

УДК 004.65+519.6

В. Ю. Балачук; В. Б. Мокін, д. т. н., проф.; А. Р. Ящолт, к. т. н., доц.

## ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ, ПРЕДСТАВЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ З ГЕОМЕТРИЧНОЮ МЕРЕЖЕЮ

*Проведено аналіз основних наявних підходів до оцінювання екологічних ризиків. Здійснено формалізацію кодування ділянок річок у розгалуженій річковій мережі. Виведено співвідношення для оцінювання очікуваного екологічного ризику замикальної ділянки річки. Приведено приклад розрахунку очікуваного екологічного ризику.*

**Ключові слова:** екологічні ризики, якість поверхневих вод, оцінка екоризиків, моделювання екоризиків, екологічна мережа.

На сьогодні досить гостро стоїть проблема управління екологічною безпекою. Це пов'язано із загостренням екологічних проблем на території України і, як наслідок, погіршенням умов життєдіяльності, стану здоров'я населення. Актуальним є вдосконалення моделей та можливостей геоінформаційних технологій у завданнях управління екобезпекою, природокористуванням та заходами під час надзвичайних ситуацій.

Проблеми забруднення водних ресурсів, водокористування, імовірність виникнення різних надзвичайних ситуацій, пов'язаних із цими проблемами, роблять актуальними різні методи та технології оптимального управління екологічною безпекою об'єктами водної мережі.

Для оцінювання екологічного ризику необхідно спочатку здійснити моделювання процесів зміни стану поверхневих вод у басейні річки. Для цього річкову систему варто розглядати в цілому як геометричну мережу.

Розглядаючи річкову систему (РС) як геометричну мережу (ГМ), можна також розв'язувати такі завдання, як: визначення зміни якості (кількості) води після встановлення скиду (водозабору) на певній ділянці, визначення впливу природних чинників (опаді, випаровування) на кількість води, визначення можливості побудови водозабору на ділянці річки залежно від якості води та багато інших.

Отже, доцільно розглядати РС саме як ГМ, при чому для більш оперативного, комплексного та наочного аналізу даних для оцінювання екобезпеки (екоризиків) використовувати спеціалізовані ГІС.

### Постановка задачі

На сьогодні існує багато підходів та методів оцінювання екологічних ризиків. Розглянемо їх відповідно до таких критеріїв: ті, що враховують стан екосистем, зони надзвичайної екологічної ситуації, рівні забрудненості водних об'єктів, стан забрудненості річок, загальний індекс забрудненості.

За однією із методик екологічний ризик для водних екосистем визначають як [1]:

$$P_G^c = f(G_v \langle v = \overline{1, N_G} \rangle, H_{Gm} \langle m = \overline{1, N_{HG}} \rangle), \quad (1)$$

де  $G_v$  – сучасний стан водних екосистем;  $H_{Gm}$  – інтегральна оцінка сучасного рівня антропогенного тиску під дією негативних чинників на водні екосистеми за  $v$ -м показником.

У роботі [1] подано визначення поняття «екологічний ризик для поверхневих вод» як імовірність небажаних наслідків для водних екосистем і їхніх компонентів унаслідок дії антропогенних і природних чинників, серед яких погіршення якості води. Екологічний ризик для водних екосистем визначають за формулою (1). Така оцінка є узагальненою і призначена для визначення стану регіонів, басейнів річок або їхніх частин, де існує загроза небажаних

наслідків для водних екосистем, серед яких їхні деградації, за умови збереження існуючих тенденцій антропогенного тиску [2].

Одним із підходів до оцінювання екологічної безпеки є виявлення вже сформованих зон надзвичайної екологічної ситуації та екологічного лиха. Цю процедуру здійснюють за хімічними та екологічними показниками.

Для сукупної оцінки небезпечних рівнів забруднення водних об'єктів під час визначення зон надзвичайної екологічної ситуації та екологічного лиха запропоновано використовувати формалізований сумарний показник хімічного забруднення (ПХЗ-10) [3]. Цей показник особливо важливий для територій, де забруднення хімічними речовинами спостерігається відразу декількома речовинами, кожна з яких багаторазово перевищує допустимий рівень (гранично допустиму концентрацію (ГДК)).

Розрахунок ПХЗ-10 проводять за десятьма сполуками, що максимально перевищують ГДК, за формулою [3]:

$$ПХЗ - 10 = \left( \frac{C_1}{ГДК_1} + \frac{C_2}{ГДК_2} + \dots + \frac{C_{10}}{ГДК_{10}} \right), \quad (2)$$

де  $C_i$  – концентрація  $i$ -ої забруднювальної речовини у воді;  $ГДК_i$  – рибогосподарське ГДК  $i$ -ої ЗР у воді.

Ще одним досить поширеним методом оцінювання екобезпеки є визначення рівня забруднення за узагальненим показником індексу забрудненості ( $I_s$ ), що дорівнює [3]:

$$I_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (3)$$

Як бачимо, формула (3) перетворюється на (2) за  $n = 10$ .

Розглянемо ще один метод визначення екологічного ризику *Risk*. Для цього використовують формули [4]:

$$Risk = -\ln(P), \quad (4)$$

де 
$$P = \frac{\sum n_i}{N}, \quad (5)$$

де 
$$\sum n_i = \sum \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (6)$$

де  $C_i$  – концентрація  $i$ -ої забруднювальної речовини (ЗР), яка перевищує  $ГДК_i$  (ЗР, які не перевищують ГДК, у формулу (6) не підставляють);  $N$  – загальна кількість ЗР, які аналізують (і ті, що перевищують їхню ГДК, і ті, що не перевищують).

Наведені формули, як правило, застосовують для аналізу даних у статичі, а не в динаміці, на основі обробки великої кількості даних спостережень. Наприклад, якщо на певній ділянці стався аварійний скид стічних вод і підвищилось забруднення річки, то це повинно автоматично підвищувати екологічний ризик як на цій же ділянці річки, так і на тих ділянках, які розташовані нижче за течією, навіть якщо забруднення туди ще не дійшло. Запропонуємо для розв'язування цієї задачі спеціальний математичний апарат, який ґрунтується на представленні басейну річки як графа, тобто у вигляді геометричної мережі. По суті, цей апарат повинен надавати можливість оцінювання очікуваних екологічних ризиків на ділянках річки в динаміці внаслідок суттєвих змін якості води в річці вище за течією.

### Формалізація кодування ділянок річок у розгалуженій річковій мережі

У роботі [5] була запропонована декомпозиція річки на елементарні ділянки (ЕД) за двома критеріями: 1) кожна з ЕД має не більше одного просторово зосередженого входу стічних чи

приточних вод (рис. 1); 2) кожна ЕД має приблизно однакові характеристики фізико-біохімічних самоочисних процесів. На рис. 1 зображено  $i$ -ту ЕД.

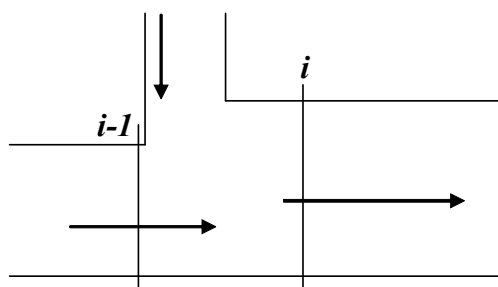


Рис. 1. Схема  $i$ -ї елементарної ділянки річки, на яку надходять стічні чи приточні води

Оцінюючи екологічні ризики, як правило, поділ річки на ЕД здійснюють у такий спосіб, щоб на початку кожної ЕД був створ (пост) контролю якості поверхневих вод. Такий підхід до декомпозиції не суперечить наведеному вище, оскільки ці створи розташовують саме в місцях, де або в річку впадає притока, або є скид стічних вод, або суттєво міняється якість вод (є пороги або уповільнена русловим водосховищем течія, або ін.).

Отже, стоїть задача кодування таких ЕД. Існує чимало відомих підходів до кодування. Наприклад, у системі 2-ТП (водгосп), яку використовують для державного обліку водокористування в Україні і яка складається з підходів до кодування, закладених ще в радянські часи, річки кожного регіону мають багаторівневу структуру [6]. Є річки нульового рівня, які не впадають у жодну іншу річку і впадають одразу в море. Річки першого рівня впадають у річки нульового і т. і. Кодування річки нульового рівня починають з його умовної скороченої назви типу «П. Буг» чи «Дніпро». Кодування приток цієї річки формується з відстаней у кілометрах від гирла річки нульового рівня до місця впадіння в неї цієї притоки. Завдяки цій деревоподібній багаторівневій структурі, з'являється можливість точно ідентифікувати річку на карті (недоліком є тільки те, що таке кодування має точність 0,5 км і не враховує: річка є правою чи лівою притокою, тому іноді виникають неоднозначності, коли порівнюють це кодування з картою). Це кодування враховує 7 рівнів приток річок і має 8 секцій: назву головної річки і 4-значний кілометраж упадіння. Якщо річка є притокою, наприклад, 2-го порядку, тобто притокою притоки головної річки, тоді вона міститиме назву головної річки, кілометраж упадіння в неї притоки 1-го порядку, кілометраж упадіння в цю притоку, а в усіх інших секціях будуть стояти нулі. Приклад фрагмента (початкові секції кодування) відповідної таблиці форми 2-ТП "Водгосп" подано на рис. 2.

П.БУГ	0395	0044	0000
-------	------	------	------

Рис. 2. Кодування притоки 2-го порядку р. Південний Буг

Тобто, річка на 44-му кілометрі впадає в річку, яка на 395-му кілометрі впадає в р. Південний Буг.

Таке кодування є зручним для розрахунків (одразу є довжина всіх ЕД між впаданням річкових приток в одну річку та відстань, яку долають ЗР від місця впадіння до гирла основної річки), але воно є незручним для позначення відповідних характеристик ЕД у формулах і співвідношеннях. Для таких позначень зручнішим буде кодування фіксованою кількістю цифр.

Пропонуємо кожен  $i$ -ту ЕД річок кодувати в такий спосіб:

$$i = k_{1i} k_{2i} k_{3i}, \quad (7)$$

де  $k_{1i}$  – порядок (рівень) річки, на якій розташована  $i$ -та ЕД: 0 – головна (чи основна) річка, 1 – притока головної річки, 2 – притока цієї притоки та ін.;  $k_{2i}$  – порядковий номер притоки  $k_{1i}$ -го рівня, на якій розташована  $i$ -та ЕД, на річці  $(k_{1i}-1)$ -го рівня (для головної річки  $k_{2i} = 0$ ),

рахуючи від гирла останньої;  $k_{3i}$  – порядковий номер елементарної ділянки на річці  $k_2$ -го рівня, рахуючи від її гирла.

Число  $k_1$  – це, як правило, одна цифра. Зрозуміло, що таке кодування допускає максимум 9 рівнів, чого цілком достатньо для кодування гідрологічної мережі.

Числа  $k_2$  та  $k_3$  можна кодувати одно-, дво- та навіть тризначними комбінаціями цифр залежно від їхніх максимальних значень. Але якщо згадати, що таке кодування має застосовуватися для кодування ЕД та розрахунку екологічних ризиків (відповідно до чого, кожна ЕД повинна мати один створ спостережень якості води), то це означає, що для їхнього кодування в більшості випадків буде достатньо 1 – 2 цифр.

Варто зазначити, що головна (чи основна) річка, тобто річка 0-го рівня — це не обов'язково річка, яка впадає в море, як у системі 2-ТП (водгосп) (див. рис. 4.2). Як правило, це — річка, на якій розташована замикальна ЕД, екологічний ризик якої належить розрахувати. За цих умов (у більшості випадків) буде достатньо застосовувати кодування (7) із трьох цифр: по одній цифрі на кожний тип коду.

Проілюструємо це кодування на прикладі річки з притоками 1-го і 2-го порядку:  
– для основної річки:

$$0 0 p_3, \quad (8)$$

де  $p_3$  – порядковий номер ЕД на основній річці;

– для приток основної річки:

$$1 p_2 p_3, \quad (9)$$

де  $p_2$  – порядковий номер притоки основної річки;  $p_3$  – порядковий номер ЕД на притоці;

– для приток на притоці основної річки:

$$2 p_2 p_3, \quad (10)$$

де  $p_2$  – порядковий номер притоки на притоці основної річки;  $p_3$  – порядковий номер ЕД на цій притоці.

Приклад схеми геометричної мережі такої річкової системи наведено на рис. 3.

Отже, спочатку необхідно визначити екологічний ризик для кожної окремої ЕД, а після цього вже визначити його очікуване значення для замикальної ділянки основної річки з урахуванням екоризиків ЕД і приток, розташованих вище за течією. При цьому слід ураховувати час проходження води від однієї ЕД до іншої. Усереднений час  $t_i$  проходження води від початку до кінця  $i$ -ої ЕД легко розрахувати за формулою:

$$t_i = \frac{L_i}{v_i}, \quad (11)$$

де  $L_i$  – довжина  $i$ -ої ЕД, обчислена уздовж лінії усередненої течії річки (як правило, усередині фарватеру), м;  $v_i$  – середня (або максимальна) швидкість течії річки, обчислена уздовж лінії усередненої течії річки (як правило, усередині фарватеру), м/с.

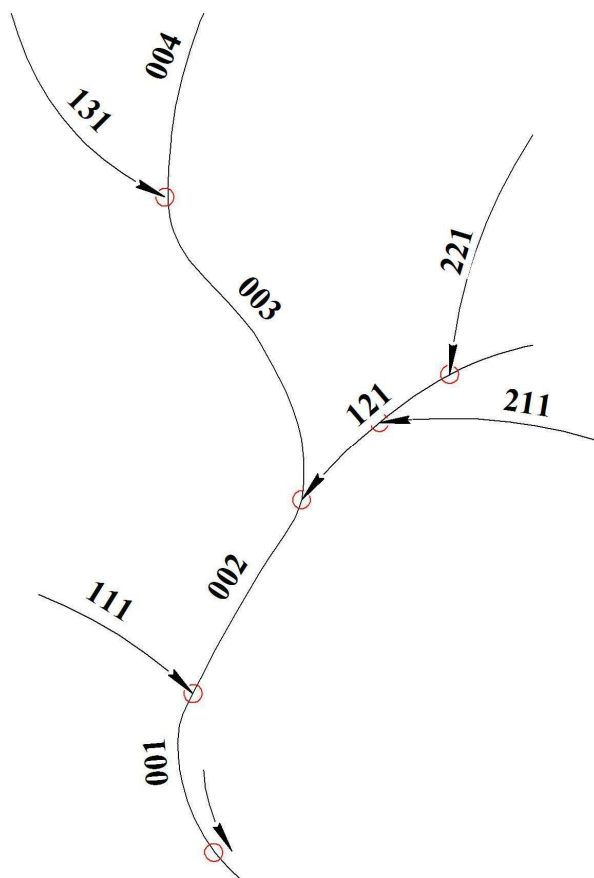


Рис. 3. Приклад схеми декомпозиції геометричної мережі річкової системи з кодами елементарних ділянок, сформованих у місцях впадання приток у річки

При цьому загальний час  $T_i$  проходження води від початку  $i$ -ої ЕД до гирла річки дорівнюватиме сумі таких параметрів для кожної із ЕД від  $i$ -ої до останньої ( $N$ -ої):

$$T_i = \sum_{j=i}^N t_j. \quad (12)$$

Запропонуємо математичний апарат розрахунку очікуваного екологічного ризику замикальної елементарної ділянки (код 001) внаслідок надходження забруднення на ЕД, розташовану і вище за течією, використовуючи запропоноване кодування ЕД та систему позначень.

#### Виведення співвідношення для оцінювання очікуваного екологічного ризику замикальної ділянки річки

Як було зазначено вище, очікуваний екологічний ризик є екологічним ризиком, який з'являється внаслідок негативного впливу стану води річок (чи скидів), розташованих вище за течією. Ураховуючи запропоновану вище декомпозицію річкової системи можна стверджувати, що очікуваний екоризик слід обчислювати ітеративно, переходячи від річки до річки, від ЕД до ЕД. Спочатку слід вирахувати екоризик у замикальному створі кожної притоки, яка має більше однієї ЕД чи, у свою чергу, має свої притоки. Потім вирахувати вплив цього замикального створу на ЕД, розташовані нижче за течією, і т. інш. Наприклад, для схеми на рис. 3 можна запропонувати такий алгоритм розрахунку:

ЕД 221 і ЕД 211 → ЕД 121

ЕД 004 і ЕД 131 → ЕД 003

ЕД 003 і ЕД 121 → ЕД 002

ЕД 002 і ЕД 111 → ЕД 001.

Нагадуємо, що загалом відстань між місцями впадання декількох приток можна розбивати ще на декілька ЕД.

Розглянемо узагальнений випадок розрахунку, коли річкова система має  $N$  ЕД. Відповідно на екоризик у замикальній  $N$ -й ЕД на головній річці впливає екоризик  $(N-1)$ , розташованих вище ЕД. Нехай для всіх цих ЕД річкової системи розраховано екологічний ризик  $r_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) за однією із формул чи методик, описаних вище, чи ін. Стоїть задача розрахувати очікуваний екологічний ризик  $R$  у замикальній ЕД головної річки з урахуванням екоризиків ЕД, розташованих вище за течією, та відстаней від початкових створів цих ЕД до початкового створу замикальної ЕД.

Математичний апарат будуюмо на таких припущеннях та обмеженнях:

1. Уплив екологічного ризику  $i$ -ої ЕД на  $N$ -ну ЕД зворотно пропорційний тривалості добігання води  $T_i$  від  $i$ -ої ЕД до гирла (кінцевого створу  $N$ -ої ЕД), тобто, чим далі розташована ЕД від замикальної, тим менший її вплив, але цей вплив усе одно є;

2. Очікуваний екологічний ризик  $N$ -ої ЕД  $R$  розраховують як середньозважене значення екоризиків усіх ЕД  $r_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), віднесене до відповідних значень часу добігання  $T_i$ ;

3. Навіть у разі, якщо екоризик на всіх ЕД дорівнюватиме 1, то  $R$  не може перевищувати 1 (за визначенням);

4. У разі, якщо екоризик на всіх ЕД дорівнюватиме 0, то  $R$  повинно теж дорівнювати 0.

З урахуванням цих обмежень і припущень пропонуємо такий вираз для обчислення екоризику ЕД розгалуженої системи річки з урахуванням впливу стану вод на ЕД, розташовану вище за течією:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha \cdot r_i}{T_i}}{N}, \quad (13)$$

де  $\alpha$  – це спеціальний коефіцієнт для задовільнення умови 3, який розраховують із співвідношення:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha \cdot 1}{T_i}}{N} = 1.$$

Легко показати, що:

$$\alpha = \frac{N \prod_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_j}. \quad (14)$$

Наприклад, у разі  $N = 3$ :

$$\alpha = \frac{3T_1T_2T_3}{T_2T_3 + T_1T_3 + T_1T_2}. \quad (15)$$

Продемонструємо коректність та ефективність запропонованого математичного апарату на прикладі.

**Приклад автоматизованої обробки результатів виконання вимірювань параметрів вод**

Проведемо розрахунок очікуваного екологічного ризику для річкової системи, що має  $N = 6$  ЕД з довжинами  $L_i$ , що дорівнюють відповідно  $L_1 = 10$  м,  $L_2 = 20$  м,  $L_3 = 30$  м,  $L_4 = 50$  м,  $L_5 = 60$  м,  $L_6 = 70$  м. Швидкість течії  $v_i = 0,5$  м/с.

Розглянемо декілька варіантів за різних значень ризиків кожної ЕД.

Для розрахунку використаємо середовище Mathcad. У першому варіанті проведемо розрахунок для таких значень:  $r_1=1$ ;  $r_2=0.9$ ;  $r_3=0$ ;  $r_4=0$ ;  $r_5=0.8$ ;  $r_6=0.9$ . Аналогічно виконаємо розрахунки для інших значень  $r_i$ , їхні значення та результати приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результат розрахунку очікуваного екологічного ризику

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_1$	1	0	1	0.5	0.1	0.9	1	0
$r_2$	0.9	0	1	0.5	0.2	0.8	1	0.2
$r_3$	0	0	1	0.5	0.3	0.7	0	0.4
$r_4$	0	0	1	0.5	0.4	0.6	0	0.6
$r_5$	0.8	0	1	0.5	0.5	0.5	1	0.8
$r_6$	0.9	0	1	0.5	0.6	0.4	1	1
$R$	0.731	0	1	0.5	0.234	0.766	0.772	0.269

Отже, після отримання результатів бачимо, що всі обмеження для  $R$ , описані вище, виконані.

Також можна зробити висновок, що  $R$  має значно більше значення у випадках, коли  $r_i$  більше на початкових ділянках, ніж на кінцевих, тому особливо важливо контролювати значення ризику на ЕД на початку річкової системи.

### Висновки

Запропоновано новий підхід для оцінювання очікуваного екологічного ризику на замикальній ділянці розгалуженої річки, який, на відміну від наявних, ураховує вплив скидів та якості води у притоках річки на ділянках, розташованих вище за течією в басейні цієї річки. Запропонований підхід може бути застосований не тільки для річкових, а й для інших природних систем, які можна представити у вигляді інформаційних моделей з геометричними мережами. Також можливим є застосування підходу для екологічних мереж або для моделювання екологічних ризиків від забруднення атмосферного повітря, що дасть можливість точніше оцінити очікувані екологічні ризики.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жукинский В. Н. Экологический риск и экологический ущерб качеству поверхностных вод: актуальность, терминология, количественная оценка / В. Н. Жукинский // Вод. ресурсы. – 2003. – Т. 30, № 2. – С. 213 – 321.
2. Ишук А. А. Прогнозно-моделирующие комплексы для Правительственной информационно-аналитической системы по чрезвычайным ситуациям / А. А. Ишук, В. Е. Козлитин [та інші] // ArcReview. Современные геоинформационные технологии. – 2002. – № 2 (21). – С. 14 – 15.
3. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия [Электронный ресурс] / Министерства природных ресурсов РФ. (Методика от 30.11.1992 г.). – Режим доступа: [http://www.businesspravo.ru/Docum/DocumShow\\_DocumID\\_10592\\_DocumIsPrint\\_Page\\_1.html](http://www.businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_10592_DocumIsPrint_Page_1.html).
4. Алымов В. Т. Техногенный риск: Анализ и оценка / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2005. – 118 с.
5. Мокін В. Б. Математичні моделі та програми для оцінювання якості річкових вод: монографія. / В. Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 152 с.
6. Комп'ютеризовані регіональні системи державного моніторингу поверхневих вод: моделі, алгоритми, програми: Монографія / [Мокін В. Б., Боцула М. П., Горячев Г. В. та інші.] ; під ред. В. Б. Мокіна. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, – 2005. – 310 с.

**Балачук Вікторія Юрійвна** – аспірант кафедри КЕЕМІГ

**Мокін Віталій Борисович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри КЕЕМІГ,

**Яцолт Андрій Русланович** – к. т. н., доцент кафедри КЕЕМІГ.

Вінницький національний технічний університет.