

УДК 631.67: 004.9

## ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДОЛОГІЇ СИСТЕМНОГО УПРАВЛІННЯ ВОДНИМ РЕЖИМОМ ТЕРИТОРІЙ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ПІДТОПЛЕННЯ

В. Ковальчук

*Інститут водних проблем і меліорації НААН України, м.Київ**kovalchukvp@mail.ru*

Розроблена методологія системного управління водним режимом для ефективного захисту від підтоплення зрошуваних територій, яка включає ієрархічно організовані види управління водонадходженням і водовідведенням. Запропонована реалізація системного управління на основі інформаційних технологій. Розроблена Інформаційно-аналітична система для структурного управління водонадходженням, що дозволяє проводити оцінку режимів зрошення за різних умов.

*Ключові слова: методологія системного управління, водний режим, підтоплення, види управління водонадходженням та водовідведенням.*

The methodology of system control for water regimes aimed to the effective protection of irrigated areas against flooding, which involves the hierarchically organized types of water supply and removal control was developed. It is proposed the implementation of the system control based on IT. The information analysis system for structural control of water supply was also developed, which enables to evaluate irrigation regimes under different conditions.

*Key words: methodology of system control, water regime, flooding, types of water supply and removal control.*

Разработана методология системного управления водным режимом для эффективной защиты от подтопления орошаемых территорий, которая включает иерархически организованные виды управления водопоступлением и водоотведением. Предложена реализация системного управления на основе информационных технологий. Разработана Информационно-аналитическая система для структурного управления водопоступлением, что позволяет проводить оценку режимов орошения при разных условиях.

*Ключевые слова: методология системного управления, водный режим, подтопления, виды управления водопоступлением и водоотведением.*

**Постановка задачі.** Розвиток теорії і методів управління призвів до якісної зміни самого поняття управління [1], необхідності створення єдиної методології системного дослідження та оптимізації управління сучасними складними системами, зокрема розробки підходів, методів, моделей та алгоритмів підвищення ефективності управління зрошуваною територією для захисту від підтоплення сільськогосподарських угідь та населених пунктів.

Управління як глобальними процесами [2, 3], так і процесами на регіональному рівні [4] спричинили необхідність розробки нових концепцій, підходів, прийомів розв'язання сучасних складних системних завдань, що обумовило необхідність принципово по-новому переглянути їх постановки та підходи до управління [1].

Для управління меліорованою територією, як складною цілісною соціо-природно-технічною системою в умовах невизначеності і погодного ризику, ставиться задача розробки методології системного управління, яка передбачає вибір взаємопов'язаних видів управління, рішень і дій для досягнення

узгоджених цілей оптимізації водонадходження і водовідведення з метою створення сприятливого водного режиму території. При цьому ставиться задача математичної формалізації проблеми системного управління та розробляється відповідна цілісна система логіко-математичних моделей прийняття рішень для захисту території від підтоплення.

**Ієрархічний підхід до вирішення задач системного управління.** Автором запропоновано [6] трирівневу ієрархічну структуру системної моделі (рис.1), яка передбачає управління водним режимом меліорованою територією як цілісною соціо-природно-технічною системою на різних рівнях ієрархії. Якщо розглядати технічні і технологічні комплекси, що функціонують на зрошуваній території, то її можна представити як природно-технічну систему [7]. Однак така система є органічною складовою деякого соціального середовища на території, що піклується про розвиток, захист від підтоплення, здійснює платне водокористування, тобто територія є **соціо-природно-технічною системою**.

Під час формалізації і розв'язання системних задач доцільно використовувати структурно-функціональний (конструктивний) підхід до зображення та аналізу наявної інформації про об'єкт у вигляді концептуальних елементів структури системи та зв'язків між ними, умов, залежностей та логіко-графічних особливостей функціонування об'єкта [1].

На кожному рівні ієрархії системи „меліорована територія” застосовується одна або декілька моделей (субмоделей) оцінки складових системного управління, залежно від їх наявності (рис.1).

Ієрархічний спосіб представлення системи та моделей її реалізації забезпечує нове бачення взаємодії основних факторів системного об'єкта – властивостей об'єкта, де на кожному рівні ієрархії структурно і функціонально вирішуються свої особливі задачі управління, з урахуванням невизначеностей та ризиків різної природи. Узгодження між рівнями ієрархії повинно бути системним і враховувати не лише окремі цілі та задачі, але і складність ситуацій та взаємодію видів управління, заходів і дій, для досягнення системної цілі функціонування об'єкта – захисту зрошуваних територій від підтоплення. Дана задача належить до задач організованої складності [1], для яких характерні такі принципи властивості як організованість, ієрархічність, адаптивність.

На першому рівні ієрархії передбачено вибір параметрів технологічного управління окремими модулями та елементами природно-технічної системи. Стосовно водного режиму зрошуваних територій – це управління поведінкою та властивостями [1], зокрема оперативне планування поливів з використанням багат шарових моделей вологоперенесення [8]; оперативне управління рівнем ґрунтових вод на основі вертикального, горизонтального та комбінованого дренажу [9]; заходи по покращенню фізичних властивостей ґрунтів, збільшення вологоємності та вологопровідності за допомогою глибокого розпушування [10].

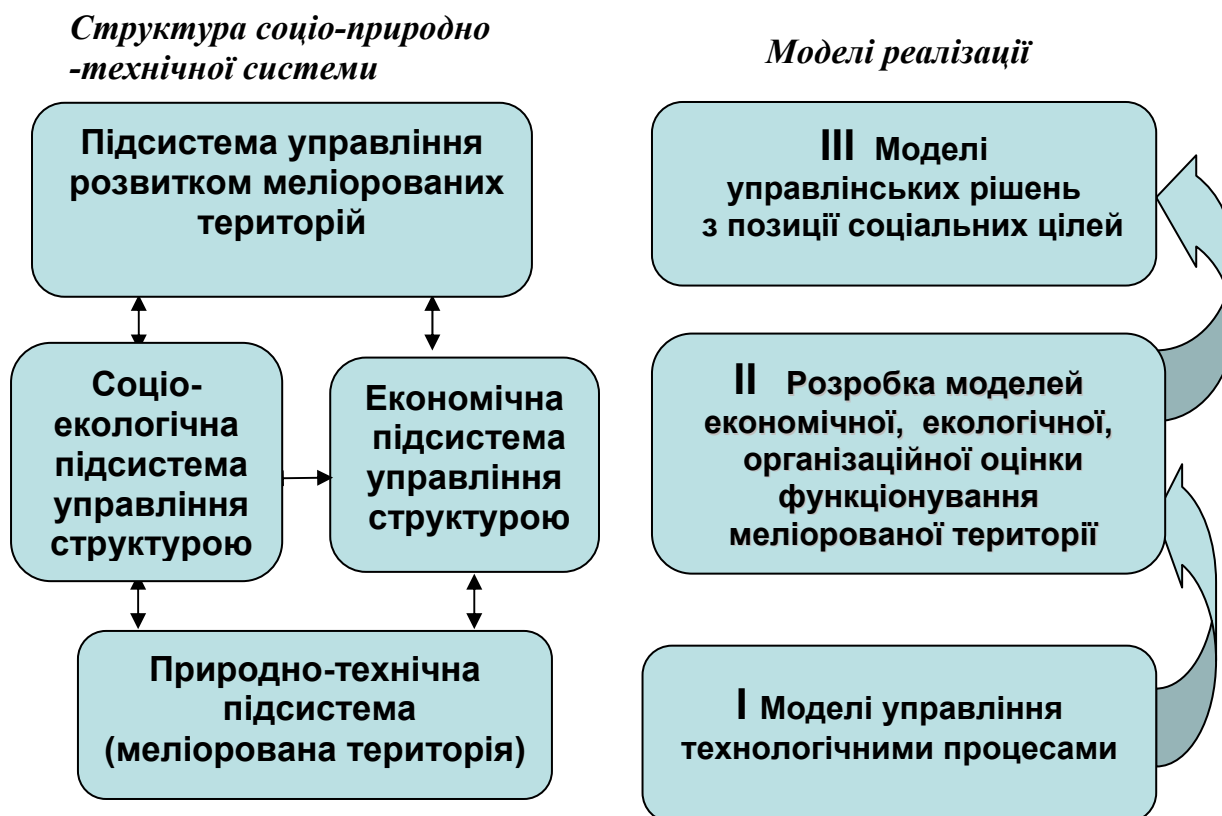


Рис.1. Укрупнена блок-схема ієрархічного підходу до системного управління водним режимом меліорованих територій.

Управління поведінкою та властивостями повинно контролюватись, зокрема і за даними моніторингу, з позицій їх ефективності, адаптації до екологічного стану території певних технологій, необхідності структурних змін при використанні окремих модулів, тобто реконструкції чи модернізації системи. Це є структурне управління [1], розгляд якого здійснюється на вищому, другому рівні ієрархії. Для структурного управління водонадходженням на територію характерними є завдання вибору джерел зрошення [11], режимів зрошення [12], видів поливів, техніки поливу, облаштування водних об'єктів для зрошення, сільськогосподарського водопостачання, промислових потреб, що забезпечує мінімізацію інфільтрації в нижні шари ґрунту. При організації водовідведення з території виникає завдання модернізації дренажних систем [13].

До структурного управління відноситься також управління призначенням (У5) окремих елементів території, що забезпечує зміну мети і завдань функціонування окремих елементів території, причому настільки принципово, що жоден з видів управління не забезпечує адаптацію цих елементів до нових умов. При цьому, як правило, ставляться соціальні цілі, такі, як відновлення зрошення, забудова частини меліорованих земель, ренатуралізація меліорованих земель та ін. Це є управління розвитком території на третьому рівні ієрархії. Для управління розвитком розроблено метод еколого-економічної оптимізації послідовності вкладення інвестицій в заходи по розвитку соціо-природно-технічної системи [14].

**Логіко-математична модель системного управління водним режимом.**

Як показує розгляд логічної схеми (рис. 2), зрошувана територія є складною системою, на якій розміщені об'єкти управління водонадходженням (зрошувальні системи, канали, ставки, водосховища). Територія знаходиться під впливом неконтрольованих природних факторів (опадів, випаровування, водонадходження ззовні). В самій системі відбувається фільтрація з каналів і водосховищ на рівень ґрунтових вод. Ґрунтові води знаходяться під впливом напірного живлення з підземних водоносних горизонтів. В свою чергу ґрунтові води поповнюють водоносні горизонти. Виникає необхідність не тільки ефективного управління водонадходженням (на зрошення, комунальні потреби, вирощування риби та ін.), але й узгоджене управління водовідведенням з території, із забезпеченням заходів техногенної та екологічної безпеки.

При незадовільному водовідведенні і значному водонадходженні на зрошувану територію порушується водний режим, відбувається підняття рівня ґрунтових вод і, як наслідок, підтоплення сільськогосподарських угідь і сільських населених пунктів.

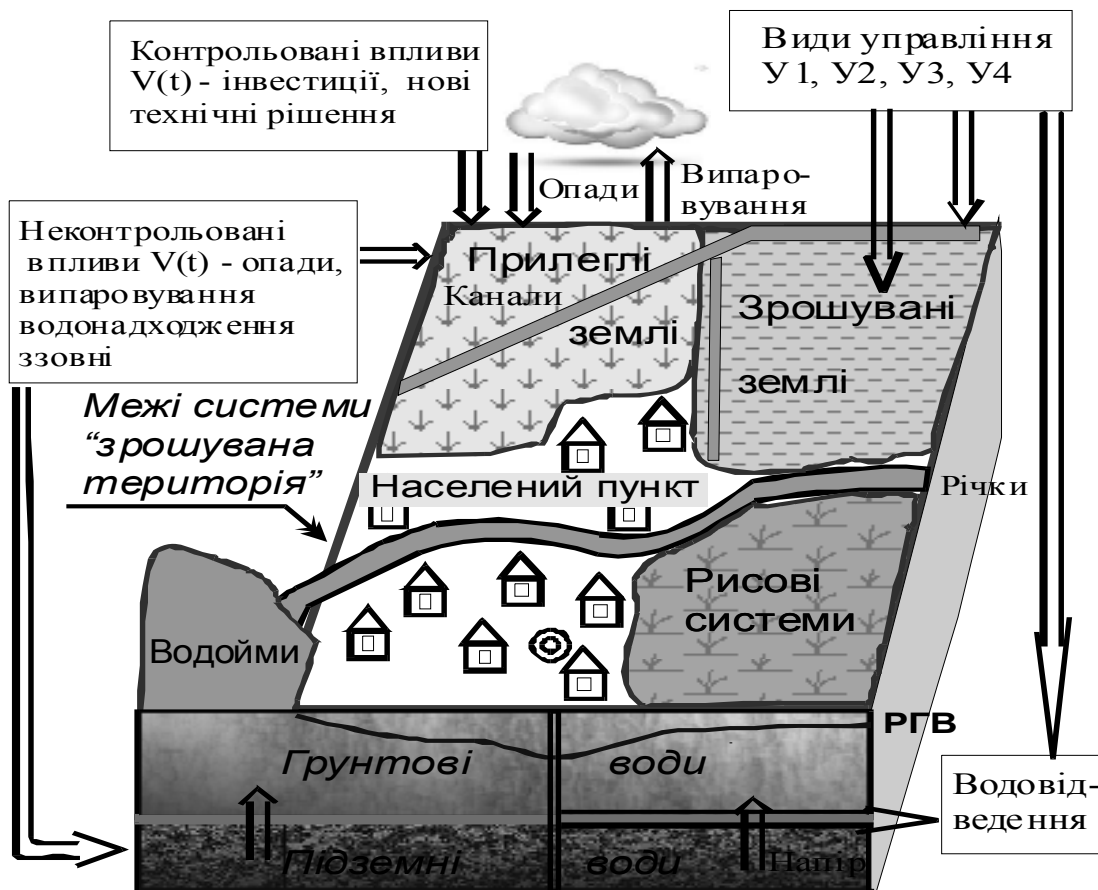


Рис. 2. Зрошувана територія, як соціо-природно-технічна система

Логічна схема (рис.2) реалізує структурний підхід до системного аналізу [7], тоді як необхідно враховувати функціональні особливості системи. Отже, необхідне застосування структурно-функціонального підходу, за яким процес управління в системі  $S$  представлено як деяку системну модель динаміки, що описує послідовну зміну в часі параметрів, структури, взаємодію елементів системи і навколишнього середовища:

$$S_{n+1} = S_n [X(t_n), \Sigma(t_n), U(t_n), F(t_n), V(t_n)] \quad (1)$$

де  $X(t_n)$  - внутрішні елементи та параметри стану;  $\Sigma(t_n)$  - структура системи в момент  $t_n$ ;  $U(t_n)$  - множина видів управлінь та заходів, що змінюють параметри, структуру системи, алгоритм взаємодії елементів системи та елементів зовнішнього середовища;  $F(t_n)$  – критерії оцінки в момент  $t_n$  управляючих впливів в самій системі та при взаємодії системи з зовнішнім середовищем;  $V(t_n)$  – зовнішнє середовище, що впливає на стан системи, окремі параметри та її структуру. Воно складається з контрольованих та неконтрольованих впливів.

Значення поточних параметрів моделі (1) належать множинам, розглядуваним на інтервалі  $[0; T]$  функціонування системи:

$$X(t_n) \in X[T]; \Sigma(t_n) \in \Sigma[T], U(t_n) \in U[T], F(t_n) \in F[T], t \in [0; T]; n=0, 1, \dots, N. \quad (2)$$

Методично, на відміну від інтегрованого управління [4], системне управління передбачає наявність в системі  $S$  взаємодії (інтегрування) різних видів управління (управління поведінкою, властивостями, структурою, управління розвитком та управління призначенням), для досягнення поставленої мети – захисту від підтоплення зрошуваних земель і сільських населених пунктів. Інтегроване управління відбувається у взаємозв'язку за рівнями ієрархії (управління по вертикалі), а також за діями, що визначають водонадходження і водовідведення на зрошуваній території (управління по горизонталі).

Управління поведінкою (У1) для зрошуваної території полягає у вирішенні задач управління вологістю верхнього шару ґрунту на основі оперативного планування поливів, управління рівнем ґрунтових вод з використання систем вертикального, горизонтального та комбінованого дренажу і реалізується у вигляді оперативної реакції системи управління на стан об'єкта і впливи зовнішнього середовища:

$$X(t_{n+1}) = A (X(t_n), U(t_n), V(t_n)) \quad (3)$$

При управлінні властивостями (У2) передбачається зміна властивостей елементів стану системи, або їх параметрів. Зокрема, облицювання каналів та заміна технічних вузлів в інженерних системах захисту від підтоплення, покращення дренажу території річкою, оптимізація водно-фізичних властивостей ґрунтів на основі агротехнічних меліорацій [10], управління якістю поливних вод [12].

Управління структурою (У3) характеризує вибір варіанту структури системи, тобто змінюється склад, структура та взаємозв'язки елементів. Для оптимізації структури [13] використовуються рівняння руху динамічного об'єкта при кожній фіксованій структурі  $\Sigma_k$ :

$$X(t_{n+1}) = A_{\Sigma} (X(t_n), \Sigma_k(t_n), U(t_n), V(t_n)), \Sigma_k(t_n) \in \Sigma. \quad (4)$$

Ціль управління – знайти оптимальну структуру, для якої в результаті функціонування на деякому інтервалі часу  $t \in [0; T]$ , досягається оптимізація структури системи за заданим критерієм:

$$\left\{ \Sigma_k^* \in \Sigma / F_k(X(t), \Sigma_k(t), V(t), \rightarrow_{\Sigma_k \in \Sigma} \text{onm}), t \in [0; T], \Sigma_k \in \Sigma, V(t) \in V, X(t) \in X, F_k \in F. \right. \quad (5)$$

Для оптимізації управління структурою (варіантів режимів зрошення, варіантів систем інженерного захисту від підтоплення та ін.) доцільно використовувати сценарний аналіз [1, 13].

Управління розвитком (У4) передбачає на третьому рівні ієрархії розвиток меліорованої території, як складної системи, з метою адаптації її до нових соціо-еколого-економічних умов. Це розробка і впровадження заходів, що обумовлюються видами управління, для покращення водного режиму території. Інтегроване управління полягає в оптимізації за еколого-економічним критерієм послідовності здійснення цих заходів [14]. Економічна складова моделі передбачає державні інвестиції та надходження коштів від платного водокористування [12], екологічна складова – формалізацію експертних оцінок за їх екологічною важливістю [14].

**Реалізація системного управління на основі інформаційних технологій (ІТ).** Для зниження трудомісткості використання інформаційних ресурсів створена інформаційна технологія для управління водним режимом зрошуваних територій у вигляді систем підтримки прийняття рішень (СППР) [15]. ІТ є сукупністю методів, програмно-технологічних засобів, що використовуються для зберігання, обробки та отримання інформаційного продукту нової якості про стан водного режиму території, процесу управління водонадходженням та водовідведенням та явища підтоплення земель та сільських населених пунктів.

Зокрема, для структурного управління водонадходженням на територію розроблена Інформаційно-аналітична система (ІАС) [15], в якій імітаційне моделювання варіантів проводять за багатошаровою математичною моделлю [15] на основі одновимірного диференціального рівняння руху ґрунтової вологи. Рівняння описує насичено-ненасичений ґрунтовий потік в неоднорідному ґрунтовому профілі:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n) \frac{\partial \psi(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n)}{\partial z} - k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n) \right] - I_\theta(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n) \quad (6)$$

де  $\theta$  – об’ємна вологість ґрунту, % об.;  $\psi(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n)$  водний потенціал, см вод.ст.;  $k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n)$  – коефіцієнт вологопровідності, см/добу;  $I_\theta(z)$  – функція «внутрішніх джерел» вологи, %об./сут;  $z$  – вертикальна координата, см;  $\tau$  – час, доби,  $\eta_1, \dots, \eta_n$  – параметри (фізичні властивості ґрунту пошарово).

Ідентифікація параметрів рівняння (5) здійснюється за програмою "ROSETTA" [16], заснованою на багатошаровій, напівемпіричній моделі Ван-Генухтена, де гідрофізичні функції, індивідуальні для різних шарів ґрунтів, розподілені по глибині ґрунтового профілю. Кількість фізичних шарів у імітованій зоні аерації визначається ступенем диференціації ґрунтового профілю за їх гідрофізичними властивостями:

$$k = k(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n), \quad \psi = \psi(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n) \quad (7)$$

Перехід до різницевої апроксимації рівняння (1) дозволяє отримати систему різницевих рівнянь багат шарової математичної моделі. Програмний комплекс розробленої інформаційно-аналітичної системи (ІАС) [15] реалізує сценарний аналіз поливних режимів в роки різної водозабезпеченості для одержання величини зрошувальних норм і значення інфільтрації вологи на різних глибинах за певний період часу (зокрема, за період вегетації). Згідно схеми чисельних експериментів з використанням ІАС визначаються величини зрошувальних норм  $U$ , інфільтрація за розрахунковий шар ґрунту  $Q$  залежно від рівня ґрунтових вод  $H$ , вирощуваної культури  $K$ , типу ґрунту  $\eta$ , року водозабезпеченості за дефіцитом водного балансу  $\theta$ , режиму зрошення  $R$ , що можна представити у вигляді функції:

$$(U, Q) = F(K, H, \eta, \theta, R) \quad (8)$$

Експеримент проводиться з використанням дерева планування (рис. 3). Проводиться вибір культури ( $K_1$ -озима пшениця або  $K_2$  - кормовий буряк); фіксується тип ґрунту: чорнозем південний на лесах –  $\eta_2$  або каштанові на лесах –  $\eta_1$  [17]). Згідно дерева, чисельний експеримент проводиться при  $H_1 = 3$  м - глибокому заляганні рівня ґрунтових вод (РГВ) або при  $H_2 = 1,5$  м - близькому заляганні РГВ. Розрахунки проводяться на погодні умови чотирьох років розрахункової забезпеченості по дефіциту водного балансу (сухий (97,6%) - 1968; середньо сухий (73,8%) - 1948 год; середньо вологий (26,2%) - 1970; вологий (2,4%) - 1961 рік) і чотирьох варіантів режимів зрошення (рис. 3): біологічно-оптимальний режим; водозберігаючий I, що реалізує, порівняно з біологічно-оптимальним режимом незначне зниження зрошувальних норм; водозберігаючий II – режим, при якому досягається суттєве зниження зрошувальних норм; богарні умови (без зрошення).

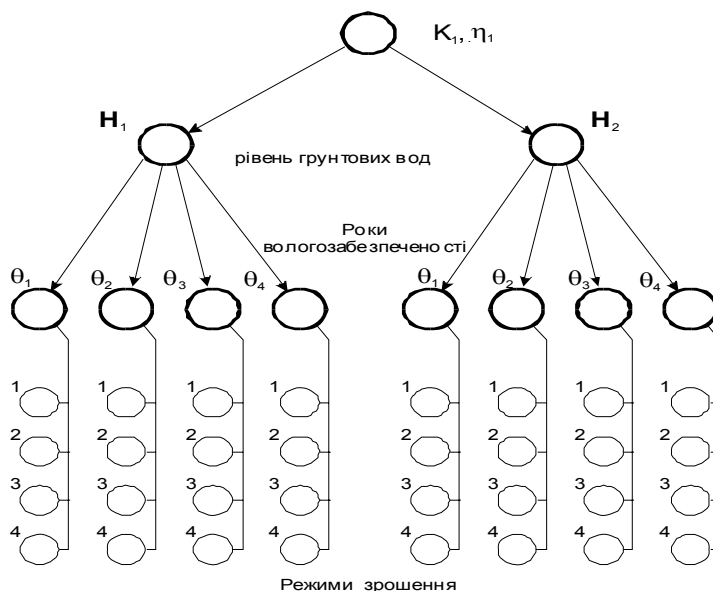


Рис 1. Дерево проведення експерименту для дослідження залежності зрошувальних норм та інфільтрації за розрахунковий шар ґрунту від параметрів

В якості прикладу, на основі сценарного моделювання за ІАС, одержані варіанти розрахунку динаміки вологості ґрунту при вирощуванні озимої пшениці. Розрахунки вологості ґрунту для чорнозему південного на лесах при близькому 1,5 м заляганні рівнів ґрунтових вод (у порівнянні з глибоким

заляганням 3 м) показує зменшення числа поливів та зниження зрошувальних норм (табл.1). Отже, при близькому заляганні ґрунтових вод за рахунок підживлення спостерігається істотна економія водних ресурсів. Аналіз показує, що при науково обґрунтованому проведенні поливів можлива тільки незначна фільтрація води за розрахунковий шар ґрунту 1 м при застосуванні біологічно оптимальних режимів зрошення (табл. 2).

Таблиця 1

Зрошувальні норми в роки різної вологозабезпеченості,  
при різних режимах зрошення і рівні ґрунтових вод

Рік	Дефіцит забезпеченості (%)	Режими зрошення			
		Без зрошення	Водозберігаючий II	Водозберігаючий I	Біологічно-оптимальний
РГВ = 1,5 м					
1968	97,6	0	0	1750	2000
1948	73,8	0	0	1050	1500
1970	26,2	0	0	700	500
1961	2,4	0	0	350	500
РГВ = 3 м					
1968	97,6	0	2100	3150	3000
1948	73,8	0	1050	2800	2000
1970	26,2	0	350	1750	1500
1961	2,4	0	350	1050	1000

Таблиця 2

Інфільтрація за розрахунковий шар (підживлення розрахункового шару, якщо в таблиці від'ємні значення) при близькому і глибокому заляганні РГВ

Рік	Дефіцит забезпеченості (%)	Режими зрошення			
		Без зрошення	Водозберігаючий II	Водозберігаючий I	Біологічно-оптимальний
РГВ = 1,5 м					
1968	97,6	-1243	-1243	-350	-142
1948	73,8	-952	-952	-267	-69
1970	26,2	-300	-300	-49	74
1961	2,4	-149	-149	44	86
РГВ = 3 м					
1968	97,6	-239	-122	-76	-60
1948	73,8	-158	-95	-62	-48
1970	26,2	-78	-63	-48	-36
1961	2,4	-66	-56	-41	-35



## Висновки.

Запропонована методологія системного управління дозволяє, порівняно з окремими видами управління, ефективніше комплексно впливати на покращення водного режиму території з метою запобігання підтопленню земель і сільських населених пунктів.

Розроблена для оцінки водонадходження на територію ІАС оцінює варіанти режимів зрошення, богарні умови і умови відповідно до дерева експериментів, порівнює процеси поливу, зрошувальні норми і норми водовідведення для різних типів ґрунтів при глибокому і близькому заляганні РГВ.

Встановлено, що при науково обґрунтованому проведенні поливів інфільтрація води за розрахунковий шар ґрунту практично відсутня; при застосуванні водозберігаючих режимів зрошення досягається істотна економія водних ресурсів за рахунок підживлення розрахункового шару ґрунтовими водами.

## Література

1. Згуровський М.З. , Пан-кратова Н.Д.. Основи системного аналізу // К.: Видавнича група ВНУ, 2007. – 544с. - ISBN 978-966-552-153-2.
2. Моисеев Н.Н., В. Александров В., Тарко А. М.. Человек и биосфера: Опыт системного анализа и эксперименты с моделями // М.: Наука, 1985. – 272 с.
3. Форрестер Дж. Мировая динамика // М.: Наука, 1978. – 167 с.
4. Интегрированное управление водными ресурсами: от теории к реальной практике. Опыт Центральной Азии. // Под ред. Проф. В.А. Духовного, д-ра. В.И. Соколова, д-ра. Х. Мантритилаке. – Ташкент: НИЦ МКВК, 2008. – 364 с. -ISBN 9965-32-627-4.
5. Ковальчук В.П. Обоснование управления системами защиты от подтопления Северо-Крымским каналом ПГТ Каланчак и прилегающих территорий// Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. Вып. 10. /ФГБОУ ВПО РГАТУ; под ред. Н.В. Бышова. – Рязань, 2013. – С. 501-507.
6. Ковальчук В.П. Ієрархічна модель інтегрованого управління меліоративними системами в умовах невизначеності // Меліорація і водне господарство. – К., 2007. – Вип. 95. – С. 202-214.
7. Кір'янов В.М. Структурна формалізація гідромеліоративної системи // Водне господарство України. – 2012. – № 1. – С. 24-29.
8. П.І. Ковальчук, Пендак Н.В., Ковальчук, В.П. Волошин М.М.. Системна оптимізація водокористування при зрошенні. / Монографія – Рівне: НУВГП, 2008. – 204с.

9. Ковальчук В.П. Моделювання управління рівнем ґрунтових вод сільських територій в умовах дії вертикального дренажу // Меліорація і водне господарство. – К., 2010. – Вип. 98. – С. 105 -118.
10. Ковальчук В.П. , Коломієць С.С. Імітаційне моделювання гідрофізичних властивостей ґрунтів при виконанні агро меліоративних заходів // Таврійський науковий вісник. Збірник наукових праць ХДАУ. - Херсон: Айлант, – 2007. – Вип.53. – С. 397-405.
11. Ковальчук В.П. Вибір альтернативних джерел зрошення для запобігання підтопленню територій // Водне господарство України. – 2010. – № 5. – С. 24-27.
12. Ковальчук В. П. Эколого-экономическая оптимизация режимов орошения с учетом качества грунтовых вод // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. ФГБНУ «РосНИИПМ». – Вип. 50. – Новочеркасск: Геликон, 2013. – С.81-88.
13. Ковальчук В.П. Системне управління захистом територій від підтоплення на основі сценарного моделювання // Індуктивне моделювання складних систем. – К.: МННЦ Інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, 2011. – Вип. 3. – С.90–98.
14. Ковальчук В.П. Метод оптимізації системного управління розвитком зрошуваних територій /В.П. Ковальчук // Меліорація і водне господарство. – К., 2011. – Вип. 99. – С. 68-75.
15. Ковальчук П.І. , Михальська Т.О., Шевчук С.А., Ковальчук В.П., Матяш Т.В., Демчук О.С. Інформаційно-аналітична система оцінки зміни стану та ефективності систем захисту від підтоплення та затоплення територій // Водне господарство України. – 2009. – №6. – С. 52 – 53.
16. Rosetta Version 1.0 (Free downloaded program). U.S.Salinity Laboratory ARS-USDA; <http://www.usssl.ars.usda.gov>.
17. Атлас почв Украинской ССР/ Под ред.: Н.К.Крупского, Н.И. Полупана –К.: Урожай, 1979. –159с.