

**ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ
З УРАХУВАННЯМ РИЗИКУ НЕВИКОРИСТАНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ НА ПІДСТАВІ
ПОПАРНОГО ПОРІВНЯННЯ АЛЬТЕРНАТИВ**

Ю.Д. СТЕФАНИШИНА-ГАВРИЛЮК, Д.В. СТЕФАНИШИН

Анотація. Обґрунтовано необхідність урахування ризику невикористаних можливостей як складової повного ризику під час прийняття рішень у природокористуванні в умовах ризику. Сформульовано загальні положення і правила та наведено принципові узагальнення — означення і твердження, що стосуються прийняття рішень у природокористуванні з урахуванням ризику невикористаних можливостей. Запропоновано функції повного ризику альтернатив у вигляді лінійних комбінацій, які поєднують системні (власні) ризики альтернатив та ризики невикористаних можливостей, де останні трактуються як виграшні ефекти альтернатив, що відкидаються. Сформульовано твердження про те, що множина оптимальних альтернатив за критерієм мінімального ризику як результат розв'язання задачі прийняття рішень з урахуванням ризику невикористаних можливостей збігається з множиною оптимальних альтернатив за критерієм максимальної корисності. Наведено способи визначення компонент повного ризику для заповнення таблиць рішень на підставі попарного порівняння альтернатив і запропоновано алгоритми вибору оптимальної альтернативи з урахуванням ризику невикористаних можливостей.

Ключові слова: альтернатива, оптимізація, прийняття рішень у природокористуванні, повний ризик, ризик невикористаних можливостей, системний ризик.

ВСТУП

Формальний підхід до прийняття рішень у природокористуванні передбачає порівняння варіантів (альтернатив) та вибір серед них оптимальних (квазі-оптимальних, компромісних тощо) [1–3].

Оскільки ефекти від природокористування реалізуються в майбутньому, то відповідні альтернативи оцінюються і порівнюються в умовах невизначеності. Для формалізації задачі прийняття рішення в умовах невизначеності використовується ризик як інструмент її розкриття і подолання.

Проблемами ризику у природокористуванні в різних його проявах (господарському, екологічному, в контексті раціонального природокористування і сталого розвитку територій тощо) у різні роки займалися такі відомі вчені, як М.М. Биченок, П.І. Бідюк, В.В. Вітлінський, Ю.Л. Забулонов,

М.З. Згуровський, А.Б. Качинський, М.О. Клименко, О.М. Ларічев, В.А. Лєгасов, Г.В. Лисиченко, Ц.Є. Мірцхулава, А.А. Музалєвський, Е.Мушик, П.Мюллер, Я.С. Наконечний, В.А. Ойгензихт, Н.Д. Панкратова, Б.Н. Порфірьєв, А.Ф. Реймерс, А.Ю. Ретеюм, І.В. Сергієнко, Г.А. Хміль, Н.В. Хохлов, А.С. Шапкін, Є.А. Яйлі, О.І. Ястремський, P.F. Ricci, W. Rowe, P. Slovic, C. Starr та інші. Однак, незважаючи на велику кількість різних інтерпретацій ризику, методів і моделей його аналізу й оцінювання [4–11], дотепер немає методів прийняття рішення в умовах ризику, які дозволяли б повною мірою враховувати взаємопов'язаність та взаємозалежність різних наслідків прийняття рішення, як негативних, так і позитивних, у контексті порівняння альтернатив та вибору серед них тих, що обтяжені меншим ризиком [12–14].

МЕТА РОБОТИ, ОБ'ЄКТ І ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасні національні стратегії екологічної і техногенної безпеки багатьох країн орієнтуються на концепцію прийняттого («ненульового», «майже досяжного мінімального» тощо) ризику в природокористуванні. При цьому і відмова від природокористування теж може бути пов'язана з ризиком, зокрема з ризиком невикористаних (утрачених) можливостей, коли суспільство, не використовуючи раціонально природних ресурсів, ризикує відстати у своєму поступальному розвитку.

Поняття ризику невикористаних можливостей не є новим, оскільки в багатьох прикладних завданнях ризик як атрибут прийняття рішень в умовах невизначеності визначається не тільки ймовірними негативними наслідками (збитками, шкодою тощо), а й відсутністю очікуваних позитивних результатів. Це означає, що не існує альтернатив, які б не були обтяжені ризиком. Вибираючи альтернативу з відсутніми негативними наслідками, носій рішення ризикує позитивним результатом, які дає альтернатива з наявними негативними наслідками. У контексті природокористування під ризиком невикористаних можливостей слід розуміти не тільки втрачені ймовірні вигоди (економічні та інші вигоди корисності), які можна отримати від використання природних ресурсів, а і зменшення негативних наслідків (збитків, шкоди, втрат), зменшення розмірів штрафних та інших санкцій від упровадження більш безпечних технологій тощо.

Мета роботи — подання моделей оцінювання повного (сукупного) ризику альтернатив з урахуванням як негативних, так і позитивних наслідків природокористування та методу прийняття оптимальних рішень з урахуванням ризику невикористаних можливостей на підставі попарного порівняння альтернатив.

Об'єктом досліджень є ризику як оцінні функції альтернатив, **предметом досліджень** — методи і моделі оцінювання повного ризику альтернатив та прийняття оптимальних рішень на підставі їх попарного порівняння з урахуванням ризику невикористаних можливостей.

ЗАГАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ПРИНЦИПОВІ УЗАГАЛЬНЕННЯ

Під прийняттям рішення надалі розумітимемо формалізовану процедуру порівняння альтернатив та вибору (алгоритм здійснення такого вибору) оп-

тимальної альтернативи з множини альтернатив, яку реалізує носій рішення [1–3].

У розглядуваному випадку прийняття рішення на підставі порівняння альтернатив являє собою попарне їх оцінювання та вибір однієї з них (оптимальної) $a_{i,\text{opt}}$ з деякої множини допустимих альтернатив \mathbf{A} . Будемо розглядати найбільш поширений на практиці випадок, коли є зліченна кількість допустимих альтернатив $a_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{0, n}$, де a_0 — відмова від рішення або «нульова альтернатива».

Умовимося, що кожна допустима альтернатива a_i однозначно визначається деяким результатом r_i , який допускає кількісну оцінку.

Визначимо результат r_i як ризик альтернативи a_i і шукатимемо альтернативу з найменшим його значенням, тобто метою вибору буде $\min r_i$.

Оптимальне рішення d_{opt} вибиратимемо за правилом

$$d_{\text{opt}} = \{a_{i,\text{opt}} \mid a_{i,\text{opt}} \in \mathbf{A} \wedge r_{i,\text{opt}} = \min(r_i)\}. \quad (1)$$

Кожній допустимій альтернативі a_i можуть відповідати різні зовнішні умови F_j і відповідні результати $r_{i,j}$. Нехай $r_{i,j}$ — оцінка ризику, що відповідає альтернативі a_i за умов F_j .

Відповідно сім'ю рішень можна подати таблицею (матрицею) рішень (рис. 1).

a_i	F_j						
	F_0	F_1	...	F_j	...	F_{m-1}	F_m
a_0	$r_{0,0}$	$r_{0,1}$	...	$r_{0,j}$	...	$r_{0,m-1}$	$r_{0,m}$
a_1	$r_{1,0}$	$r_{1,1}$	...	$r_{1,j}$	...	$r_{1,m-1}$	$r_{1,m}$
...
a_i	$r_{i,0}$	$r_{i,1}$	...	$r_{i,j}$	...	$r_{i,m-1}$	$r_{i,m}$
...
a_n	$r_{n,0}$	$r_{n,1}$	...	$r_{n,j}$	...	$r_{n,m-1}$	$r_{n,m}$

Рис. 1. Загальний вигляд таблиці рішень

Відповідно критерій вибору (1) набуде вигляду

$$d_{\text{opt}} = \{a_{i,\text{opt}} \mid a_{i,\text{opt}} \in \mathbf{A} \wedge r_{i,j,\text{opt}} = \min(r_{i,j})\}, \forall F_j, j = \overline{0, m}. \quad (2)$$

Вибір оптимального рішення згідно з критерієм (2) не є однозначним, оскільки мінімальний результат $\min r_{i,j}$ може досягатися на множині всіх результатів $\{r_{i,j}\}$ багаторазово.

Щоб дійти до однозначної і, по можливості, найвигіднішої альтернативи у випадку, коли різним альтернативам a_i відповідають різні зовнішні умови F_j , вводяться оцінні (цільові) функції.

Оскільки в оцінну функцію можна вкладати будь-який зміст, то охарактеризуємо наслідки альтернативних рішень комбінаціями результатів, що

відповідають обом порівнюваним альтернативам одночасно. При цьому множину альтернатив, з якими порівнюється кожна з досліджуваних альтернатив, будемо розглядати як множину зовнішніх умов, за яких здійснюється вибір.

Нехай \mathbf{A} — деяка (зліченна) множина попарно порівнюваних альтернатив $a_i, a_j, i, j = \overline{0, n}, i \neq j$, для яких задано невід’ємні значення деяких числових характеристик l_i, g_i і l_j, g_j , що в цілому описують програшні l та виграшні g їх якості відповідно.

Покладемо, що сукупний ризик кожної з припустимих альтернатив визначається можливими втратами (програшами) l , зумовленими цією альтернативою (капітальні затрати, операційні витрати, збитки, штрафи тощо), та відсутністю очікуваних позитивних результатів (виграшів) g , що можуть бути отримані з альтернативами. Розглянемо функції сукупного (повного) ризику, пов’язаного з вибором альтернативи $a_i \in \mathbf{A}, i = \overline{0, n}$, за умови існування альтернатив $a_j \in \mathbf{A}, j = \overline{0, n}, i \neq j$ у вигляді лінійних комбінацій:

$$r_{i,j} = l_i + g_j; i, j = \overline{0, n}; i \neq j. \quad (3)$$

Ризик $r_{i,j}$ у формі (3) можна витлумачити як ризик альтернативи a_i за умови, що носій рішення відмовляється від альтернативи a_j .

Таблиця рішень $\|r_{i,j}\|$ зводиться до n рядків (рис. 2), де кожній альтернативі a_i приписується $n-1$ результатів $r_{i,j}, i, j = \overline{0, n}; i \neq j$, які характеризують у цілому всі наслідки цього рішення з урахуванням ризику невикористаних можливостей. Зауважимо, що діагональ видозміненої таким чином таблиці рішень з n рядків з індексами $i = j$ при цьому не заповнюється, оскільки альтернативи не можуть порівнюватися самі з собою.

a_i	a_j						
	a_0	...	a_i	a_j	...	...	a_n
...
a_i	$r_{i,0}$	...		$r_{i,j}$	...	...	$r_{i,n}$
...

Рис. 2. Рядок оцінних функцій для альтернативи a_i

Назвемо величину $r_{i,j}$, яка є сумою програшу l_i за альтернативою a_i та виграшу g_j за альтернативою $a_j, r_{i,j} = l_i + g_j$, повним ризиком альтернативи a_i порівняно з альтернативою $a_j, i \neq j$.

Відповідно для альтернативи a_j порівняно з альтернативою a_i повний ризик $r_{j,i} = l_j + g_i$.

Модель сукупного (повного) ризику, пов’язаного з вибором кращої альтернативи, у вигляді (3) дозволяє для прийняття рішень згідно з критерієм (2) одночасно оперувати як програшними, так і виграшними ефектами, що характеризують альтернативи, які між собою порівнюються.

Згідно з виразами (3) для кожної альтернативи $a_i \in A$, $i = \overline{0, n}$, може задаватися $m = n - 1$ значень повного (сукупного, сумарного) ризику $r_{i,j}$, де n — загальна кількість допустимих альтернатив.

Складову l_i сукупного ризику $r_{i,j}$ альтернативи a_i в порівнянні a_i з альтернативою a_j , $i \neq j$, назовемо системним або власним ризиком альтернативи a_i .

Складову g_j , $j = \overline{0, n}$, $i \neq j$, альтернативи a_j в порівнянні a_i з альтернативою a_j , $i \neq j$, назовемо несистемним ризиком альтернативи a_i або ризиком невикористаних можливостей альтернативи a_i порівняно з альтернативою a_j .

Нехай існує альтернатива a_0 , для якої програш $l_0 = 0$ та виграш $g_0 = 0$. Назвемо альтернативу a_0 , для якої програш $l_0 = 0$ і виграш $g_0 = 0$, нульовою.

Твердження 1. Повний ризик нульової альтернативи порівняно з будь-якою іншою допустимою альтернативою з ненульовим виграшем $g_j \in$ ризиком невикористаних можливостей, який дорівнює цьому виграшу: $r_{0,j} = g_j$.

Твердження 2. Повний ризик будь-якої допустимої альтернативи з ненульовим програшем l_i у порівнянні її з нульовою альтернативою є власним ризиком альтернативи, який дорівнює її програшу: $r_{i,0} = l_i$.

Нехай альтернативи a_i , a_j називаються ефективними, якщо їх очікувані програші є меншими за очікувані виграші: $l_i < g_i$, $l_j < g_j$.

Твердження 3. Якщо серед зліченної множини \mathbf{A} попарно порівнюваних альтернатив a_i , a_j , $i, j = \overline{0, n}$, $i \neq j$, знайдеться лише одна ефективна альтернатива $a_k \in \mathbf{A}$, то вона буде кращою за повним ризиком $r_{k,i} = l_k + g_i$ порівняно з усіма іншими альтернативами $a_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{0, n}$, $i \neq k$.

Упорядкуємо альтернативи $a_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{0, n}$, за зростанням програшів l_i .

Твердження 4. Якщо серед зліченної множини \mathbf{A} допустимих альтернатив, упорядкованих за зростанням програшу, знайдеться альтернатива a_k , повні ризики якої $r_{k,i}$, $r_{k,j}$ порівняно з найближчими її сусідніми альтернативами a_i , a_j з індексами $i = k - 1$, $j = k + 1$ виявляться меншими, ніж повні ризики $r_{i,k}$, $r_{j,k}$ альтернатив a_i , a_j при їх порівнянні з a_k , то альтернатива a_k буде кращою при попарному її порівнянні з усіма альтернативами, що належать множині $\mathbf{A}_j = \{a_j\}$, $j = \overline{0, k+1}$, $\mathbf{A}_j \in \mathbf{A}$.

Розглянемо задачу багатокритеріальної оптимізації на зліченній множині допустимих альтернатив $\mathbf{A} = \{a_i\}$, $i = \overline{1, n}$:

$$f_k(a_i) \rightarrow \text{extr}, k = \overline{1, p}, i = \overline{1, n}, a_i \in \mathbf{A}, \quad (4)$$

у якій критерії оцінювання альтернатив $f_k(a_i)$, $k = \overline{1, p}$, мають числову оцінку і вважаються визначеними, кожний з критеріїв оцінювання характеризує деяку локальну властивість альтернативи $a_i \in \mathbf{A}$, і, якщо всі критерії f_1, f_2, \dots, f_p досліджуються на мінімум, тобто

$$f_k(a_i) \rightarrow \min,$$

то серед них обов'язково знайдеться хоча б один такий критерій f_q , $q \in \{1, 2, \dots, p\}$, значення якого спадають зі зростанням значень інших критеріїв.

Твердження 5. Задача (4) при попарному порівнянні альтернатив зводиться до такої задачі оптимізації:

$$d_{\text{opt}} = \{a_{i,\text{opt}} \mid a_{i,\text{opt}} \in \mathbf{A} \wedge r_{i,\text{opt}} = \min(r_{i,j}, r_{j,i}) \forall (a_i, a_j)\}, i, j = \overline{1, n}, i \neq j, \quad (5)$$

де $r_{i,j}$, $r_{j,i}$ — повні ризики, відповідно, альтернативи a_i порівняно з a_j та a_j порівняно з a_i : $r_{i,j} = l_i + g_j$, $r_{j,i} = l_j + g_i$, де l_i , l_j і g_i , g_j — значення відповідним чином нормованих згорток критеріїв, що мінімізуються та максимізуються, для альтернатив a_i і a_j відповідно подані у формі ризиків: l_i , l_j — власних (системних) ризиків альтернатив a_i , a_j та g_j , g_i — ризиків невикористаних можливостей.

Нехай існує деяка функція корисності $u(a_i)$, яка таким чином відображає відношення переваги на множині альтернатив a_i , $i = \overline{1, n}$, що більш переважній з них відповідає більше значення цієї функції.

Нехай за заданої функції корисності $u(a_i)$ задача оптимізації на зліченній множині альтернатив $\mathbf{A} = \{a_i\}$, $i = \overline{1, n}$, може бути записана як

$$u(a_i) \rightarrow \max, i = \overline{1, n}, a_i \in \mathbf{A}.$$

Твердження 6. Множина оптимальних альтернатив $\mathbf{A}_{\text{opt},r}$ за критерієм оптимального ризику $r_{i,\text{opt}} = \min(r_{i,j}, r_{j,i})$ як результат розв'язання задачі (5) збігається з множиною оптимальних альтернатив $\mathbf{A}_{\text{opt},u}$ за таким критерієм максимальної корисності:

$$u(a_i)_{\text{opt}} = \max(u_i, u_j) \forall (a_i, a_j)\}, i, j = \overline{1, n}, i \neq j,$$

де $u_i = g_i - l_i$, $u_j = g_j - l_j$; l_i , l_j та g_i , g_j — відповідно очікувані програші та виграші альтернатив $a_i \in \mathbf{A}$, $a_j \in \mathbf{A}$.

ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТ ПОВНОГО РИЗИКУ АЛЬТЕРНАТИВ І ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ АЛЬТЕРНАТИВИ

Залежно від особливостей оцінювання компонент повного ризику (l, g) альтернатив можливі такі способи їх кількісного подання.

Спосіб 1. Компоненти повного (сукупного) ризику альтернатив оцінюються як ймовірності $\{p_i\}$ очікуваних негативних наслідків і ймовірності $\{s_j\}$, $j \neq i$, позитивних результатів для альтернатив a_j , що при цьому відкидаються. Такий підхід використовується у випадку визначення ймовірних втрат l і очікуваних ефектів g у вигляді добутків $l = p \cdot c$, $g = s \cdot c$, де c — деяка константа, наприклад, вартість (цінність), якою оперують під час прийняття рішення.

Відповідно на першому кроці формування таблиці рішень для кожної допустимої альтернативи задаються значення ймовірностей p_i і s_i : $a_i = (p_i, s_i)$.

Для ефективних альтернатив ймовірностям програшу p мають відповідати більші ймовірності виграшу s . Якщо серед допустимих альтернатив є ефективні, то всі неефективні альтернативи з розгляду можуть вилучатися.

На другому кроці альтернативи упорядковуються згідно з умовою

$$p_0 < p_1 < \dots < p_i < \dots < p_{n-1} < p_n \quad (6)$$

і формується (третій крок) упорядкована множина допустимих альтернатив $\mathbf{A} = \{a_i\}$, $i = \overline{0, n}$, $a_i = (p_i, s_i)$.

На четвертому кроці визначаються функції повного (сукупного) ризику, пов'язаного з вибором альтернативи $a_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{0, n}$, за умови існування альтернатив $a_j \in \mathbf{A}$, $j = \overline{0, n}$, $i \neq j$, у вигляді лінійних комбінацій:

$$r_{i,j} = p_i + s_j; \quad i, j = \overline{0, n}; \quad i \neq j.$$

На п'ятому кроці формується таблиця рішень, у яку заносяться значення $r_{i,j}$. Діагональ таблиці з індексами $i = j$ не заповнюється.

Оптимальна альтернатива вибирається згідно з правилом (5) шляхом попарного порівняння альтернатив, починаючи з пари (a_0, a_1) , з відбором та збереженням на кожному кроці альтернативи, обтяженої меншим ризиком.

Приклад. Оптимальне рішення вибирається з урахуванням ризику невикористаних можливостей серед семи ефективних альтернатив, які описуються ймовірностями p_i очікуваних негативних наслідків і ймовірностями очікуваних позитивних результатів s_i прийняття відповідних рішень (див. таблицю). Альтернативи упорядковано згідно з умовою (6).

Кількісні характеристики альтернатив (приклад)

a_i	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
p_i	0	0,03	0,06	0,1	0,15	0,22	0,3	0,4
s_i	0	0,09	0,16	0,23	0,29	0,34	0,39	0,43

Відповідну таблицю рішень зображено у вигляді рис. 3.

a_j	a_i							
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
a_0	–	0,09	0,16	0,23	0,29	0,34	0,39	0,43
a_1	0,03	–	0,19	0,26	0,32	0,37	0,42	0,46
a_2	0,06	0,15	–	0,29	0,35	0,4	0,45	0,49
a_3	0,10	0,19	0,26	–	0,39	0,44	0,49	0,53
a_4	0,15	0,24	0,31	0,38	–	0,49	0,54	0,58
a_5	0,22	0,31	0,38	0,45	0,51	–	0,61	0,65
a_6	0,30	0,39	0,46	0,53	0,59	0,64	–	0,73
a_7	0,40	0,49	0,56	0,63	0,69	0,74	0,79	–

Рис. 3. Таблиця рішень (за наведеними вище характеристиками альтернатив)

У результаті покрокового попарного порівняння альтернатив згідно з правилом (5) отримуємо (рис. 3):

– повний ризик альтернативи a_0 порівняно з a_1 становить $r_{0,1} = 0,09$, альтернативи a_1 порівняно з a_0 буде $r_{1,0} = 0,03$, краща серед a_0 , a_1 — альтернатива a_1 ;

– повний ризик альтернативи a_1 порівняно з a_2 становить $r_{1,2} = 0,19$, альтернативи a_2 порівняно з a_1 буде $r_{2,1} = 0,15$, краща серед a_1 , a_2 — альтернатива a_2 ;

– повний ризик альтернативи a_2 порівняно з a_3 становить $r_{2,3} = 0,29$, альтернативи a_3 порівняно з a_2 буде $r_{3,2} = 0,26$, краща серед a_2 , a_3 — альтернатива a_3 ;

– повний ризик альтернативи a_3 порівняно з a_4 становить $r_{3,4} = 0,39$, альтернативи a_4 порівняно з a_3 буде $r_{4,3} = 0,38$, краща серед a_3 , a_4 — альтернатива a_4 ;

– повний ризик альтернативи a_4 порівняно з a_5 становить $r_{4,5} = 0,49$, альтернативи a_5 порівняно з a_4 буде $r_{5,4} = 0,51$, краща серед a_4 , a_5 — a_4 і так далі. У результаті попарного порівняння a_4 з a_6 та a_7 отримуємо, що повні ризики альтернативи a_4 будуть меншими за повні ризики та наступних альтернатив a_6 , a_7 і, відповідно, a_4 серед семи порівнюваних альтернатив є оптимальною.

Спосіб 2. Компоненти повного (сукупного) ризику альтернатив оцінюються як добутки $l = p \cdot w$, $g = s \cdot v$, $w \neq v$, де w , v — деякі задані вартості або цінності, якими оперують під час рішення, і які мають однакові одиниці вимірювання (наприклад, у грошових одиницях).

У цьому випадку на першому кроці формування таблиці рішень для кожної альтернативи мають задаватися відповідні значення ймовірностей p_i , s_i і значення відповідних вартостей та цінностей w_i , v_i : $a_i = (p_i, w_i; s_i, v_i)$.

На другому кроці кожній альтернативі приписуються ймовірні втрати $l_i = p_i \cdot w_i$ та виграші $g_i = s_i \cdot v_i$: $a_i = (l_i, g_i)$.

Для ефективних альтернатив імовірним втратам l мають відповідати більші очікувані виграші g . Якщо серед допустимих альтернатив є ефективні, то всі неефективні альтернативи з розгляду можуть вилучатися. Так, на третьому кроці формується остаточна злічена множина допустимих альтернатив.

На четвертому кроці альтернативи упорядковуються й нумеруються згідно з умовою

$$l_0 < l_1 < \dots < l_i < \dots < l_{n-1} < l_n$$

і формується упорядкована множина допустимих альтернатив $A = \{a_i\}$, $i = \overline{0, n}$, $a_i = (l_i, g_i)$.

На п'ятому кроці визначаються функції повного ризику, пов'язаного з вибором альтернативи $a_i \in A$, $i = \overline{0, n}$, за умови існування альтернатив $a_j \in A$, $j = \overline{0, n}$, $i \neq j$, у вигляді лінійних комбінацій (3). Вибір оптимальної альтернативи здійснюється згідно з правилом (5) попарним порівнянням альтернатив, починаючи з пари (a_0, a_1) , з відбиранням і збереженням на кожному кроці альтернативи, обтяженої меншим сукупним ризиком.

Спосіб 3. У випадку, коли вартості або цінності, якими оперують під час рішення, мають різні одиниці вимірювання, можна використовувати кількісні оцінки компонент повного ризику в бальних одиницях. Бальні оцінки ризику при цьому можна формувати за логарифмічною шкалою.

У загальному випадку бальна оцінка деякого параметра y_i (у балах) становитиме

$$r(y_i) = \mu_i \lg y_i + y_{i,0},$$

де μ_i — модуль; $y_{i,0}$ — нуль-пункт на універсальній (інтегральній) логарифмічній шкалі довжиною L , для параметра y_i :

$$\mu_i = \frac{L}{\lg y_{i,\max} - \lg y_{i,\min}}, \quad y_{i,0} = -\mu_i \lg y_{i,\min},$$

де $y_{i,\max}$, $y_{i,\min}$ — максимальне і мінімальне значення y_i .

$$\text{Якщо } y_{i,\min} = 0, \text{ маємо } y_{i,0} = 0, \mu_i = \frac{L}{\lg y_{i,\max}}.$$

Після формування бальних оцінок ризику вибираються множини допустимих альтернатив, здійснюються їх упорядкування та нумерація і визначаються функції повного ризику у вигляді лінійних комбінацій (3).

Оптимальна альтернатива вибирається згідно з правилом (5) попарним порівнянням альтернатив, починаючи з пари (a_0, a_1) .

Спосіб 4. Нехай порівнюються різні альтернативні заходи (альтернативи) підвищення безпеки природокористування, які характеризуються очікуваними зведеними затратами на їх здійснення c та ймовірними збитками у разі надзвичайних ситуацій d . Імовірні збитки можуть визначатися як добуток ймовірностей реалізації відповідних надзвичайних ситуацій та збитків, завданих ними.

Допустимими альтернативами в цьому випадку можуть вважатися альтернативи, які зі зростанням затрат на їх реалізацію забезпечують зменшення ймовірних збитків у разі надзвичайних ситуацій.

На першому кроці формування таблиці рішень для кожної допустимої альтернативи задаються відповідні значення очікуваних затрат на її реалізацію c_i та ймовірних збитків d_i : $a_i = (c_i, d_i)$.

Для альтернативи, для якої затрати не передбачаються (назвемо її «нульовою»), відповідно маємо $c_0 = 0$: $a_0 = (0, d_0)$.

Далі альтернативи упорядковуються згідно з умовою

$$c_0 < c_1 < \dots < c_i < \dots < c_{n-1} < c_n$$

і формується упорядкована множина допустимих альтернатив $\mathbf{A} = \{a_i\}$, $i = \overline{0, n}$, $a_i = (c_i, d_i)$.

Визначаються функції повного ризику, пов'язаного з вибором альтернативи $a_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{0, n}$, за умови існування альтернатив $a_j \in \mathbf{A}$, $j = \overline{0, n}$, $i \neq j$, у вигляді лінійних комбінацій (3), де $l_i = \Delta c_i$, $\Delta c_i = c_i - c_0$; $g_j = \Delta d_j$, $\Delta d_j = d_0 - d_j$:

$$r_{i,j} = \Delta c_i + \Delta d_j; i, j = \overline{0, n}; i \neq j.$$

Оптимальна альтернатива вибирається згідно з правилом (5) попарним порівнянням альтернатив, починаючи з пари (a_0, a_1) , з вибором на кожному кроці альтернативи, обтяженої меншим сукупним ризиком. Фрагмент відповідної таблиці рішень показано на рис. 4.

a_j	a_i				
	a_0	...	a_i	a_j	...
a_0	–	...	Δd_i	Δd_j	...
...	...	–
a_i	Δc_i	...	–	$c_i + \Delta d_j$	...
a_j	Δc_j	...	$c_j + \Delta d_i$	–	...
...	–

Рис. 4. Фрагмент таблиці рішень $\|r_{i,j}\|$ для вибору оптимальної альтернативи щодо підвищення безпеки природокористування при $c_0 = 0$

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано необхідність урахування ризику невикористаних можливостей як складової повного ризику під час прийняття рішень у природокористуванні. Відзначено, що під ризиком невикористаних можливостей у природокористуванні можна розуміти не тільки не отримані ймовірні вигоди (економічні та інші вигоди) безпосередньо від використання природних ресурсів, а і зменшення негативних наслідків (збитків, шкоди, втрат), зниження розміру штрафних та інших санкцій від упровадження більш безпечних технологій тощо.

Сформульовано загальні положення, правила та принципові узагальнення, що стосуються прийняття рішень у природокористуванні з урахуванням ризику невикористаних можливостей на підставі попарного порівняння альтернатив. Запропоновано функції повного ризику альтернатив у вигляді лінійних комбінацій, які поєднують системні (власні) ризики альтернатив та ризики невикористаних можливостей, які трактуються як вигравні ефекти альтернатив, що відкидаються. Сформульовано твердження про те, що множина оптимальних альтернатив за критерієм мінімального ризику як результат розв'язання задачі прийняття рішень з урахуванням ризику невикористаних можливостей збігається з множиною оптимальних альтернатив за критерієм максимальної корисності. Запропоновано різні способи визначення компонент повного ризику альтернатив для заповнення таблиць рішень та відповідні алгоритми вибору оптимальної альтернативи з урахуванням ризику невикористаних можливостей.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Бейко І.В.* Задачі, методи і алгоритми оптимізації: навч. посіб. / І.В. Бейко, П.М. Зінько, О.Г. Наконечний. — Рівне: НУВГП, 2011. — 624 с.
2. *Мушик Э.* Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер; пер. с нем. — М.: Мир, 1990. — 206 с.
3. *Эддоус М.* Методы принятия решений / М. Эддоус, Р. Стенсфилд; пер. с англ. — М.: ЮНИТИ, Аудит, 1997. — 510 с.
4. *Вітлінський В.В.* Економічний ризик: ігрові моделі / В.В. Вітлінський, П.І. Верченко, А.В. Сігал, Я.С. Наконечний. — К.: КНЕУ, 2002. — 446 с.
5. *Згуровский М.З.* Системный анализ / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. — К.: Наук. думка, 2011. — 900 с.
6. *Качинський А.Б.* Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи: моногр. / А.Б. Качинський; Ін-т проблем національної безпеки. Нац. акад. служби безпеки України. — К.: [б. н.], 2004. — 470 с.
7. *Лисиченко Г.В.* Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління / Г.В. Лисиченко, О.Л. Забулонов, Г.А. Хміль. — К.: Наук. думка, 2008. — 544 с.
8. *Мирицхулава Ц.Е.* Опасности и риски на некоторых водных и других системах. Виды, анализ, оценка / Ц.Е. Мирицхулава. — Тбилиси: Мецниереба, 2003. — 538 с.

9. Панкратова Н.Д. Оцінювання багатофакторних ризиків в умовах концептуальної невизначеності / Н.Д. Панкратова, Н.І. Недашківська // Кибернетика и системный анализ. — 2009. — № 2. — С. 72–82.
10. Ястремський О.І. Основи теорії економічного ризику / О.І. Ястремський. — К.: АртЕк, 1997. — 248 с.
11. Rowe W. An anatomy of risk / W. Rowe. — New York: W. J. Wiley, 1997. — 488 p.
12. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності / Д.В. Стефанишин. — К.: Азимут-Україна, 2009. — 104 с.
13. Стефанишин Д.В. Метод порівняння варіантів рішень в природокористуванні з врахуванням ризиків невикористаних можливостей / Д.В. Стефанишин, Ю.Д. Стефанишина, М.В. Кубай // Математичне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. праць Кам'янець-Подільського національного ун-ту; Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАНУ; [редкол.: В.В. Скопецький (відп. ред.) та ін.]. — Кам'янець-Подільський, 2008. — Вип. 1. — С. 174–181.
14. Stefanyshyn D.V. A method of decision making at risk in natural resources use by pairwise comparison of alternatives with taking account of risks of lost opportunities / D.V. Stefanyshyn, Yu.D. Stefanyshyna // Proc. Of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems». — July 7–11, 2009. — S.-Petersburg, Russia. — P. 435–439.

Надійшла 20.05.2015