

УДК 631.67

**В. П. Ковальчук**, канд. техн. наук,**Т. В. Матяш**, канд. техн. наук

Інститут гідротехніки і меліорації НААН України, м. Київ.

## ІМІТАЦІЙНО-ІГРОВИЙ МЕТОД СЦЕНАРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ І РИЗИКУ

Запропоновано метод сценарного імітаційно-ігрового моделювання для прийняття рішень за умов невизначеності і ризику в природокористуванні. Метод ілюструється на прикладі екологічного обґрунтування структури режимів зрошення.

**Ключові слова:** сценарний аналіз, ігри з природою, імітаційно-моделювання, прийняття рішень, ситуація невизначеності.

**Постановка задачі.** В системах природокористування вибір управлінських дій, проектних рішень чи технологій здійснюється в умовах невизначеності та ризику, які обумовлені невизначеністю природних станів (погодних умов, гідрографів стоку річок, поширення забруднення тощо). Для прийняття оптимальних рішень в системах пропонується сценарний аналіз [1, с. 434—437], структурно-логічна схема якого та основні етапи залежать від специфіки вирішуваної задачі.

Нами пропонується метод сценарного аналізу, для реалізації якого в умовах ризику та невизначеності використовується імітаційно-оптимізаційний (імітаційно-ігровий) підхід. Сценарне моделювання передбачає на першому етапі розгортання імітаційних сценаріїв в різні за погодними умовами роки (стани природи) при різних управлінських діях активного гравця або особи, що приймає рішення (ОПР). Оптимізація варіантів управління на другому етапі відбувається на моделі матричної гри з природою, елементами матриці є функціонали, залежні від ходів природи  $\theta_j \in \Theta$ , ходів активного гравця  $\Sigma_k \in \Sigma$  та від параметрів природно-технічної системи  $\eta_1 \cdots \eta_n$ . Застосування методу ілюструється на прикладі вибору екологічно обґрунтованих режимів зрошення.

**Імітаційно-ігрові сценарії природокористування.** Для здійснення структурного управління в умовах невизначеності застосовуємо сценарне моделювання [1, с. 434—437]. В системах природокористування, зокрема в сільськогосподарському виробництві, процес розглядається на множині тактів — часових інтервалів управління протягом року, та множині циклів — множині років вирощування сільськогосподарських культур.

Розглянемо систему  $S_k = (\Sigma_k, \eta_k, A_k)$ ,  $S_r \in S$ , що функціонує в середовищі  $\theta_j \in \Theta$ , де  $\Sigma_k$  — структура системи,  $\eta_k \in \eta$  — параметри,

$A_k \in A$  — алгоритм функціонування системи в середовищі  $\Theta$ . Функціонування відбувається в тактах  $t_i$  ( $i = 1, \dots, n_i$ ), що належать до циклу  $T_j$ ,  $j \in [1, \dots, N]$  — число тактів в циклі  $T_j$ . Процес спостерігається у двовимірні моменти часу  $\{t_{nj}, T_j\}$ , в окремі такти  $t_{nj}$ ,  $n \in [1; n_j]$  і на множині циклів  $T_j$ ,  $j \in [1; N_j]$ .

Виходячи з теоретико-множинного задання системи  $S_k \in S$ , виникає кілька типів (постановок) задач оптимізації функціонування природно-технічної системи: задача вибору оптимальної структури  $\Sigma^* \in \Sigma$  на множині реалізацій середовища; задача вибору оптимального алгоритму функціонування; задача вибору оптимальних параметрів в системі «природне середовище — технічна система» [2, с. 148].

Для оцінки ефективності функціонування природно-технічної системи вибирають один або декілька критеріїв оцінки  $F(S_k, \theta_j)$ , що залежать від детермінованої змінної  $S_k$  (структури  $\Sigma_k$ , параметрів або алгоритмів управління  $A_k$ ) і стохастичної змінної  $\theta_j$ . В подальшому під час оптимізації системи за змінною структури  $\Sigma_k \in \Sigma$  маємо ситуацію, пов'язану з невизначеністю параметра  $\theta_j$ . Прийняття рішень потребує для свого опису відповідного математичного апарату. Важливим напрямом опису невизначених ситуацій є *теорія ігор*, де невизначеність породжується конфліктом і антагоністичними інтересами гравців, пов'язаних між собою певними правилами гри. В іграх з природою, де за одного з гравців вибирається пасивне середовище або природа, поведінка системи характеризується різними рівнями невизначеності в інформаційних ситуаціях [3, с. 14—149].

Сформульовану вище задачу можна розв'язувати на основі *ієрархічного імітаційно-ігрового методу моделювання* за такою схемою.

На нижньому локальному рівні ієрархії багаторазово (за числом циклів) моделюється взаємодія природної й технічної системи, що дає змогу визначити множину реалізацій імітаційного процесу. Імітаційне моделювання в циклах  $T_j \in T$  описується звичайними диференціальними рівняннями або рівняннями в частинних похідних. Відповідно до дискретних значень в часі часто доцільніше розглядати дискретні моделі, адекватні неперервним рівнянням. Більше того, існують системи виключно з дискретним часом, зокрема, системи такого типу:

$$x_{n+1} = f_{\Sigma_k}^n(x_n, \theta_{jn}, \eta_n, t_n), \quad (1)$$

де  $x_n = x(t_n)$ ,  $\eta_n = \eta(t_n)$ ,  $\theta_{jn} = \theta_j(t_n)$  — стан системи, її параметри та стан природних впливів у відповідні моменти часу;  $f_{\Sigma_k}^n$  — функція, що визначає динаміку процесу при певній структурі  $\Sigma_k$ .

На верхньому рівні, виходячи з оцінок  $F$  імітаційних сценаріїв в різних циклах  $T_j, j \in [1, \dots, N]$  або ходів природи  $\theta_j \in \Theta$  та при різних структурах  $\Sigma_k \in \Sigma$  (ходи активного гравця), одержимо ситуацію прийняття рішень  $\{\Sigma, \Theta, F, \eta\}$  в умовах невизначеності, що характеризується матрицею гри з природою:

$$F(\theta_j, \Sigma_k, \eta_1, \dots, \eta_n) = \begin{matrix} & \Sigma_1 & \dots & \Sigma_m \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ N \end{matrix} & \begin{vmatrix} f_{11}(\eta_1, \dots, \eta_n) & \dots & f_{1m}(\eta_1, \dots, \eta_n) \\ \vdots & & \vdots \\ f_{N1}(\eta_1, \dots, \eta_n) & \dots & f_{Nm}(\eta_1, \dots, \eta_n) \end{vmatrix} \end{matrix}, \quad (2)$$

$$j \in [1, N], k \in [1, m],$$

де елементами  $\{f_{jk}\}$ , залежними від параметрів,  $\eta_1 \dots \eta_n$ , є кількісні оцінки прийнятого рішення  $\Sigma_k \in \Sigma$  при умові, що середовище знаходиться в стані  $\theta_j \in \Theta$ .

Якщо процес оцінюється кількома критеріями, то одержують багатокритеріальну ситуацію для прийняття рішень  $\{\Sigma_1, \Theta_1, F_1, \eta_1\} \dots \{\Sigma_n, \Theta_n, F_n, \eta_n\}$  в умовах невизначеності.

**Приклад моделювання для вибору екологічно ефективних технологій у зрошуваному землеробстві.** Сучасні режими зрошення та створення на їх основі нових технологій водорегулювання на меліоративних системах повинні забезпечити не тільки високі врожаї, а й ресурсозбереження та природоохоронні вимоги.

Важливе значення для сільськогосподарських угідь мають наукові засади вивчення впливу різних режимів зрошення на величину інфільтрації за метровий шар ґрунту. В процесі зрошення часто виникають несприятливі наслідки: підняття рівня ґрунтових вод, підтоплення та засолення земель, негативні впливи на ґрунти.

Розглянемо задачу структурного управління режимами зрошення [4]. На першому рівні ієрархії вирішується задача імітаційного моделювання процесу управління режимами зрошення, на другому рівні ієрархії — задача оптимізації на основі вектор-функції матриці гри з природою.

Розроблена інформаційно-аналітична система для дослідження процесів інфільтрації при різних режимах зрошення сільськогосподарських культур та різних типів ґрунтів.

**Імітаційно-оптимізаційний підхід до дослідження екологічної ефективності технологій зрошення.** Дослідження інфільтрації нами здійснюється на основі імітаційної моделі вологоперенесення в ґрунтах, яка базується на одномірному нелінійному рівнянні. Оптимізаційний підхід до аналізу інфільтрації при різних режимах зрошення базується на моделі гри з природою. При цьому варіантами активного гравця є різні режими зрошення, а варіантами природи є роки різної вологозабезпеченості.

Управління режимами зрошення розглядаємо нижче як вид управління структурою, тобто як адаптацію або вибір з заданої множини структур об'єкта (режимів зрошення) оптимальної до умов середовища (гідрогеолого-меліоративних умов, кліматичних та ґрунтових умов) структури.

Імітаційне моделювання проводиться за багат шаровою математичною моделлю на основі диференціального рівняння руху ґрунтової води, яке описує насичено-ненасичений водний потік в негетерогенному ґрунтовому профілі:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(z, W, \eta_1, \dots, \eta_n) \frac{\partial \psi(z, W, \eta_1, \dots, \eta_n)}{\partial z} - k(z, W, \eta_1, \dots, \eta_n) \right] - I_{\theta}(z, W, \eta_1, \dots, \eta_n), \quad (3)$$

де  $W$  — об'ємна вологість ґрунту, частки одиниці;  $\psi(z, \theta, \eta_1, \dots, \eta_n)$  водний потенціал, кПа або см вод.ст.;  $k(z, W, \eta_1, \dots, \eta_n)$  — коефіцієнт вологопровідності, см/добу;  $I_{\theta}(z)$  — функція внутрішніх «джерел води» — об'єм води, який видається з одиниці об'єму ґрунту за одиницю часу (споживання води рослинами та фізичне випаровування);  $z$  — вертикальна координата, см;  $\tau$  — час, днів,  $\eta_1 \dots \eta_n$  — параметри (фізичні властивості ґрунту, рівень ґрунтових вод, тощо).

Ідентифікація параметрів рівняння (3) здійснюється за програмою «ROSETTA», яка базується на багат шаровій, напівемпіричній моделі Ван-Генухтена, в якій параметри — це гідрофізичні функції, індивідуальні для різних шарів ґрунтів, розподілені по глибині ґрунтового профілю [5]. Кількість шарів у імітованій зоні аерації визначається ступенем диференціації ґрунтового профілю за їх гідрофізичними властивостями [6]:

$$k = k(z, W, \eta_1, \dots, \eta_n), \quad \psi = \psi(z, W, \eta_1, \dots, \eta_n). \quad (4)$$

Задача екологічного обґрунтування режимів зрошення полягає у мінімізації сумарного потоку води за межі розрахункового шару

при дії комплексу техногенних і природних факторів [4]. Отже, потрібно визначити такий набір параметрів поливного режиму  $\Sigma_k \in \Sigma$ , для якого сумарний потік вологи на інтервалі  $[\tau_0; \tau_j]$  на глибині  $z$  задовольняє умові:

$$Q(\tau_0, \tau_1, \Sigma_k, \eta_1, \dots, \eta_n) = \int_{\tau_0}^{\tau_1} g_k(\tau, \eta_1, \dots, \eta_n) d\tau \leq C, \quad (5)$$

тобто величина інфільтрації не перевищує заданого рівня  $C$ . Критерій величини інфільтрації (5) виражає несприятливу подію (тобто ризик підтоплення), якщо значення критерію додатне; сприятливу подію (корисність від підживлення), якщо значення критерію від'ємне. Тобто критерій (5) є функцією ризику-корисності.

Сумарний потік  $Q_h(\tau_0, \tau, \Sigma_k, \eta_1, \dots, \eta_n)$  (перетікання об'єму вологи) на глибині суттєво залежить від режиму зрошення  $\Sigma_k \in \Sigma$  та погодних умов  $\theta_j \in \Theta$ , тобто є функцією

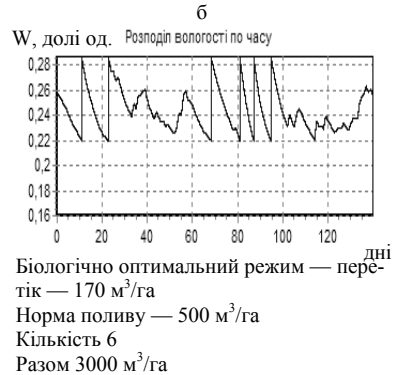
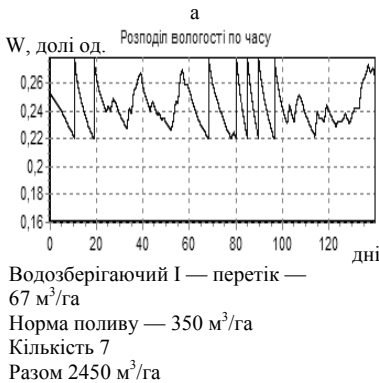
$$f(\theta_j, \Sigma_k, \eta_1, \dots, \eta_n) = Q_h(\tau_0, \tau, \theta_j, \Sigma_k, \eta_1, \dots, \eta_n).$$

У розгорнутій формі ситуація прийняття рішень характеризується матрицею  $F(\theta_j, \Sigma_k, \eta_1, \dots, \eta_n)$ , елементами  $\{f_{jk}\}$  якої, залежними від параметрів  $\eta_1, \dots, \eta_n$ , є кількісні оцінки прийнятого рішення  $\Sigma_k \in \Sigma$  при умові, що середовище знаходиться в стані  $\theta_j \in \Theta$ .

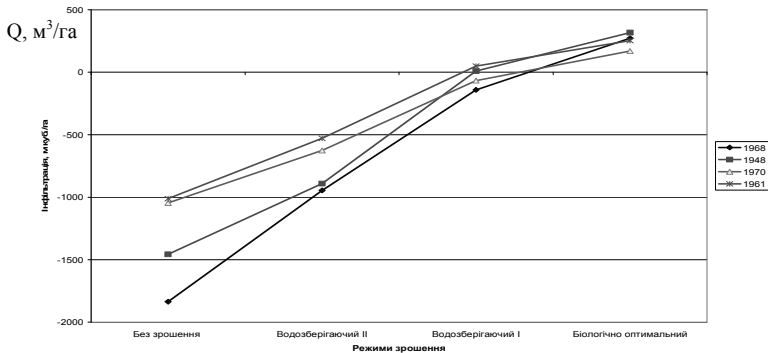
Розроблений програмний комплекс дозволяє графічно оцінювати набір сценаріїв або варіантів розрахунку. Особа, що приймає рішення, проводить оптимізацію в кількісному змістовому вираженні (однокритеріальна чи багатокритеріальна оптимізація, оптимізація у вигляді обмежень на значення критерію та ін.) на основі критеріїв розкриття невизначеності в матричній грі з природою [3].

**Приклад розрахунку інфільтрації для кормових буряків.** Як вектор параметрів для розрахунку вибрано:  $\eta_1$  — тип ґрунту (ґрунти каштанові на лесах);  $\eta_2$  — рівень ґрунтових вод (РГВ) — 1,5 м;  $\eta_3$  — кліматичні умови 1970 року (середньо-вологий рік).

Аналіз показує (рис.1, табл.1), що інфільтрація практично рівна 0 при режимі зрошення «водозберігаючий-І», який рекомендується як екологічно безпечний (рис. 2).



**Рис. 1.** Імітаційні сценарії динаміки вологості ґрунту: а — на богарі; б — водозберігаючий режим II; в — водозберігаючий режим I; г — біологічно оптимальний режим.



**Рис. 2.** Залежність інфільтрації за розрахунковий шар ґрунту від варіантів режимів зрошення в роки різної вологозабезпеченості.

Таблиця 1.

*Матриця гри з природою (величини інфільтрації або підживлення в залежності від варіантів режимів зрошення в роки різної вологозабезпеченості)*

Роки	Без зрошення	Водозберігаючий II	Водозберігаючий I	Біологічно-оптимальний
1948	-1457	-891	10	317
1961	-1011	-529	49	253
1968	-1936	-945	-141	272
1970	-1046	-626	-67	170

**Висновки.** Запропонований метод сценарного імітаційно-ігрового моделювання дозволяє приймати рішення в системах природокористування стосовно оптимальної структури управлінських дій, окремих параметрів та алгоритмів функціонування. Для даних цілей формалізується модель імітаційного моделювання у вигляді системи різницевих рівнянь та модель оптимізації у вигляді матриці гри з природою. У перспективі метод буде використаний для комплексного дослідження інфільтрації, водоспоживання і засолення ґрунтів.

#### Список використаних джерел:

1. Згуровський М. З. Основи системного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова — К. : Видавнича група BVH, 2007. — 544 с.
2. Ковальчук П. І. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища : навчальний посібник / П. І. Ковальчук — К. : «Либідь», 2003.— 207с.
3. Трухаев Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р. И. Трухаев — М. : Наука, 1981. — 257 с.
4. Ковальчук П. І. Матричні ігри з природою залежні від параметрів для дослідження ефективності технологій зрошення. / П. І. Ковальчук, В. П. Ковальчук, Т. В. Матяш // International Conference “Problems of Decision Making Under Uncertainties (PDMU-2008)”, May 12—17 Kyiv-Rivne, Ukraine. — С.131—132.
5. Rosetta Version 1.0 (Free downloaded program). U.S.Salinity Laboratory ARS-USDA. — Режим доступу : <http://www.usssl.ars.usda.gov>
6. Ковальчук П. І. Експериментальне обґрунтування багаточарової моделі управління поливами / П. І. Ковальчук, М. М. Волошин, В. П. Ковальчук // Таврійський науковий вісник, вип. 31. — Херсон , 2004. — С. 146—151.

It is proposed the method of scenario gaming simulation for decision making in terms of uncertainty and risk in nature management. The method is illustrated by the example of ecological ground of irrigation regimes structure

**Key words:** *scenario analysis, nature games, simulation, decision making, situation of uncertainty*

Отримано 02.06.10