvannia vody nasosnymy stantsiiamy. Metodychni vkazivky. Zatv. nakazom Derzhvodhospu Ukrainy vid 12.01.2004 r. № 3. Kyiv.
25. Popov, V.M., & Shlikhta, V.V. (2018). Metodyka otsiniuvannia tekhnichnoho stanu nasosnykh ahrehativ za rivniamy vibratsii ta pokaznykamy enerhoefektyvnosti. Bulletin of Agricultural Science, 7 (784), 52–58. DOI: 10.31073/agrovisnyk201903–08 [in Ukrainian].

**M.I. Romashchenko, M.V. Yatsyuk, R.V. Saidak, D. Ya. Strokon,  
T.V. Matyash, V.M. Popov, I.V. Voytovych, V.V. Knysch**  
**Reconstruction and modernization of inter-farm irrigation systems –  
the basis of energy efficiency of water supply in irrigation**

*Abstract.* The paper presents the results of the analysis of the current state, problems, and the directions of irrigation development in Ukraine. A comprehensive analysis of the technical condition and existing potential of reclamation infrastructure, including inter-farm engineering infrastructure of irrigation networks at the Lower Dniester Irrigation System (LDIS) was made. It was found that the equipment of the pumping stations of LDIS has long been depreciated and is in very poor technical condition, water losses during transportation are 32–35% of the primary water intake, engineering infrastructure has almost run

out of its resource and technical condition and parameters do not meet the required level. The average specific power energy consumption for 1 water pumping at LDIS per 1000 m<sup>3</sup> is 351 kWh, and the share of energy consumption costs in the prime cost of supplied water for irrigation is about 60%. The operation of obsolete equipment is carried out under the conditions of a severe deficit of budget funding, there are almost no funds for current and major repairs of equipment and facilities. The prime cost of water transportation for irrigation per m<sup>3</sup> was determined, and the cost of 1 m<sup>3</sup> of water for water users was calculated.

The sources of financial support for the operation of LDIS were investigated. The operation of LDIS in 2020 was financed by 66% of the state budget and by 34% from the revenues obtained from water users. It was specified that the system of service cost reimbursement does not cover the cost of water supply for irrigation. Based on the results of the technical and economic analysis and energy audit, the total investment needed for a modernization and reconstruction project for LDIS was calculated. The main results of the project implementation are presented, which will increase the volume of gross agricultural output by 1.6–1.8 billion UAH/year. Due to the introduction of a set of reconstruction measures for the reconstruction of NDIS, the specific energy consumption of water supply at the water intake point will be reduced from 1.03 kWh/m<sup>3</sup> to 0.65 kWh/m<sup>3</sup> or by 37%. The total energy savings will be from 0.03 to 0.21–0.25 kWh/m<sup>3</sup>.

**Key words:** irrigation, audit, technical condition, energy efficiency, modernization, reconstruction, investments.

## ЗМІСТ

## ЗРОШЕННЯ – ОСУШЕННЯ

<b>Ромашенко М.І., Богасенко В.О., Шатковський А.П., Матяш Т.В., Коломієць С.С., Шевчук С.А., Даниленко Ю.Ю., Сардак А.С.</b> Концептуальні засади управління поливами при зрошенні.....	5
<b>Бабіцька О.А., Харламов О.І., Савчук Д.П., Котикович І.В., Воропай Г.В.</b> Обґрунтування оптимальних параметрів горизонтального систематичного дренажу в сучасних водогосподарських та кліматичних умовах Півдня України.....	18
<b>Матяш Т.В., Ромашенко М.І., Богасенко В.О., Шевчук С.А., Крученюк А.В., Бутенко Я.О.</b> Моніторингові спостереження та формування режимів зрошення при вирощуванні сільськогосподарських культур із використанням системи «Полив Онлайн».....	29
<b>Журавльов О.В., Шатковський А. П., Васюта В.В., Черевичний Ю.О., Марінков О.А., Коваленко І.О., Гуленко О.І.</b> Порівняння розрахункових методів визначення евапотранспірації за краплинного зрошення.....	40

## ГІДРОЛОГІЯ

<b>Петроченко В.І., Петроченко О.В.</b> Систематизація паводків та протипаводкових заходів.....	50
--	----

## ВОДНІ РЕСУРСИ

<b>Шевченко А.М., Боженко Р.П., Лютницький С.М.</b> Типізація Херсонської області за забезпеченістю водними ресурсами для розвитку зрошення та його екологічними наслідками.....	60
---	----

## АГРОРЕСУРСИ

<b>Rahman H., Saiga S., Sabreen S., Islam R.</b> Can endophyte-infected tall fescue minimize the grass tetany risk?.....	71
<b>Тараріко Ю.О., Сорока Ю.В., Личук Г.І.</b> Низьковуглецева система аграрного виробництва у Лівобережному Лісостепу України.....	81
<b>Лавренко С.О., Лавренко Н.М., Максимов М.В.</b> Сучасні аспекти інформатизації сільськогосподарського виробництва на основі моделювання та прогнозування продукційного процесу сочевиці за різних умов вологозабезпечення.....	89
<b>Шатковський А.П., Мельничук Ф.С., Ретьман М.С., Гуленко О.І., Калілей В.В.</b> Забур'яненість посівів соняшнику і нуту залежно від способів мікрозрошення.....	97

## ГІДРОТЕХНІКА

<b>Левчук А.П., Максін В.І., Зоріна О.В., Шевчук С.А., Мацелюк Є.М.</b> Адаптивна система знезараження мікроводоростей як основа нового технологічного підходу до установок замкненого водопостачання.....	104
<b>Чарний Д.В., Мацелюк Є.М., Шевчук С.А., Онанко Ю.А., Левицька В.Д., Марисик С.В.</b> Вивчення впливу на довкілля діючих біоінженерних споруд доочищення освітлених вод хвостосховища на прикладі очисних споруд ПРАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат».....	115

**Ромашенко М.І., Яцюк М.В., Сайдак Р.В., Строкон Д.Я., Матяш Т.В., Попов В.М.,  
Войтович І.В., Книш В.В.**

Реконструкція та модернізація міжгосподарських зрошувальних систем –  
основа підвищення енергоефективності водоподачі на зрошення.....122

## CONTENTS

## IRRIGATION-DRAINAGE

<b>Romashchenko M.I., Bogaenko V.O., Shatkovskiy A.P., Matyash T.V., Kolomiets S.S., Shevchuk S.A., Yu.Yu. Danylenko, Sardak A.S.</b> Conceptual principles of watering control under irrigation.....	5
<b>Babitska O.A., Kharlamov O.I., Savchuk D.P., Kotikovych I.V., Voropay G.V.</b> Substantiation of optimal parameters of horizontal systematic drainage in modern water management and climatic conditions in the south of Ukraine.....	18
<b>Matiash T.V., Romashchenko M.I., Bogaenko V.O., Shevchuk S.A., Kruchenyuk A.V., Ya.O. Butenko</b> Monitoring and irrigation regime formation when growing crops using the “Irrigation Online” system.....	29
<b>Zhuravlov O.V., Shatkovskiy A.P., Vasyuta V.V., Cherevychnyi Y.O., Marinkov O.A., Kovalenko I.O., Gulenko O.I.</b> Comparison of calculation methods for determining evapotranspiration under drip irrigation.....	40

## HYDROLOGY

<b>Petrochenko V.I., Petrochenko O.V.</b> Systematization of floods and anti-flood measures.....	50
---	----

## WATER RESOURCES

<b>Shevchenko A.M., Bozhenko R.P., Lyutnitsky S.M.</b> Typification of Kherson region by water availability for irrigation and its environmental consequences.....	60
--	----

## AGRO RESOURCES

<b>Rahman H., Saiga S., Sabreen S., Islam R.</b> Can endophyte-infected tall fescue minimize the grass tetany risk?.....	71
<b>Tarariko Yu.O., Soroka Yu.V., Lychuk H.I.</b> Low-carbon system of agricultural production in the Left Bank Forest-Steppe of Ukraine.....	81
<b>Lavrenko S.O., Lavrenko N.M., Maksymov M.V.</b> Modern aspects of informatization of agricultural production based on modeling and forecasting the production process of lentils under different conditions of moisture supply.....	89
<b>Shatkovskiy A.P., Melnychuk F.S., Retman M.S., Gulenko O.I., Kaliley V.V.</b> Weed development in sunflower and chickpea crops depending on micro-irrigation methods.....	97

## HYDRAULIC ENGINEERING

<b>Levchuk A.P., Maksin V.I., Zorina O.V., Shevchuk S.A., Matselyuk E.M.</b> Adaptive microalgae disinfection system as the basis of a new technological approach to closed water supply installations.....	104
<b>Charny D.V., Ye.M. Matselyuk, Shevchuk S.A., Yu.A. Onanko, Levitska V.D., Marysyk S.V.</b> Study of the environmental impact of existing bioengineering structures for treatment of clarified water of the tailing ponds by the case of treatment structures PJSC “Poltava ore mining and processing plant”.....	115

**Romashchenko M.I., Yatsyuk M.V., Saidak R.V., D. Ya. Strokon,  
Matyash T.V., Popov V.M., Voytovych I.V., Knysh V.V.**

Reconstruction and modernization of inter-farm irrigation systems –  
the basis of energy efficiency of water supply in irrigation.....122

## НОТАТКИ

**Наукове видання**

**Меліорація**  
*і водне господарство*

*№ 1 • 2022*

**Журнал**  
**Заснований у 1965 році**

*(випуск 115)*

Виконавчі редактори – Т.І. Трошина, Н.В. Логунова, К.Б. Шатковська, О.П. Войтович

Підписано до друку 23.06.2022 року.  
Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.  
Папір офсет. Цифровий друк.  
Ум. друк. арк. 15,81. Обл. вид. арк. 12,55.  
Замов. № 0722/008. Наклад 100 прим.

Видавництво та друк: Олді+  
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1  
Свідоцтво ДК № 7546 від 13.12.2021 р.

---

Тел.: +38 (098) 559-45-45,  
+38 (095) 559-45-45, +38 (093) 559-45-45  
E-mail: office@oldiplus.ua