УДК 621.501.72

П. І. Ковальчук*, д-р техн. наук,
О. С. Демчук **, старший викладач

*Інститут гідротехніки і меліорації УААН, м. Київ,
**Національний університет водного господарства
та природокористування, м. Рівне

МЕТОДИ ОЦІНКИ РИЗИКІВ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ БАСЕЙНУ МАЛОЇ РІКИ

В інформаційній системі аналізу стану басейну малої ріки запропоновано методи оцінки ризиків на основі імовірнісних та статистичних оцінок, формалізації моделі гри з природою, прогнозування процесів підтоплення земель з використанням ланцюгів Маркова, розглянуто багатокритеріальні моделі ризиків.

Ключові слова: *системна модель, басейн ріки, оцінка ризиків, прийняття рішень в умовах невизначеності, модель гри з природою, ланцюги Маркова.*

Постановка задачі. Для раціонального використання водноземельних ресурсів басейнів малих річок і визначення територій, які потребують негайного втручання з метою запобігання негативних наслідків антропогенного навантаження створено автоматизовану систему комплексної оцінки та аналізу екологічного стану басейнів. З цією метою розроблено системну модель аналізу антропогенного навантаження і класифікації екологічного стану басейнів малих річок України [1, с. 6—30] та здійснено її програмну реалізацію [2, с.22—27; 7, с. 80—82].

В даній роботі для оцінки стану басейну малої ріки запропоновано методи оцінки ризиків на основі імовірнісних та статистичних оцінок, на основі формалізації моделі гри з природою, прогнозування процесів підтоплення земель на основі ланцюгів Маркова, розглянуто багатокритеріальні моделі ризиків.

Структурно-функціональна схема інформаційно-аналітичної системи оцінки стану басейну малої ріки. Для прийняття рішень в умовах невизначеності та ризику нами вдосконалено системну модель [1, с. 6, 7] для комплексної оцінки та аналізу екологічного стану басейнів малих рік. На нижньому рівні ієрархії розглянуто окремі показники підсистем (рис. 1), на середньому рівні проводиться оцінка кожної підсистеми за комплексом критеріїв, на верхньому рівні оцінюється стан басейну ріки вцілому. В підсистемі „Якість водних ресурсів" математична модель класифікації на середньому рівні ієрархії здійснює узагальнення оцінок якості води за окремими показниками з визначенням інтегральних значень класів і категорій. Це узагальнен-

© П. І. Ковальчук, О. С. Демчук, 2012

ня полягає у визначенні середніх, найгірших та зважених за критерієм Ходжеса-Лемана [4, с. 47] значень для трьох блокових індексів якості води. В підсистемі „Використання земель" узагальнюються існуючі методичні підходи до прийняття рішень на випадок імовірнісного або нечіткого задання окремих показників [3, с. 266—270].

Рис. 1. *Дерево вдосконаленої системної моделі „Басейн малої річки"*

Оцінити в повній мірі екологічний стан басейну малої ріки не можливо без врахування якості повітря та ґрунтів. Для здійснення контролю забруднення повітря та ґрунтів нами запропоновано доповнити системну логіко-ієрархічну модель "Басейн малої річки" підсистемою оцінки забруднення повітря і ґрунтів. Також нами запропоновано вдосконалити дану модель шляхом введення підсистеми "Затоплення-підтоплення земель" з метою оцінки ризиків збитків від затоплення і підтоплення. З використанням ГІС-технологій та статистичних методів на основі оцінки економічних, екологічних та соціальних збитків здійснюється віднесення басейну малої ріки до тієї чи іншої зони ризику [6, с. 292—295].

Статистичні методи оцінки ризиків в підсистемі підтоплення та затоплення земель. Для аналізу багаторічної динаміки нестаціонарних процесів підтоплення земель запропоновано використовувати метод статистичного моделювання, зокрема побудови гістограм розподілу площ за рівнем ґрунтових вод (РГВ) при зрошенні і без зрошення з урахуванням зон ризику. Розроблена відповідна шкала оцінки зон екологічного ризику підтоплення земель за розподілом рівнів ґрунтових вод: зона катастрофічного ризику (зона I, РГВ < 1,5 м); зона критичного ризику (зона II, 1,5 м < РГВ ≤ 3 м); зона допустимого ризику (зона III, 3 м < РГВ ≤ 5 м); безризикова ситуація (зона IV, РГВ > 5 м).

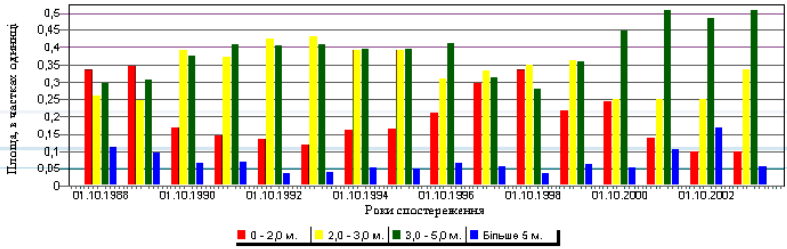

Рис. 2. *Гістограма розподілу площ з різними РГВ за зонами ризику*

Для проведення аналізу довгострокової і внутрішньорічної динаміки підтоплення сільськогосподарських угідь розроблено програмний комплекс "Інформаційно-аналітична система аналізу динаміки та прогнозування підтоплення сільськогосподарських угідь". Систематизовані дані Каховської гідрогеолого-меліоративної експедиції по Скадовському району Херсонської області і створена база даних [7, с. 80—82], на основі якої показана можливість проведення аналізу довгострокової та внутрішньорічної динаміки підтоплення сільськогосподарських угідь, вивчення закономірностей формування еколого-меліоративного стану зрошуваних земель, зокрема такого важливого показника, як глибина залягання РГВ, а також ситуаційне прогнозування даного показника на наступний рік. Базу знань складають алгоритми побудови гістограм за абсолютними значеннями площ, в частках одиниці площ, в накопичуваних частках та за зонами ризику.

За результатами конкретного дослідження проведено класифікацію об'єктів даного району. Виділено п'ять прототипів класів як найбільш характерних типів розвитку багаторічної динаміки підтоплення групи об'єктів. Об'єкт відноситься нами до певного класу за мінімальним значенням міри близькості до кожного з класів.

Прогнозування підтоплення земель на основі марківських моделей. Для реалізації задачі ситуаційного прогнозування процесів підтоплення сільськогосподарських угідь розроблена системна макромодель, що базується на побудові дискретного ланцюга Маркова, як інструментарію оцінки та прогнозування ризиків.

У відповідності до ситуації ***ц***, що визначається зовнішнім впливом $V(U, \theta)$, для прогнозування екологічного процесу використовуються відповідні прогностичні системи $\sum_k$ — ланцюги Маркова, що описуються відповідними до ситуації *ц* ймовірностями переходу $P_{ij}^k(t)$, $i, j \in [1,4]$,

$$\sum = \sum_k, \text{ якщо } V_k(U,\theta) \subseteq V(U,\theta),\ k = 1,...,K_i. \qquad (1)$$

Імовірності переходу $P_{ij}(t)$ в кожний момент часу t в складних системах можуть суттєво залежати від зовнішнього середовища $V = V(U, \theta)$,

тобто від управлінських дій особи, яка приймає рішення, що характеризуються величиною U, та від стохастичних впливів природи θ в даний момент часу. Отже, структура системи $\sum$ є функцією зовнішнього середовища $\sum = \sum(V)$. При цьому здійснюється класифікація зовнішніх впливів (побудова ситуацій u) за поділом $V(U, \theta)$ на підмножини:

$$\varphi(V) = \begin{cases} I, & \text{якщо } V(U,\theta) \subseteq V_1(U,\theta); \\ II, & \text{якщо } V(U,\theta) \subseteq V_2(U,\theta); \\ III, & \text{якщо } V(U,\theta) \subseteq V_3(U,\theta); \\ IV, & \text{якщо } V(U,\theta) \subseteq V_4(U,\theta). \end{cases} \tag{2}$$

Ідентифікація ймовірностей переходу $P_{ij}(t)$ в моделі прогнозування для конкретного об'єкту здійснюється стосовно заданої ситуації $u(V)$ на основі статистичних оцінок даних багаторічних спостережень даного об'єкта чи об'єктів-аналогів або експертних оцінок.

Для класифікації початкових станів марківської системи $\sum$ використовується шкала відносних ризиків P_i / P_{max}, на основі якої початкові стани визначаються співвідношеннями:

$$f\left(\frac{P_i}{P_{\max}}\right) = \begin{cases} 4, & \text{якщо } \dfrac{P_i}{P_{\max}} \geq l_4^{\min}; \\ (3,4), & \text{якщо } l_3^{\max} < \dfrac{P_i}{P_{\max}} < l_4^{\min}; \\ 3, & \text{якщо } l_3^{\min} < \dfrac{P_i}{P_{\max}} < l_3^{\max}; \\ (2,3), & \text{якщо } l_2^{\max} < \dfrac{P_i}{P_{\max}} < l_3^{\min}; \\ 2, & \text{якщо } l_2^{\min} < \dfrac{P_i}{P_{\max}} < l_2^{\max}; \\ (1,2), & \text{якщо } l_1^{\max} < \dfrac{P_i}{P_{\max}} < l_2^{\min}; \\ 1, & \text{якщо } \dfrac{P_i}{P_{\max}} < l_1^{\max}. \end{cases} \tag{3}$$

Якщо відношення P_i / P_{max} попадає в інтервал, що однозначно визначає стан системи $\sum$, то початкова імовірність даного стану $P_i(t) = 1$. Початкові імовірності знаходження системи $\sum_i$ в одному із проміжних станів (k, j) визначаються "близькістю" до кожного з проміжних станів за формулами:

- в k-му стані

$$P_k(t) = \frac{\frac{P_i}{P_{\max}} - l_k^{\max}}{l_j^{\min} - l_k^{\max}}, \quad (4)$$

- в *j*-му стані

$$P_j(t) = \frac{l_j^{\min} - \frac{P_i}{P_{\max}}}{l_j^{\min} - l_k^{\max}}. \quad (5)$$

В залежності від ситуації u_i для прогнозування процесів підтоплення використовується один із дискретних ланцюгів Маркова, що описує імовірності переходів станів рівнів ґрунтових вод. Прогнозування здійснюється з кроком упередження один рік. Прогнозуються ймовірності стану системи у момент (t + 1) на основі ймовірностей стану системи у момент t (поточного року) з використанням суми опадів і поливів, що відповідають ситуації u_i для прогнозного року (t + 1).

Оцінка ризиків забруднення повітря та ґрунтів басейну малої ріки на основі матриць гри з природою. Крім якості водних ресурсів екологічний стан басейну малої ріки визначається рівнем забруднення повітря та ґрунтів, особливо, якщо територія знаходиться в зоні впливу великих промислових підприємств та автотранспортних магістралей. Контроль забруднення повітря здійснюється в умовах невизначеності та ризику, що характерно для оцінки впливу різних погодних умов. Для оцінки відносного внеску різних джерел в загальне забруднення повітря запропоновано ефективні критерії і методи комплексної багатокритеріальної оцінки сумарного забруднення повітря [5, с. 283—286]. В розробленій моделі гри з природою прийняття рішень здійснюється як з використанням елементів класичних критеріїв, так і зведенням багатокритеріальних задач до єдиного безрозмірного показника, по величині якого можна порівнювати джерела і рівні забруднення повітря в просторі і часі.

В умовах дії кількох показників забруднення повітря для комплексної санітарно-гігієнічної оцінки забруднення використовується узагальнений критерій

$$U_в = K_1 \frac{U_1}{ГДК_1} + K_2 \frac{U_2}{ГДК_2} + \ldots + K_m \frac{U_m}{ГДК_m}, \quad (6)$$

де U_i, $ГДК_i$ — виявлені концентрації інгредієнтів в газових викидах підприємств в атмосферу і їх гранично-допустимих концентрацій (ГДК), K_i — ваговий коефіцієнт i-го інгредієнта забруднення.

У випадку кількох показників (багатокритеріальна стохастична задача) санітарно-гігієнічна ситуація прийняття рішень в умовах невизначеності оцінюється матрицями гри з природою: $\{X, \theta, F^1\}$,

$\{X, \theta, F^2\}$, ... , $\{X, \theta, F^l\}$, де $X=\{x_1, x_2, ..., x_m\}$ — множина точок спостереження, розташованих на різних відстанях від джерела забруднень (є стратегіями активного гравця); $\theta = \{\theta_1, \theta_2, ..., \theta_n\}$ — різні моменти спостереження в часі (є стратегіями природи); $F^i = \{f_{jk}\}$, $i = \overline{1,l}$, $j = \overline{1,n}$, $k = \overline{1,m}$ — матриці оціночних функціоналів, що виражають концентрації забруднень за і-м показником в точці спостереження $x_\kappa \in X$ в момент часу $\theta_j \in \theta$, тобто $f_{jk} = f(\theta_j, x_k)$.

Таким чином, в розгорнутій формі ситуація прийняття рішень характеризується системою матриць $F^i(x, \theta)$

$$F^i(x,\theta) = \begin{array}{c|cccc} & x_1, & x_2, & ..., & x_m \\ \theta_1 & f_{11} & f_{12} & ..., & f_{1m} \\ \theta_2 & f_{21} & f_{22} & \cdots, & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_n & f_{n1} & f_{nk} & \cdots, & f_{nm} \end{array}, \text{ де } i = 1,... , l. \qquad (7)$$

В умовах повної невизначеності, якщо немає підстав вважати один із станів середовища θ_j більш імовірним, ніж будь-який інший стан із даного середовища, апріорні ймовірності p_j станів середовища потрібно вважати рівними, тобто у вигляді $p_j = 1 / n$, $j \in [1, n]$. В такому випадку застосовується критерій Бернуллі-Лапласа:

$$F_1(x_k) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} f_{jk}, \; k = 1,\ldots,m, \qquad (8)$$

де m — число точок контролю стану забруднення повітря.

В санітарно-гігієнічних дослідженнях виявляються найнесприятливіші умови природи, на які і приймаються рішення в залежності від "реалізації" середовища. Вони становлять найбільшу небезпеку для здоров'я населення промислових комплексів і великих міст. Розкриття невизначеності на найнесприятливіші умови природи здійснюється з використанням операції знаходження максимуму (як у критерії Севіджа):

$$F_2(x_k) = \max_{\theta_j \in \theta} f_{jk}, \; k = 1,...,m. \qquad (9)$$

Проте в багатьох випадках застосування найбільш обережної стратегії є не тільки песимістичним по своїй природі, а й жорстким і негнучким. Тому доцільно модифікувати ("байєсифікувати") систему розкриття невизначеності на першому етапі з використанням критерію Ходжеса-Лемана, який є деяким компромісом між критерієм Байєса і критерієм Севіджа в ситуації прийняття рішень $\{X, \theta, F\}$.

$$F_3(x_k) = \lambda \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} f_{jk} + (1-\lambda)\max_{\theta_j \in \theta} f_{jk}, \; k = 1,\ldots, m. \qquad (10)$$

Звівши таким чином стохастичну задачу для кожної матриці гри з природою до детермінованої, на другому етапі в задачі контролю забруднення повітря необхідно оцінити за системою детермінованих критеріїв не одну оптимальну стратегію, а множину раціональних стратегій. Санітарно-гігієнічні ситуації в точках спостережень $x_к \in X$ доцільно оцінювати за відношенням середніх значень $F_i(x_k), i = \overline{1,3}$, до тієї чи іншої зони ризику.

$$f\left(F_i\left(x_k\right)\right) = \begin{cases} I - \text{надзвичайно небезпечна ситуація, якщо } F_i\left(x_k\right) \geq 2; \\ II - \text{небезпечна ситуація, якщо } 1 \leq F_i\left(x_k\right) < 2; \\ III - \text{малонебезпечна ситуація, якщо } 0,3 \leq F_i\left(x_k\right) < 1; \\ IV - \text{безпечна ситуація, якщо } F_i\left(x_k\right) < 0,3; \end{cases} \quad (11)$$

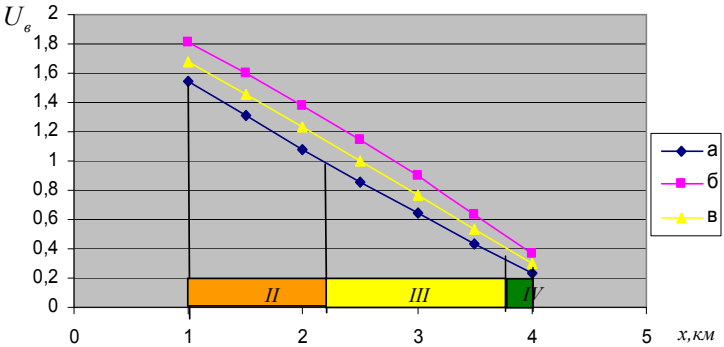

Рис. 3. *Залежність сумарної відносної концентрації забруднення від точок спостереження: а — за критерієм Бернуллі-Лапласа; б — за критерієм Севіджа; в — за критерієм Ходжеса-Лемана*

Приклад оцінки стану навколишнього середовища в умовах невизначеності та ризику в підсистемі забруднення басейну малої ріки. Для оцінки стану навколишнього середовища використані дані спостережень за основними показниками забруднення повітря ВАТ "РівнеАЗОТ" (NH_3, NO_2, CO), які були представлені у вигляді матриць гри з природою (7) з нормованими значеннями відносно ГДК.

Багатокритеріальна задача в умовах невизначеності зводилась до однокритеріальної задачі в умовах невизначеності з використанням критерію згортки (6). Розкриття невизначеності проводилось за критеріями (8—10) (при $\lambda = 1/2$). Одержані залежності, наприклад, для 4 кварталу 2003 року (рис. 3) показують, що з віддаллю відповідні показники сумарних відносних концентрацій спадають. На віддалі до 4-ох км до джерела забруднення наявні 3 зони ризику (небезпечна — II, малонебезпечна — III та безпечна — IV).

Висновки. Запропоновані методи розрахунку ризиків в інформаційно-аналітичній системі оцінки стану басейну малих річок дозволяють: оцінювати динаміку ризиків підтоплення земель на основі побудови гістограм розподілу площ рівнів ґрунтових вод; проводити ситуаційне прогнозування підтоплення сільськогосподарських угідь за системною макромоделлю, що базується на ідентифікації дискретного ланцюга Маркова; оцінювати санітарно-гігієнічні ситуації ризику забруднення повітря з використанням моделей гри з природою.

Список використаних джерел:

1. Методика розрахунку антропогенного навантаження і класифікації екологічного стану басейнів малих річок України / А. В. Яцик, Л. Б. Бишовець, О. М. Петрук та ін. — К. : Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Держводгосп України, УНДІВЕП, 2007. — 71 с.
2. Ковальчук П. І. Реалізація екосистемного підходу до класифікації та прогнозування якості водних ресурсів малих річок / П. І. Ковальчук, О. С. Демчук // Збірник наукових праць. "Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво". — Рівне, 2006. — Вип. 31.
3. Ковальчук П. І. Прийняття рішень в підсистемі "Використання земель" інформаційно-аналітичної системи оцінки екологічного стану малих річок в умовах невизначеності та ризику / П. І. Ковальчук, О. С. Демчук, О. В. Бобер // Вісник НУВГП, присвячений 85-річчю НУВГП. — Рівне, 2007. — Вип. 4 (40), ч. 1.
4. Ковальчук П. І. Система аналізу антропогенного навантаження і класифікації екологічного стану малих річок України / П. І. Ковальчук, О. С. Демчук, О. М. Стаднічук // Вісник НУВГП : збірник наукових праць. — Рівне, 2005. — Вип. 3 (31).
5. Ковальчук П. І. Прийняття рішень в системах автоматизованого контролю навколишнього середовища в умовах невизначеності та ризику / П. І. Ковальчук , О. С. Демчук, Я. І. Романчук // Вісник НУВГП. — Рівне, 2006. — Вип. 3 (35)
6. Демчук О. С. Моделювання ризиків затоплення земель в басейні малої ріки / О. С. Демчук // Вісник НУВГП. – Рівне, 2009. — Вип. 3 (47).
7. Ковальчук П. І. Статистичне моделювання динаміки площ з різними рівнями ґрунтових вод / П. І. Ковальчук , Т. О. Михальська , О. М. Марків, О. С. Демчук // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції Актуальні проблеми та перспективи розвитку водного господарства і меліорації земель. — Херсон, 2009.

In informational and analytical system of the small rivers' ecological condition estimation the methods of risks modelling on the basis of likelihood and statistical estimations, formalization of models of game with nature, risk modelling and forecasting processes flooded lands using Markov chains are offered, multicriteria models of risks are considered.

Key words: *system model, river pool, risks modelling, decision making under uncertainties, models of games with the nature, Markov chains.*

Отримано: 20.09.2012