

С. Д. КУЗНІЧЕНКО, кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, Одеський державний екологічний університет, м. Одеса, Україна; e-mail: skuznichenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7982-1298>

Д. А. ІВАНОВ, аспірант, Одеський державний екологічний університет, м. Одеса, Україна; e-mail: dmitriy.2112@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8821-0094>

Д. О. КУЗНІЧЕНКО, співробітник логістичної компанії Лайкбас, м. Одеса, Україна; e-mail: kuznichenko.d@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1080-6433>

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ І МЕТОДІВ ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ ДЛЯ КАРТУВАННЯ РИЗИКУ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ

Сучасні методи просторового аналізу і моделювання все частіше використовуються в поєднанні з методами прийняття рішень та теорії нечітких множин. Останні активно інтегруються в середовище географічних інформаційних систем (ГІС), наприклад, таких відомих як ArcGIS чи QGIS, у вигляді окремих інструментів, плагінів чи Python скриптів. Методи прийняття рішень дозволяють структурувати проблему в географічному просторі, а також врахувати знання і судження експертів та переваги особи, що приймає рішення при визначенні пріоритетів альтернативних рішень. У даній роботі надається опис геопросторової моделі багатокритеріального аналізу рішень, яка дозволяє вирішувати широке коло екологічних та соціально-економічних завдань. У роботі наводиться приклад застосування даної моделі для картування ризику деградації ґрунтів в Україні. Згідно з об'єктно-просторовим підходом, властивості території визначаються як результат дії (впливу) множини об'єктів (процесів), що належать цієї території. Територія представляється у вигляді двовимірної дискретної сітки, кожна точка якої (локальна ділянка) є альтернативою. Набір локальних ділянок території складає множину альтернатив. Уявлення моделі території як системи об'єктів та зв'язків між ними дозволяє обґрунтувати вибір множини критеріїв (факторів) для оцінювання ризику деградації ґрунтів. Кожний критерій є окремим растровим шаром карти. Для побудови ієрархічної структури прийняття рішень та розрахунку коефіцієнтів важливості критеріїв використовується метод аналізу ієрархій. Для врахування невизначеності в оцінках та судженнях експертів на етапах стандартизації атрибутів альтернатив за різними критеріями та агрегування їх оцінок застосовано експертні функції належності до нечіткої множини та нечіткі квантифікатори. Особливістю запропонованої моделі багатокритеріального аналізу рішень є її низька обчислювальна складність та простота інтеграції у середовище ГІС.

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз рішень, метод аналізу ієрархій, геоінформаційна система, просторове моделювання, експертні оцінки, ризик деградації ґрунтів.

Вступ. Деградація земель є серйозною екологічною проблемою, на яку впливають як природні, так і антропогенні фактори. Сьогодні Україна є військово-техногенно напруженим регіоном Європи з негативними наслідками для довкілля загалом та ґрунтового покриття зокрема.

Деградація земель визначається як процес погіршення якості землі, зниження її родючості та зменшення вмісту в ній поживних речовин. За оцінками Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН, близько 20% сільськогосподарських угідь в Україні вже зазнали значної деградації. Військові дії, що тривають, справляють додатковий руйнівний вплив на продуктивність ґрунтів. До основних негативних факторів відносяться воронки від авіабомб і артилерійських обстрілів, заміновані території, знищена важка військова техніка, розливи нафти, випалені території від пожеж, зсувів тощо [1].

Відновлення функціональних властивостей ґрунту та підвищення його продуктивності можливе залежно від типу ґрунту, рівня деградації та ландшафтних умов території. Це вимагає міждисциплінарного та інтегрованого підходу до сталого управління земельними ресурсами. У роботі пропонується підхід до картування ризику деградації земель, що базується на інтеграції моделі та методів багатокритеріального аналізу рішень (з англ. MCDA, Multiple-Criteria Decision Analysis) у ГІС [2, 3].

Інтеграція ГІС та багатокритеріального аналізу рішень (БКАР) дозволяє поєднати концепції двох різних галузей та отримати нові шляхи вирішення просторових проблем прийняття рішень.

На фундаментальному рівні інтеграцію ГІС з БКАР можна розглядати як набір методів для перетворення та комбінування геоданих і переваг (оціночних суджень) особи, що приймає рішення (ОПР) з метою отримання інформації для прийняття рішень. З одного боку, ГІС забезпечує зберігання, керування, аналіз та візуалізацію геопросторових даних. З іншого боку, БКАР покращує здатність ГІС вирішувати просторові проблеми прийняття рішень, надаючи теоретичну основу для аналізу та широкий спектр методів.

На елементарному рівні БКАР включає набір альтернатив, які оцінюються на основі суперечливих і неспівмірних критеріїв відповідно до уподобань ОПР. Тобто основними елементами будь-якої багатокритеріальної проблеми прийняття рішень є особи (чи експерти), що приймають рішення, альтернативи та критерії. Модель БКАР складається з трьох основних концепцій: масштабування (або стандартизація) значень, зважування критеріїв та правило комбінування (рішення) [4].

Метою даної роботи є розробка моделі геопросторового багатокритеріального аналізу рішень, адаптованої для оцінки та картування ризику деградації ґрунтів в Україні. Просторовий розподіл ризику деградації ґрунтів визначається за допомогою індексу, що

© Кузніченко С. Д., Іванов Д. А., Кузніченко Д. О., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



базується на факторах (критеріях), які впливають на ризик деградації, зокрема на військово-техногенному факторі. Показано, що уявлення моделі території як системи об'єктів (чи процесів), що впливають на властивості цієї території, та зв'язків між ними, добре узгоджується з математичними основами БКАР.

1. Постановка завдання. В узагальненому вигляді задача прийняття рішення представляється коротцем:

$$\langle A, C, E, W, D \rangle, \quad (1)$$

де $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множина альтернатив;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – набір критеріїв для оцінки альтернатив;

E – процедура оцінювання;

W – система переваг, що містить інформацію про оцінки альтернатив за кожним критерієм;

D – правило рішення визначає процедуру дії над набором альтернатив (відбір, ранжування, сортування тощо).

Якщо розглядати територію як складну систему, то процес прийняття рішення можна звести до оцінки модельного представлення системи та її властивостей, які найбільшою мірою відповідають реальному стану території в заданих умовах. Відповідно до (1) мають бути визначені цілі оцінювання, методи, шкали, критерії оцінювання та процедура оцінювання. Таким чином, технологія прийняття рішень передбачає отримання або генерування альтернатив, їх порівняння за певними критеріями та ранжування залежно від поставлених цілей [5].

Властивості території можна розглядати як результат дії (впливу) процесів або об'єктів, що належать до цієї території:

$$T \subset O \times H, \quad (2)$$

де $O = \{o_j\}, j = \overline{1, m}$ – сукупність об'єктів, що належать до території;

$H = \{h_i\}, i = \overline{1, n}$ – множина елементарних ділянок, на які поділяється територія.

Уявлення моделі території як системи елементів і зв'язків між ними набуває такого вигляду:

$$\begin{matrix} F_{\mu} \\ O \rightarrow P, \end{matrix} \quad (3)$$

де $F_{\mu} = \{F_{\mu_{ij}}\}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$ – множина функцій, що відображають вплив j -го об'єкта на i -ту елементарну ділянку території;

P – властивість території.

Уявлення території визначається як упорядкована множина властивостей елементарних ділянок:

$$P = \{P_i \mid P_i = \{P_{ij}\}\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

відповідно

$$P_{ij} = P_j \cdot F_{\mu_{ij}}(r_{ij}), \quad (5)$$

де P_j – величина впливу j -го об'єкта на місце його розташування;

$F_{\mu_{ij}}$ – функція поширення впливу цього об'єкта;

r_{ij} – відстань між i -ю точкою (елементарною ділянкою) території та j -м об'єктом.

Вплив сукупності об'єктів (процесів) O на i -ту точку (елементарну ділянку) території визначається шляхом агрегування значень впливу окремих об'єктів (процесів):

$$P_i = F_{\text{AGG}}(P_j \cdot F_{\mu_{ij}}(r_{ij})). \quad (6)$$

У загальному випадку функція агрегування впливу F_{AGG} є нелінійною. Множина елементарних ділянок H є сукупністю точок (пікселів) досліджуваної території. Кожна точка визначається як $i(n\Delta x, m\Delta y)$ відповідно до координат x, y . Таким чином, модель властивостей території є двовимірною дискретною системою:

$$H = \{h_{m,n} \mid m \in M, n \in N\}, \quad (7)$$

де індекси n і m є дискретними значеннями координат положень комірок растра по осі X (множина N) і осі Y (множина M). Для стислості надалі пару чисел m, n позначатимемо єдиним індексом i – номером комірки растра: $H = \{h_i \mid i = 1; N \cdot M\}$. Враховуючи це, властивість території можна представити у вигляді:

$$P_{x,y} = f_p(x,y). \quad (8)$$

Таким чином, на основі рівняння (8) можна побудувати растр території, де кожна точка містить оцінку властивості території в цій точці як атрибут. Функція впливу F_{μ} залежить від різних властивостей території (таких як рельєф, ухил, тип ґрунту тощо), а також відстані r_{ij} між j -м об'єктом та i -ю точкою території. Функцію F_{μ} можна визначити аналітично, наприклад, на основі рівнянь, що описують відомі фізичні процеси (такі як моделі водної та вітрової ерозії, перенесення забруднення, поширення вогню тощо). Функція F_{μ} також може бути визначена як функція цінності чи функція належності до нечіткої множини на основі експертних оцінок [5].

2. Модель геопросторового багатокритеріального аналізу рішень. Діаграма процесу геопросторового БКАР наведена на рис. 1 і складається з етапів макроаналізу, мікроаналізу та надання рекомендацій.

Макроаналіз – етап попереднього дослідження чи збору інформації. На цьому етапі відбувається збір даних про об'єкти (процеси), що мають суттєвий вплив на властивості території, формуються множини критеріїв та альтернатив з урахуванням обмежень, що накладаються на рішення. Критерій – це загальний термін, що включає як поняття цілі, так і атрибуту [6].

Ціль – це твердження про бажаний стан системи, що розглядається (наприклад, рівень вразливості ґрунтів до прояву ерозійних процесів). Досягнення цілі

вимірюється через кількісні чи якісні оцінки одного або кількох атрибутів. Твердження про бажані оцінки можна інтерпретувати як «чим більше атрибут, тим краще», або «чим менше атрибут, тим краще». Тобто атрибут – це вимірювана кількість або якість географічної сутності або зв'язок між географічними сутностями. Атрибут можна описати як властивість елемента (об'єкта, процесу) географічної системи реального світу (наприклад, систем розподілу фортифікаційних споруд та мінних полів, щільності пожеж, інтенсивності прояву пилових бур тощо).

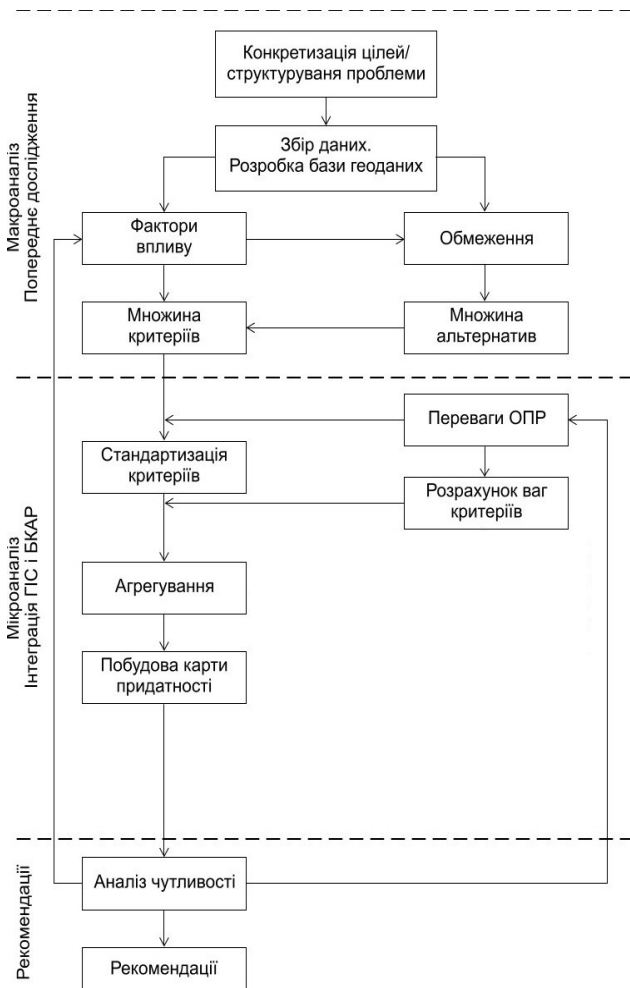


Рис. 1. Діаграма процесу геопросторового БКАР

Зв'язки між цілями та атрибутами мають ієрархічну структуру. Для побудови ієрархічної структури може бути використані концепції, що лежать в основі методу аналізу ієрархій [7]. Найбільш загальні цілі знаходяться на найвищому рівні і можуть бути визначені в термінах більш конкретних цілей нижчих рівнів. Атрибути є кількісно вимірними індикаторами ступеня реалізації відповідних цілей і знаходяться на найнижчому рівні ієрархії. На рис. 2 показано приклад ієрархічної структури задачі прийняття рішення. Верхній рівень ієрархічної структури є загальною метою (наприклад, визначення найкращої просторової моделі оцінки ризику деградації земель). Потім ієрархія опускається від глобальної мети до більш конкретних цілей, доки не буде досягнуто рівня атрибутів.

Декомпозиція об'єктів, що мають суттєвий вплив на рішення, на окремі шари критеріїв передбачає виконання аналізу не лише їх атрибутивної, але і просторової інформації. За геометричними властивостями об'єкти можуть бути точковими, лінійними та полігональними. Так, наприклад, водні об'єкти можуть бути представлені лінійними і полігональними об'єктами (річки і водосховища відповідно), тому необхідно виконати декомпозицію на два окремих шари різної геометрії.

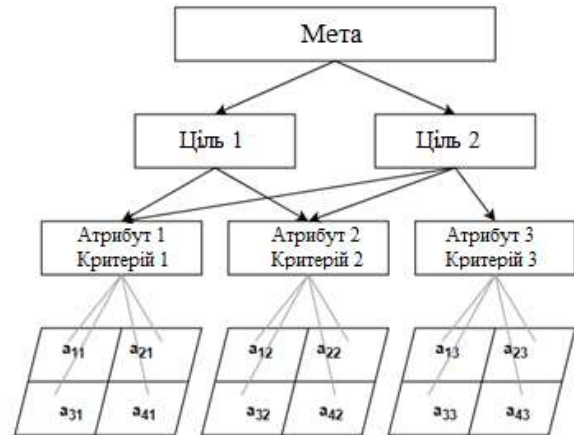


Рис. 2. Загальна ієрархічна структура задачі прийняття рішення

Відповідно до (8) тематичні шари критеріїв повинні бути перетворені в растрову модель даних. Дискретизація векторних шарів може бути виконана з використанням різних методів ГС-аналізу, наприклад, геостатистичної інтерполяції, фрактального аналізу, обчислення відстані за допомогою різних метрик близькості і т. п. Найбільш часто для розрахунку географічних відстаней між об'єктами в просторовому аналізі використовують Евклідову відстань, яка між двома точковими об'єктами $O_1(x_1, y_1)$ і $O_2(x_2, y_2)$ визначається як :

$$d(O_1, O_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (9)$$

У випадку растрової моделі даних відстань від будь-якої комірки растра a до об'єкта O дорівнює мінімальній відстані від цієї комірки до кожної комірки, що покриває об'єкт O :

$$ED(O, a) = \min \left\{ (d(O, a))_k \mid k = \overline{1, n_o} \right\} \quad (10)$$

де n_o – кількість комірок, що покривають об'єкт O .

Таким чином, можна побудувати растр відстаней $R(ED)$, кожна комірка якого містить атрибут, який дорівнює значенню Евклідової відстані ED від неї до найближчого об'єкта, розрахований відповідно (10):

$$R(ED) = \{a_{ij}\} = \left\{ \left((x_i, y_j), ED_{ij} \right) \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (11)$$

де n – кількість рядків двовимірної сітки растра;

m – кількість стовпців двовимірної сітки растра.

Мікроаналіз (рис. 1) – етап, який передбачає застосування методів прийняття рішень, що засновані на оціночних судженнях та перевагах ОПР чи експертів. Основними важливими кроками цього етапу є стандартизація атрибутів – перетворення в порівнянні одиниці; розрахунок ваг важливості критеріїв; агрегування – об'єднання атрибутів в узагальнену оцінку альтернатив за певними правилами прийняття рішень. На даному етапі часто доводиться стикатися з невизначеністю експертів щодо ступенів відносної важливості (ваг) критеріїв та допустимої стратегії прийняття рішень, тобто форми компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями. Для врахування подібних невизначеностей доцільним є використання апарату теорії нечітких множин та нечіткої логіки.

Стандартизація на основі апарату теорії нечітких множин базується на перетворенні значень атрибутів k -го шару у значення ступені належності до нечіткої множини \tilde{V}_k [8]:

$$\tilde{V}_k = \{(a, \mu_v^k(a)) \mid a \in U\}, \mu_v^k(a) : a \rightarrow [0, 1], \quad (12)$$

де a – значення атрибуту;

U – безперервна множина значень атрибутів;

$\mu_v(a)$ – функція належності, що приймає значення в деякій цілком впорядкованій множині $M = [0, 1]$. Функція належності вказує ступінь належності елемента a нечіткій підмножині \tilde{A} . Чим більше $\mu_v(a)$, тим більшою мірою елемент універсальної множини відповідає властивостям нечіткої підмножини. Як правило, функція належності будується за участю експерта (групи експертів), таким чином, що ступінь належності приблизно дорівнює інтенсивності прояву деякого фактора.

Перетворення атрибутів у нечітку множину, на підставі експертної функції належності, тобто фазифікація, дозволяє побудувати растр k -го критерію, кожний атрибут якого містить значення функції належності $\mu_v^k(a)$, тобто лежить у діапазоні $[0, 1]$:

$$R_k(\tilde{v}(a_i^k)) = \left\{ \left((x_i^k, y_j^k), \mu_v^k(a_{ij}^k) \right) \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Важливим кроком етапу мікроаналізу є зважування критеріїв. Вага – це значення, присвоєне критерію, яке вказує на його важливість відносно інших критеріїв, що розглядаються. Найчастіше для розрахунку ваг критеріїв у БКАР застосовують один із трьох методів зважування: ранжування, рейтинг і попарне порівняння. Ці методи вимагають, щоб ОПР вказав свої переваги щодо важливості критеріїв. Чим більша вага, тим важливіший критерій. Вони засновані на припущенні, що переваги ОПР просторово однорідні, тобто розраховується одна вага для кожного критерію. У разі n критеріїв, множина ваг визначається як

$$W = \{w_i \mid \sum w = 1, i = \overline{1, n}\}. \quad (14)$$

Як вже згадувалося раніше, ваги критеріїв можуть бути розраховані методом аналізу ієрархії (МАІ), який

має просту реалізацію і його просто інтегрувати в ГІС. МАІ заснований на парному порівнянні критеріїв за допомогою 9-бальної фундаментальної шкала абсолютних чисел Сааті [7]. За результатами парного порівняння n критеріїв можна побудувати матрицю $A(n \times n)$, у якій кожний елемент a_{ij} – це оцінка парного порівняння i -го критерію з j -м критерієм:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \begin{cases} a_{ij} = 1, i = j, \\ a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} \neq 0. \end{cases} \quad (15)$$

Для матриці розраховуються власні числа та власні вектори, а також формується вектор локальних пріоритетів. Для контролю узгодженості експертних оцінок використовуються дві пов'язані характеристики: індекс узгодженості С.І. і коефіцієнт узгодженості С.Р. Розумний рівень узгодженості в парних порівняннях становить С.Р. $< 0,10$, тоді як С.Р. $\geq 0,10$ вказує на суперечливі експертні оцінки. Для врахування невизначеностей в оцінках експертів пропонується використовувати модифікований нечіткий МАІ, в якому парні порівняння критеріїв виконуються через лінгвістичні змінні представлені трикутними числами [9].

Після стандартизації атрибутів та розрахунку ваг критеріїв виконується комбінування оцінок критеріїв. Для цього в середовищі ГІС зазвичай використовуються різні оператори агрегування: мінімум, максимум, середнє арифметичне, зважена сума, ОWA оператор Ягера [10].

Використання оператора мінімуму $\Phi(a_1, \dots, a_n) = \min(a_1, \dots, a_n)$ призводить до оцінювання альтернативи на основі лише найнижчого значення атрибуту, тобто є песимістичним підходом до прийняття рішення. Оператор максимуму $\Phi(a_1, \dots, a_n) = \max(a_1, \dots, a_n)$ враховує тільки кращі оцінки атрибутів і є оптимістичним підходом до прийняття рішення [11].

Простим і популярним оператором агрегування, який часто використовується в ГІС є оператор зважена сума:

$$\Phi(a_1, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n w_j a_j, \quad (16)$$

де w_j – ваговий коефіцієнт важливості j -го критерію.

На відміну від попередніх операторів, зважена сума є компенсаційним оператором агрегування, тобто компенсує низькі оцінки за одними критеріями високими оцінками за іншими. Недоліком адитивних операторів агрегування є неможливість відобразити експертну інформацію про бажану допустиму форму компромісу між значеннями альтернатив за різними критеріями.

Рішенням проблеми є застосування ОWA-оператора Ягера з нечіткими квантифікаторами (НК), який дозволяє комбінувати шари карти, зв'язуючи з шарами

два типи ваг: ваги критеріїв $0 \leq w_j \leq 1$ та ваги порядку $0 \leq \tilde{\lambda}_j \leq 1$. Формалізований запис OWA оператора Ягера з НК має наступний вигляд [11]:

$$V(a'_i) = \sum_{j=1}^n \tilde{\lambda}_j b_{ij}, \quad (17)$$

де $V(a'_i)$ – загальна оцінка i -ї альтернативи;

$b_{i1} \geq b_{i2} \geq \dots \geq b_{in}$ – елементи вектора атрибутів

$A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ впорядковані за зменшенням. Важливим аспектом даного підходу є те, що вага порядку $\tilde{\lambda}_j$ пов'язана з позицією елементів в упорядкованому за зменшенням векторі таким чином, що $\tilde{\lambda}_j$ відповідає найбільшому значенню b_j , а $\tilde{\lambda}_n$ – найменшому.

У випадку, коли для критеріїв заданий набір ваг w_1, w_2, \dots, w_n , вектор ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$ задається у вигляді:

$$\tilde{\lambda}_j = Q\left(\sum_{i=1}^j w_i^b\right) - Q\left(\sum_{i=1}^{j-1} w_i^b\right), \quad (18)$$

де w_i^b – ваги критеріїв, впорядковані у відповідності зі значенням атрибуту b_{ij} .

Можна показати, що у випадку, коли $\tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2 = \dots = \tilde{\lambda}_n = 1/n$, (17) повністю ідентичний оператору зважена сума (16). За рівнянням (17) можна

отримати широкий спектр операторів агрегування шляхом вибору відповідного вектора ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$: від мінімуму (повна відмова від ризику у випадку, коли $\tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2 = \dots = \tilde{\lambda}_{n-1} = 0$, $\tilde{\lambda}_n = 1$), до максимуму (прийняття ризику у випадку, коли $\tilde{\lambda}_1 = 1$, $\tilde{\lambda}_2 = \dots = \tilde{\lambda}_n = 0$). Різні комбінації ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$ представляються графічно у вигляді нечітких квантифікаторів Q , кожний з яких є відображенням певного ставлення ОПР до ризику (надзвичайно оптимістичного, оптимістичного, помірно оптимістичного, нейтрального, помірно песимістичного, надзвичайно песимістичного). Можливість класифікувати ступень ставлення ОПР до ризику через нечіткі квантифікатори та лінгвістичні змінні робить OWA універсальним оператором агрегування, що реалізує широкий спектр комбінування шарів критеріїв.

3. Адаптація моделі геопросторового багатокритеріального аналізу рішень для оцінки ризику деградації ґрунтів. Багатокритеріальний аналіз починається з побудови ієрархічної структури, визначення цілей та критеріїв. До основних екзогенних геологічних процесів, що спричиняють деградацію земель в Україні, найчастіше відносять вітрову та водну ерозію, засолення ґрунтів [12]. До показників деградації можна також віднести зміну рослинності та ступень еродованості ґрунтів. Крім того, слід враховувати негативний вплив військово-техногенних факторів, що проявляється у вигляді механічної деформації ґрунтового покриву та зміні його фізичних та хімічних властивостей.

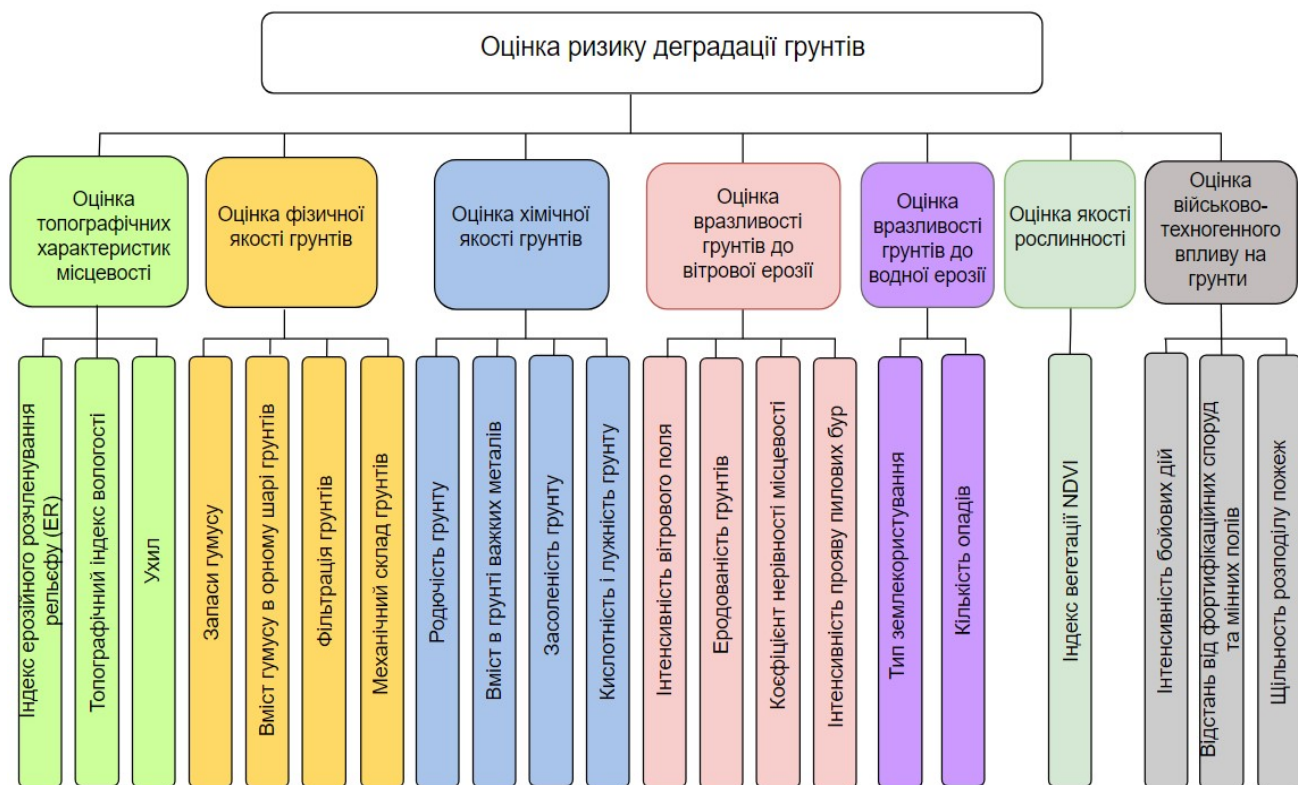


Рис. 3. Ієрархічна структура багатокритеріального аналізу рішень

Ієрархічна структура багатокритеріального аналізу наведена на рис.3. Вона побудована на основі досвіду експертів і безумовно є лише одним з можливих варіантів, тобто спрощеним уявленням безлічі процесів, що впливають на деградацію ґрунтів у реальному світі. Глобальна мета аналізу – оцінка ризику деградації ґрунтів, тобто ранжування альтернатив за ступенем вразливості до деградації ґрунтів. Цілями другого рівня ієрархії виступають складові цього процесу, а саме моделі оцінки вітрової ерозії, водної ерозії, фізичної якості ґрунту, хімічної якості ґрунту, якості та інтенсивності рослинності і т. д. Будемо вважати кожен ціль окремим індексом, що відображає оцінку альтернативи за певною моделлю. Для оцінки кожного з сьомі індексів використовуються певні критерії: окрім мультиспектральних супутникових знімків, допоміжні геодані – цифрова модель рельєфу, різні ґрунтові та кліматичні карти. Тематичні шари критеріїв можуть бути створені на базі відкритої картографічної інформації. Наприклад, для створення шарів, що відображають військово-техногенні критерії, можуть бути використано API інформаційної системи Fire Information for Resource Management System (FIRMS) NASA або European Forest Fire Information System (EFFIS), картографічні дані інституту вивчення

війни (ISW) та архівні супутникові знімки високої роздільної здатності Google Earth. Для розрахунку топографічних характеристик місцевості – цифрова модель рельєфу (DEM), що отримана за даними космічної місії SRTM. Для підготовки кліматичних карт – дані кліматичної бази даних Copernicus.

Дискретизація векторних тематичних шарів може бути виконана з використанням різних методів ГІС-аналізу та геообробки, наприклад, геостатистичної інтерполяції, фрактального аналізу, обчислення відстані за допомогою Евклідової метрики (11) і т. п. На рис.4 наведено приклад побудови растрового шару евклідових відстаней від випалених ділянок, які з'явилися на території Херсонської області вздовж лінії фронту в результаті пожеж за період з лютого 2022 року по січень 2024 року. Дані отримані через інформаційну систему EFFIS. Рівень вразливості точок (елементарних ділянок) визначався на підставі лінійної функції належності $\mu_r(a)$ (13). У результаті була виконана стандартизація атрибутів і отримано перекласифікований растр відстаней, значення якого знаходяться в межах [0,1]. Значення атрибутів вказують на ступінь вразливості ґрунту до деградації під впливом даного фактора. Значення 0 – точка території не відчуває вплив фактора, значення 1 – максимально відчуває,

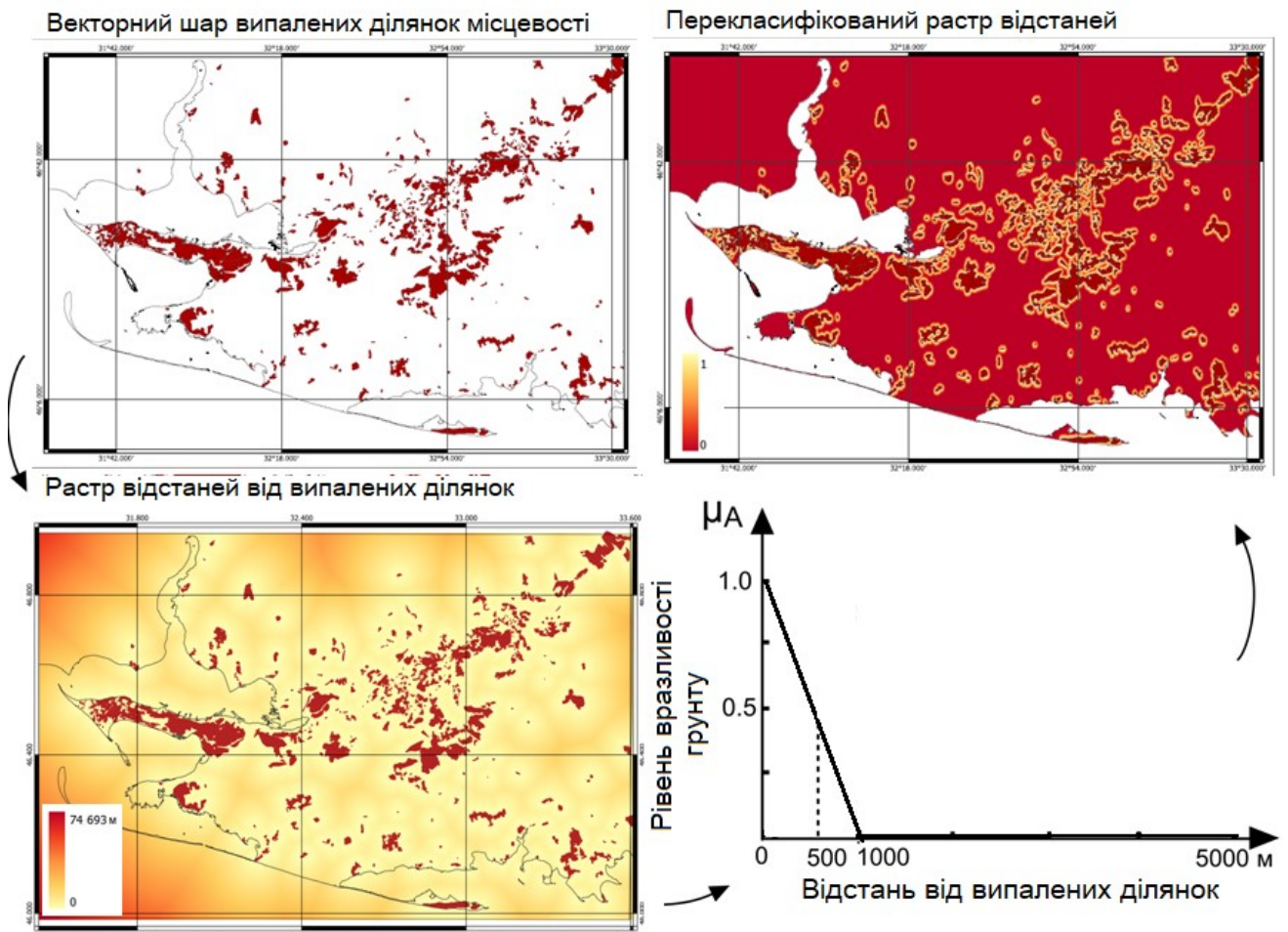


Рис. 4. Етапи стандартизації векторного полігонального шару випалених ділянок місцевості

проміжні значення вказують на різний рівень вразливості.

Розрахунок ваг критеріїв (14) виконується з використанням методу аналізу ієрархій окремо для кожної групи критеріїв, що об'єднані одним з сьоміа індексів оцінки. Тобто для кожної групи критеріїв будується своя матриця парних порівнянь (15), а також окрема матриця для глобальних індексів ієрархії. Аналогічно агрегування оцінок виконується на кожному рівні ієрархії, окремо для кожної групи критеріїв. Для згортки оцінок може бути використаний будь-який оператор агрегування. Простим з точки зору інтегрування в ГІС та ефективним варіантом є оператор зважена сума (16). У випадку бажання врахувати різні форми компромісу між значеннями альтернатив за різними критеріями та формувати різні стратегії прийняття рішень, рекомендується використовувати OWA-оператор Ягера (17).

Висновки. У роботі вирішено актуальне завдання розробки геопросторової моделі процесу багатокритеріального аналізу рішень, яка може використовуватися у вирішенні різних просторових завдань раціонального управління еколого-економічним розвитком територій. Наводиться приклад використання моделі процесу БКАР для картування ризику деградації земель з метою підтримки планування заходів щодо відновлення функціональних властивостей та продуктивності українських ґрунтів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що запропоновано підхід, який базується на моделі територій та просторово адаптованих методах прийняття рішень. Властивості території оцінюються за функціями впливу об'єктів (процесів), що належать цій території. Показано, що уявлення моделі території як системи об'єктів (чи процесів), що впливають на властивості цієї території, та зв'язків між ними, добре узгоджується з математичними основами БКАР та надає обґрунтування вибору набору критеріїв та альтернатив.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблено технологію геопросторового багатокритеріального аналізу рішень, яка базується на існуючих функціях геообробки інформації та може бути повністю інтегрована в ГІС середовище. Застосування запропонованого підходу дозволить у майбутньому створювати сценарії та програмні засоби для сучасних геоінформаційних систем. Ці інструменти будуть особливо важливими на етапі відновлення економічного потенціалу та відбудови інфраструктури України.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні моделі процесу аналізу геопросторових багатокритеріальних рішень з метою врахування різноманітних стратегій прийняття рішень, зокрема в умовах ризику та невизначеності.

Список використаної літератури

1. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплідитель А., Чумаченко С. *Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу*. Київ: ГО "Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с.

2. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Springer, New York. 2015, 331 p. DOI: 10.1007/978-3-540-74757-4.
3. Lidouh K. On themotivation behind MCDA and GIS integration. *Multicriteria Decision Making*. 2013. Vol. 3, № 2/3. P. 101–113. DOI:10.1504/IJMCDM.2013.053727.
4. Kuznichenko S., Kovalenko L., Buchynska I., Gunchenko Y., Development of a multi-criteria model for making decisions on the location of solid waste landfills. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol.2, No. 3(92). P. 21–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.129287
5. Kuznichenko S. D. Model of the process of geospatial multi-criteria decision analysis for territorial planning. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022. Vol. 2, P.140–153. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-14>.
6. Kuznichenko S., Buchynska I., Kovalenko L., Gunchenko, Y. Suitable site selection using two-stage GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1080 AISC, P.214–230. DOI: 10.1007/978-3-030-33695-0_16
7. Saaty T. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation. *New York, NY: McGraw*, 1980. P. 287.
8. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965. Vol. 8, No. 3, P. 338–353.
9. Кузніченко С. Д., Гунченко Ю. О., Бучинська І. В. Нечітка модель обробки геопросторових даних в мультикритеріальному аналізі придатності територій. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2018. № 61. С.90-102.
10. Yager R. R. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 1996. Vol.11(1), P. 49–73.
11. Кузніченко С., Бучинська І. Вибір операторів агрегування для багатокритеріальної оцінки придатності територій. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2019. Т. 2, № 6. С. 46–56. DOI: 10.28925/2663-4023.2019.6.4656.
12. Stankevich S, Kharytonov N, Dudar T, Kozlova A. *Risk Assessment of Land Degradation Using Satellite Imagery and Geospatial Modelling in Ukraine. Land Degradation and Desertification - a Global Crisis. InTech*, 2016. P.15–25. DOI: 10.5772/62403

References (transliterated)

1. Holubtsov O., Sorokina L., Splodytel A., Chumachenko S. *Vplyv viiny rosii proty Ukrainy na stan ukrainskykh gruntiv. Rezultaty analizu*. [The impact of russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian soils. Analysis results]. Kyiv: NGO "Center for Environmental Initiatives "Ekodia", 2023. 32 p. (In Ukr.)
2. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Springer, New York. 2015, 331 p. DOI: 10.1007/978-3-540-74757-4.
3. Lidouh K. On themotivation behind MCDA and GIS integration. *Multicriteria Decision Making*. 2013. Vol. 3, № 2/3. P. 101–113. DOI: 10.1504/IJMCDM.2013.053727.
4. Kuznichenko S., Kovalenko L., Buchynska I., Gunchenko Y., Development of a multi-criteria model for making decisions on the location of solid waste landfills. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol.2, No. 3(92). P. 21–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.129287
5. Kuznichenko S. D. Model of the process of geospatial multi-criteria decision analysis for territorial planning. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022. Vol. 2, P.140–153. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-14>.
6. Kuznichenko S., Buchynska I., Kovalenko L., Gunchenko, Y. Suitable site selection using two-stage GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1080 AISC, P.214–230. DOI: 10.1007/978-3-030-33695-0_16
7. Saaty T. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation. *New York, NY: McGraw*, 1980. P. 287.
8. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965. Vol. 8, No. 3, P. 338–353.
9. Kuznichenko S.D., Hunchenko Yu.O., Buchynska I.V. Nечітка модель обробки геопросторових даних в мультикритеріальному аналізі придатності території [Fuzzy model of geospatial data processing in multi-criteria analysis of suitability of territories].

Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka [Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko Kyiv National University]. Kyiv, VIKNU, 2018. № 61. P.90-102.

10. Yager R. R. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 1996. Vol.11(1), P. 49–73.
11. Kuznichenko S., Buchynska I. Vybir operatoriv ahrehuvannia dlia bahatokryterialnoi otsinky prydatnosti terytorii [Selection of aggregation operators for a multi-criteria evolution of suitability of territories]. *Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika»* [Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: education, science, technology"], 2019. Vol. 2, № 6. P. 46–56. DOI: 10.28925/2663-4023.2019.6.4656. (In Ukr.).
12. Stankevich S, Kharytonov N, Dudar T, Kozlova A. Risk Assessment of Land Degradation Using Satellite Imagery and Geospatial Modelling in Ukraine. *Land Degradation and Desertification - a Global Crisis. InTech*, 2016. P.15–25. DOI: 10.5772/62403

Hadziuua (received) 14.05.2024

UDC 004.827

S. D. KUZNICHENKO, Candidate of Geographical Sciences (PhD), Docent, Odesa State Environmental University, Associate Professor at the Department of Information Technologies, Odesa, Ukraine; e mail: skuznichenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7982-1298>

D. A. IVANOV, PhD Student, Odesa State Environmental University, Odesa, Ukraine; e mail: skuznichenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>

D. O. KUZNICHENKO, LikeBus logistics company, Odesa, Ukraine; e-mail: kuznichenko.d@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1080-6433>

USING THE GEOSPATIAL MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS MODEL AND METHODS FOR SOIL DEGRADATION RISK MAPPING

Modern methods of spatial analysis and modeling are increasingly being combined with decision-making methods and fuzzy set theory. The latter are actively integrated into the environment of Geographic Information Systems (GIS), such as well-known ones like ArcGIS or QGIS, in the form of separate tools, plugins, or Python scripts. Decision-making methods allow structuring the problem in geographical space, as well as taking into account the knowledge and judgments of experts and the preferences of the decision-maker in determining the priorities of alternative solutions. This paper provides a description of a geospatial multi-criteria decision analysis model, which allows addressing a wide range of ecological and socio-economic issues. An example of applying this model to map soil degradation risk in Ukraine is presented in the paper. According to the object-spatial approach, the properties of a territory are determined as the result of the action (impact) of a set of objects (processes) belonging to this territory. The territory is represented as a two-dimensional discrete grid, each point of which (local area) is an alternative. The set of local areas of the territory constitutes the set of alternatives. The representation of the territory model as a system of objects and relationships between them allows justifying the choice of a set of criteria (factors) for assessing soil degradation risk. Each criterion is a separate raster layer of the map. To build a hierarchical decision-making structure and calculate the importance coefficients of the criteria, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method is used. To account for uncertainty in assessments and judgments of experts at the stages of standardization of alternative attributes by different criteria and aggregation of their assessments, expert membership functions for fuzzy sets and fuzzy quantifiers are applied. The particular feature of the proposed multi-criteria decision analysis model is its low computational complexity and ease of integration into the GIS environment.

Keywords: multi-criteria decision analysis, Analytic Hierarchy Process, Geographic Information System, spatial modeling, expert assessments, soil degradation risk.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Кузнiченко Світлана Дмитрівна / Kuznichenko Svitlana Dmytrivna

Автор 2 / Author 2: Іванов Дмитро Анатолійович / Ivanov Dmytro Anatoliiovych

Автор 3 / Author 3: Кузнiченко Дмитро Олександрович / Kuznichenko Dmytro Oleksandrovych