

НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ОБРОБКИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ В МУЛЬТИКРИТЕРІАЛЬНОМУ АНАЛІЗІ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЙ

В роботі розглядаються нечітка модель і методи обробки геопросторових даних в мультикритеріальному аналізі придатності територій. Запропонована методика і формалізований опис процесу мультикритеріального аналізу в географічному контексті, де альтернативи, критерії та інші елементи вирішення проблеми мають просторові виміри. Описано спосіб декомпозиції множини вихідних об'єктів, що впливають на прийняття рішення, на тематичні шари критеріїв. Описано процедуру дискретизації векторних тематичних шарів критеріїв в растрову модель з використанням Евклідової метрики в якості міри близькості між об'єктами. Запропоновано спосіб стандартизації критеріїв на основі методів нечіткої логіки, що дозволяє використовувати експертні знання в просторовому аналізі. Показано, що фазифікація критеріїв на підставі експертної оцінки нечіткої функції належності, дозволяє в подальшому об'єднати критерії за допомогою нечітких правил виведення. Описані різні методи визначення нормованих ваг критеріїв і оператори агрегування, що можуть бути застосовані в середовищі ГІС. Показано, що використання апарату нечіткої логіки в мультикритеріальному аналізі дозволяє враховувати невизначеність вихідної інформації та отримувати більш інформативну комбіновану карту придатності, за рахунок визначення рангу придатності альтернатив, тобто виконувати ранжування територій за ступенем придатності для розміщення промислових об'єктів.

Ключові слова: геоінформаційні системи, мультикритеріальний аналіз рішень, нечітка логіка, аналіз придатності територій.

Постановка проблеми. Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) є важливим компонентом систем підтримки прийняття рішень (СППР) завдяки розвиненим функціям збереження, обробки і аналізу геоданих, засобам моделювання і наявності інструментів візуалізації. Просторові проблеми, зокрема проблема визначення придатності територій для

розміщення промислових об'єктів, за своєю природою завжди є мультикритеріальними [1], тому просторові СППР часто використовуються у випадках, коли велика кількість альтернатив має бути оцінена на основі декількох критеріїв. Можливості ГІС для генерації набору альтернатив і вибору найкращого рішення, як правило, ґрунтуються на операціях просторового аналізу поверхні (Surface analysis), близькості (Proximity analysis) і накладання (Overlay analysis). Операції накладання дозволяють визначити альтернативи, що одночасно задовольняють набору критеріїв відповідно до правила прийняття рішення, проте вони мають обмежені можливості для включення переваг особи, що приймає рішення (ОПР). Крім того, складність просторових відносин в деяких проблемах не може бути представлена картографічно. Тому, останні 20 років в ГІС активно інтегрують методи мультикритеріального аналізу рішень (МКАР) [2-4], які розширюють можливості ГІС. Мультикритеріальний аналіз надає ОПР методологію, що враховує оціночні судження (тобто вподобання щодо критеріїв і/або альтернатив рішення), дозволяє структурувати проблему і вирішити її програмними засобами, забезпечує прозорість процедури прийняття рішень для ОПР, а також можливість враховувати одночасно якісні і кількісні критерії для комплексної оцінки всіх альтернативних варіантів рішення.

Окремі спроби повної інтеграції інструментів МКАР і ГІС в рамках загального інтерфейсу виявили проблеми, пов'язані з відсутністю гнучкості і інтерактивності подібних систем, які не можуть забезпечити потрібної свободи дій для аналітиків [5]. Тому вибір процедури і відповідних методів МКАР, які можуть забезпечити краще вирішення конкретної проблеми є актуальним завданням для розробників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поєднання МКАР і ГІС є фундаментальним інструментом вирішення просторових проблем у багатьох областях [6-8]. За останні кілька десятиліть було досягнуто значного прогресу в розробці методів мультикритеріального аналізу придатності територій [9-11] і вибору місць розміщення промислових об'єктів [12-14].

В процедурі МКАР істотну роль виграють переваги ОПР і судження експертів, які часто носять розпливчастий, нечіткий характер. Крім того, вихідна інформація, що використовується, часто складається з великої кількості різнорідних факторів, що не подаються формалізованому опису. Це призводить до складності в формулюванні достовірних висновків. Для врахування невизначеності вихідної інформації і суб'єктивних нечітких суджень ОПР є доцільним вдосконалення процесу МКАР в ГІС за допомогою апарату «м'яких» обчислень, теорії нечітких множин [15].

Не зважаючи на те, що питанням дослідження нечітких множин та їх застосуванню в процесі підтримки прийняття рішень приділяється багато уваги [16-18], проблема розробки нечітких моделей обробки просторової інформації для мультикритеріального аналізу придатності територій є актуальною.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо у загальному вигляді методику використання мультикритеріального аналізу рішень для підтримки прийняття управлінських рішень щодо пошуку найкращого місця розташування промислового об'єкту. Загальна діаграма процесу МКАР в ГІС наведена на рис. 1.

При вирішенні подібного завдання важливим є врахування безлічі факторів, які здійснюють вплив на прийняття рішення: географічне положення ділянки і її фізичні характеристики, ресурсне забезпечення виробництва, транспортна та соціальна інфраструктури, стан природного середовища і можливий негативний вплив на нього, нормативно-правові обмеження та ін. Має місце складна структура взаємодії різних об'єктів і факторів, різної фізичної і соціально-економічної природи. Чим точніше будуть визначені ці фактори на попередньому етапі дослідження проблеми, тим більш адекватною буде модель.

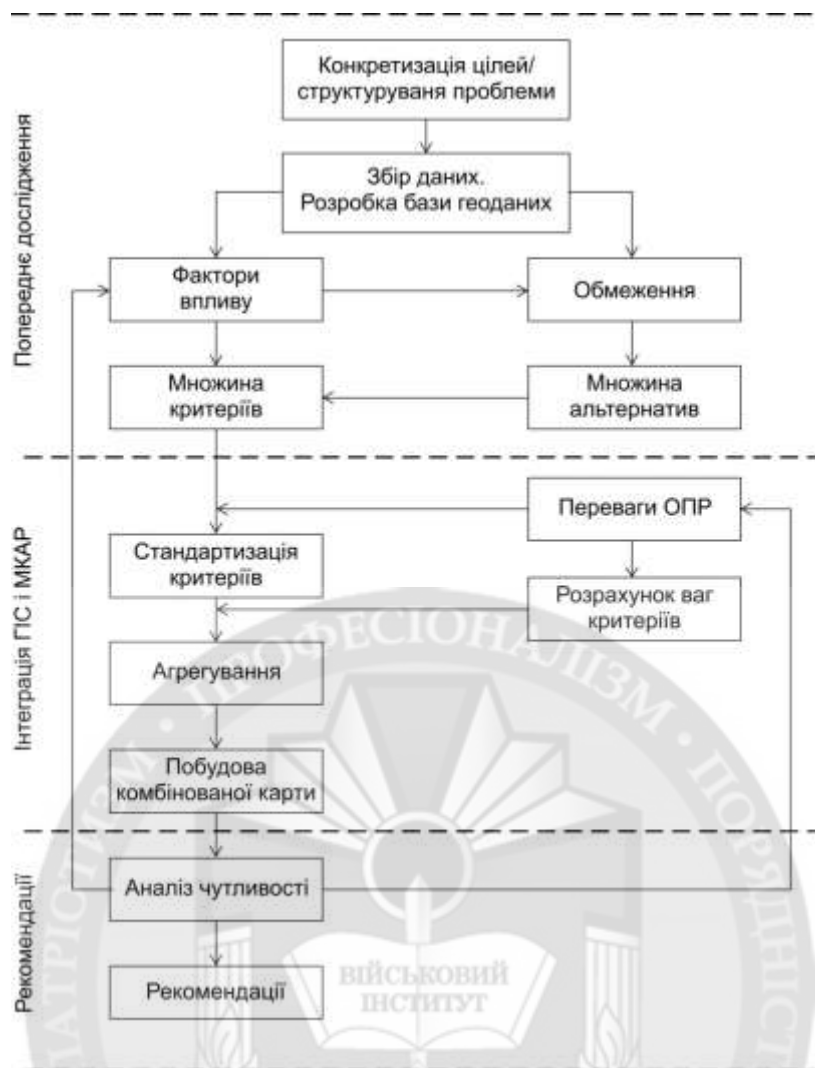


Рис. 1. Діаграма процедури МКАР в ГІС

Вирішення проблеми вибору місць для розміщення промислових об'єктів можна представити двома послідовними етапами. Перший етап – це відбір потенційно придатних місць, мета якого полягає в тому, щоб виключити ту частину території, де розміщення об'єктів неприпустимо, наприклад за екологічними обмеженнями. Відбір придатних місць проводиться шляхом просторового аналізу зі застосуванням ГІС, на основі критеріїв, що враховують природоохоронні вимоги, особливостей рельєфу місцевості, морфологію ландшафту, соціально-економічні чинники тощо. На другому етапі здійснюється ранжування обраних місць за пріоритетом на основі процедури МКАР. Часто використовують метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process – АНП) або метод аналізу мережевих процесів (Analytic Network Process) [19,20]. Результатом є вибір найбільш підходящого місця для будівництва об'єкту.

1. Визначення критеріїв. Опишемо методику декомпозиції множини об'єктів, які належать території, що досліджується, і впливають на прийняття рішення, в тематичні шари критеріїв.

Нехай задана деяка скінченна множина об'єктів, що впливає на рішення:

$$O = \{o_i\} = \left\{ \left(G, \{I_j\} \right) \right\}_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

де G – інформація щодо просторового положення об'єкту; I – атрибутивна інформація про об'єкт; n – загальне число об'єктів, що належать досліджуваній території і впливають на прийняття рішення; m – кількість атрибутів об'єкта.

Необхідно з множини об'єктів O виділити набір підмножин O_j , які впливають на рішення за будь-яким фактором (доступність транспортної інфраструктури, тип ґрунту, екологічна безпека та ін.) і об'єднати їх в окремі векторні шари критеріїв.

$$O = \bigcup_{j=1}^r O_j, \quad (2)$$

де T – множина властивостей території, яку треба врахувати у мультикритеріальному аналізі рішень.

Методика декомпозиції об'єктів передбачає виконання аналізу їх просторової і атрибутивної інформації. Декомпозиція, як правило, виконується відповідно до наступних ознак:

- множина геометричних властивостей: $G = \{g_p, g_l, g_{pol}\}$, де g_p – точкові об'єкти; g_l – лінійні об'єкти; g_{pol} – полігональні об'єкти (наприклад, для водних об'єктів, що можуть бути представлені лінійними і полігональними об'єктами: річки і водосховища відповідно, необхідно виконати декомпозицію на два окремих шари);

- множина атрибутивних властивостей $I = \{Q, N\}$, де Q – множина якісних властивостей, яка визначає приналежність об'єкту до певної тематичної групи (транспортна інфраструктура, водні об'єкти, населені пункти та ін.); N – множина кількісних характеристик властивостей об'єкту (наприклад, для об'єктів, що відносяться до тематичної групи «Населені пункти» можна виконати декомпозицію за чисельністю населення).

Таким чином, приналежність об'єктів до певного шару критеріїв можна визначити кортежем властивостей $S = \langle G, I \rangle$.

Після проведення процесу декомпозиції об'єктів і структурування проблеми отримуємо векторну карту K , що представляє собою набір тематичних векторних шарів-критеріїв K_i (рис. 2):

$$K = \{K_i\}, i = \overline{1, t}, \quad (3)$$

$$K_i = \{O_j^i\}, j = \overline{1, l}, \quad (4)$$

де i – номер шару карти K , j – номер об'єкта в i -ому шарі.

Схематично процес декомпозиції множини об'єктів O на тематичні шари критеріїв наведений на рис. 2.

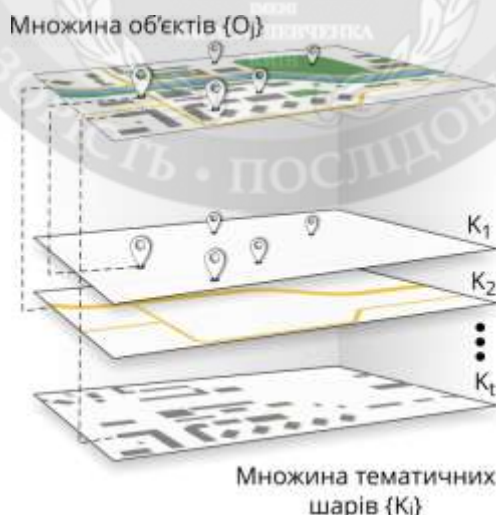


Рис. 2. Схема декомпозиції об'єктів у тематичні шари

Для проведення просторового моделювання з метою знаходження придатного місця розміщення промислового об'єкту, зручно використовувати растрову модель даних. Тому всі отримані тематичні шари об'єктів доцільно представити у вигляді набору комірок (пікселів) в растровій моделі ГІС, яка має вигляд двовимірної дискретної прямокутної сітки $n \times m$ комірок, де $\Delta x = \Delta y = \Delta r$ – розмір комірки:

$$A = \{a_i \mid a_i = n\Delta r, m\Delta r\}. \quad (5)$$

Множина A є множиною альтернатив. Для скорочення (5) можна записати у вигляді:

$$A = \{a_i \mid i = \overline{1, n \cdot m}\}. \quad (6)$$

Важно обрати таку процедуру дискретизації векторних шарів критеріїв в растр, яка дозволить отримати набір комірок, атрибути яких несуть в собі змістовну інформацію про значення функції впливу об'єктів шару. Так, наприклад, атрибути можуть бути отримані з векторних карт, що містять точкові об'єкти пунктів спостереження за значенням деякого фактору з використанням різних методів інтерполяції. Часто для вивчення співвідношення між об'єктами і їх взаємодії використовують різні метрики близькості [21]: манхеттенську, евклідову, Чебишова та ін. Найбільш часто для дослідження відношення 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 :

$$d(O_1, O_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (7)$$

При перетворенні векторного шару в растровий шар, об'єкт O_j представляється набором комірок (рис. 3), кожна з яких має просторові координати і атрибут:

$$O_j = \{(a)_i\} = \{((x_j, y_j)_i, v_i)\}, i = \overline{1, k}, \quad (8)$$

де v - атрибут, k - кількість комірок, що покривають об'єкт O_j .

У випадку растрової моделі даних відстань від будь-якої комірки растру до об'єкту O_j дорівнює мінімальній відстані від цієї комірки до кожної комірки, що покриває об'єкт, який досліджується:

$$ED(O_j, C) = \min_i \{d(O_j, C)_i\}, i = \overline{1, k}. \quad (9)$$

Таким чином, буде побудований растр відстаней $R(ED)$ у якого кожна комірка містить атрибут, який дорівнює значенню Евклідової відстані від неї до найближчого об'єкту, розрахований відповідно (9):

$$R_k(ED) = \{((x_i, y_j), ED_{ij}^k)\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, t}. \quad (10)$$

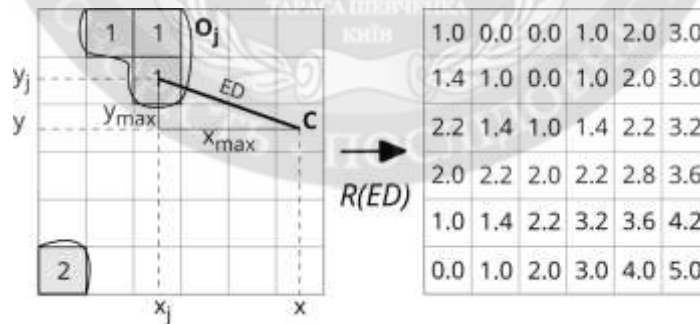


Рис. 3. Схема процесу побудови растру Евклідових відстаней

На множині альтернатив A можуть бути накладення обмеження: на значення атрибутів (непросторові обмеження) або на розташування (просторові обмеження). Як правило, обмеження представляються набором растрових шарів, які перекласифікують так, що атрибути комірок з неприпустимими альтернативами мають значення 0, а з припустимими альтернативами – значення 1. Загальний обмежуючий шар K_c може бути побудований з використанням операції кон'юнкції:

$$K_c = \prod_{r=1}^R K_r, R \subset T, \quad (11)$$

де K_r – тематичний растровий обмежуючий шар; R – множина тематичних растрових шарів, з яких будується загальний обмежуючий шар; T – загальна множина тематичних растрових шарів. Для визначення множини можливих альтернатив A' з множини альтернатив A треба вилючити множину неприпустимих за обмеженнями комірок, використовуючи шар K_c в якості кон'юнктивного фільтру.

Після виконання процедури дискретизації, оскільки атрибути служать змінними рішення, то можна представити значення атрибуту критерію як a_{ij} , тобто значення атрибуту за j -им критерієм і за i -ою альтернативою :

$$A = \{a_{ij} \mid i = \overline{1, n \cdot m}, j = \overline{1, t}\}. \quad (12)$$

2. Стандартизація критеріїв. Шари критеріїв, як правило, мають різні діапазони чи шкали значень атрибутів. Методи МКАР вимагають перетворення критеріїв оцінки в порівнянні одиниці. Процедури перетворення необроблених даних у порівнянні одиниці називають методами масштабування значень або стандартизації. Процедура стандартизації дозволяє виконати масштабування критеріїв, тобто перенести вихідні значення атрибутів з необробленої шкали в шкалу $[0, 1]$. Одним з найбільш популярних методів для стандартизації критеріїв оцінки на основі ГІС є процедура Score Range Procedure, SRP [3], що заснована на оцінці діапазону і є окремим випадком підходу до масштабування на основі функції корисності. Так для k -го критерію функція корисності, що максимізує критерій і перетворює вихідні значення критерію a_{ik} в стандартизовані значення $v(a_{ik})$, задається наступним чином:

$$v(a_{ik}) = \left(\frac{a_{ik} - \min_i \{a_{ik}\}}{\max_i \{a_{ik}\} - \min_i \{a_{ik}\}} \right)^p, \quad (13)$$

де $p > 0$ – параметр.

Форма функції корисності визначається перевагами ОПР. При $p=0$ функція корисності має лінійну форму.

Більш загальний підхід до масштабування значень передбачає концепція членства в нечіткій множині [15]. Опис просторової інформації на основі методів нечіткої логіки базується на перетворенні значень атрибутів k -го шару у значення ступені належності до нечіткої множини A_k :

$$A_k = \{(v, \mu_a^k(v)) \mid v \in U\}, \mu_a^k(v) : v \rightarrow [0, 1], \quad (14)$$

де v – значення атрибуту, U – безперервна множина значень атрибутів.

Функція належності $\mu_a(v)$ вказує ступінь належності атрибута v до нечіткій множини A_k . Чим більше $\mu_a(v)$, тим більшою мірою атрибут відповідає властивостям нечіткої множини. Як правило, функція належності будується за участю експерта (групи експертів), таким чином, що ступінь належності приблизно дорівнює інтенсивності прояву деякого фактору. На практиці застосовуються такі види функцій належності: лінійні, трикутні і трапецеїдальні (лінійно-кусові); нелінійні (функція Гауса, сигмоїдальна функція, сплайн).

Фазифікація шарів критеріїв, тобто перетворення їх значень у нечітку множину, на підставі експертної оцінки нечіткої функції належності, дозволяє побудувати растр придатності для k -го критерію, кожна комірка якого містить значення функції належності $\mu_a^k(v)$ для атрибуту комірки v :

$$R_k(\mu_a) = \left\{ \left((x_i, y_j), \mu_a^k(v_{ij}^k) \right) \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, t}. \quad (15)$$

На рис. 4 наведений приклад стандартизації шару критерію, що містить об'єкти транспортної мережі. Векторний шар з лінійними об'єктами транспортної мережі відповідно (11) і (12) був перетворений у растровий шар Евклідових відстаней. Растр, що враховує ступень придатності кожної комірки за критерієм був побудований відповідно до запропонованої експертами кусково-лінійної трапецеїдальної функції належності $\mu_a(v)$.

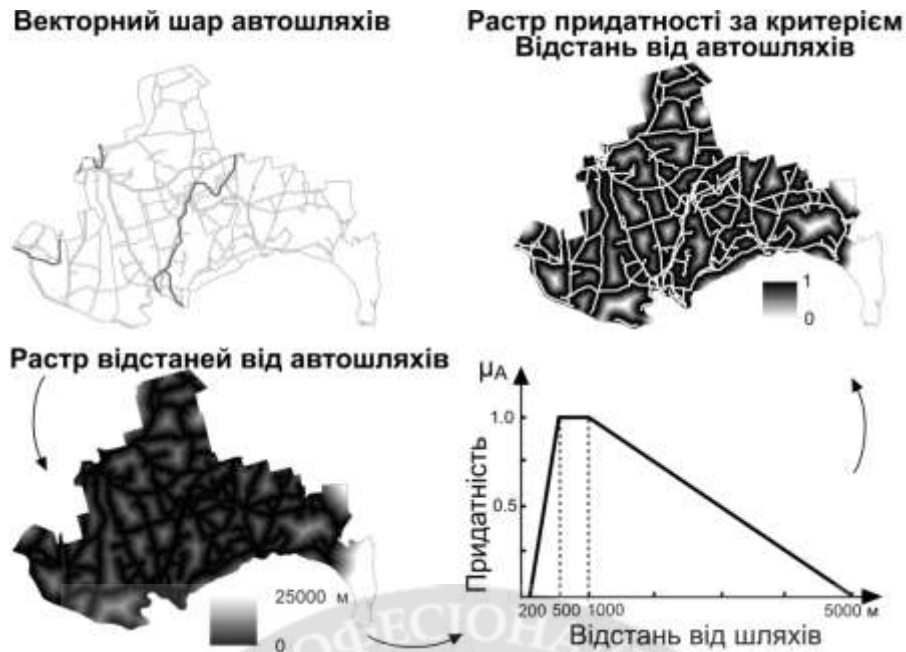


Рис. 4. Схема процесу стандартизації растру відстаней від транспортної мережі

3. Розрахунок ваг критеріїв. Використання мультикритеріального аналізу рішень передбачає призначення ваг критеріїв для задавання їх відносної важливості. У випадку t критеріїв, множина ваг визначається наступним чином:

$$W = \{w_i \mid \sum w = 1, i = \overline{1, t}\}. \quad (16)$$

Найпростішим способом оцінювання важливості критеріїв є ранжування (Ranking Method), тобто упорядкування критеріїв експертом у порядку важливості (самий важливий – 1, другий важливий – 2, і т.і.). Після того, як рейтинг встановлений, ваги критеріїв розраховуються відповідно до рівняння:

$$w_i = \frac{t - r_i + 1}{\sum_{i=1}^t (t - r_i + 1)}, \quad (17)$$

де w_i – нормована вага для i -го критерію, t – кількість критеріїв ($j = 1, 2, \dots, t$), а r_i – рангова позиція критерію.

Ваги критеріїв можуть бути знайдені безпосереднім оцінюванням експертами на основі заданої шкали, наприклад, від 0 до 100. В такому випадку нормована вага критерію розраховується наступним чином:

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum w'}, \quad (18)$$

де w_i – нормована вага для i -го критерію, а w'_i – оцінка для i -го критерію.

Нормовані ваги критеріїв можуть бути розраховані методом аналізу ієрархії (MAI) [19], який заснований на парному порівнянні критеріїв за допомогою 9-ти бальної фундаментальної шкали абсолютних чисел Сааті (табл. 1). За результатами парного порівняння n критеріїв можна побудувати матрицю $A(n \times n)$, у якій кожний елемент a_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, n$ – це оцінка парного порівняння i -го критерію з j -м критерієм.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} \neq 0. \quad (19)$$

Таблиця 1

Лінгвістичні змінні і відповідні нечіткі числа		
Шкала Сааті	Визначення	Нечітка трикутна шкала
1	відсутня перевага	(1, 1, 1)
3	слабка перевага	(2, 3, 4)
5	суттєва перевага	(4, 5, 6)
7	явна перевага	(6, 7, 8)
9	абсолютна перевага	(9, 9, 9)
2	проміжні значення між сусідніми значеннями шкали	(1, 2, 3)
4		(3, 4, 5)
6		(5, 6, 7)
8		(7, 8, 9)

Для матриці (19) розраховуються нормований головний власний вектор матриці і формується вектор пріоритетів. Для контролю узгодженості експертних оцінок вводяться дві пов'язані характеристики – індекс узгодженості (Consistency Index, C.I.) і відношення узгодженості (Consistency Ratio, C.R.).

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (20)$$

де n – кількість критеріїв, а $\lambda_{\max}$ – найбільше власне значення матриці.

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}, \quad (21)$$

де $R.I.$ – це індекс випадкової неузгодженості, який залежить від рангу матриці (табл. 2). Розумний рівень узгодженості в парних порівняннях $C.R. < 0.10$, тоді як $C.R. \geq 0.10$ вказує на суперечливі судження експерта.

Таблиця 2

Значення випадкового індексу (RI) в залежності від рангу матриці

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R.I.$	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Оскільки традиційний МАІ не враховує невизначеність та суб'єктивність в судженнях експертів, то є сенс використовувати модифікований нечіткий МАІ, в якому парні порівняння критеріїв виконуються через лінгвістичні змінні представлені трикутними числами (табл. 1).

На першому етапі експерт трансформує чітку матрицю парних порівнянь A (після перевірки узгодженості оцінок, $C.R. < 0.10$) у нечітку матрицю $\tilde{A}$ за допомогою шкали з трикутними нечіткими числами:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

де $\tilde{a}_{ij}$ – результат порівняння i -го критерію з j -м критерієм, виражений через нечітку трикутну шкалу.

Нечіткі ваги кожного критерію можна знайти використовуючи векторне підсумовування, згідно рівняння:

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = (lw_i, mw_i, uw_i), \quad (23)$$

де $\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n$ – середнє геометричне значень нечіткого порівняння кожного критерію.

Дефазифікація нечіткої ваги виконується із застосуванням рівняння:

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3}, \quad (24)$$

де M_i – чітке число, яке треба нормалізувати:

$$w_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}. \quad (25)$$

4. Агрегування критеріїв. Правило комбінування (агрегування) інтегрують дані та інформацію про альтернативи (значення атрибутів критеріїв) та переваги ОІР (ваги критеріїв) в загальну оцінку альтернатив. Агрегування атрибутів може бути виконано з використанням різних методів МКАР, які впроваджені в ГІС. Найпростішим методом є метод зваженої лінійної комбінації (weighted linear combination, WLC), який базується на знаходженні середньозваженого значення. Функція належності альтернативи розраховується наступним чином:

$$\mu_a^{WLC}(a_i) = \sum_{j=1}^T w_j \mu_a^j(a_i). \quad (26)$$

де $\mu_a^j(a_i)$ – функція належності i -ої альтернативи до j -го критерію, а w_j – нормалізована вага j -го критерію і $\sum_{j=1}^T w_j = 1$.

Метод WLC є компенсаційним, тобто дозволяє компенсувати погану придатність одного критерію, доброю придатністю іншого критерію. Альтернативою WLC є оператор Ягера (OWA), який був розроблений в контексті теорії нечітких множин [22]. Він включає до себе зважене усереднення для конкретних випадків, а оператори максимум та мінімум – як екстремуми. Метод має два набори вагів: важливості критерію і порядку. Змінюючи вагові коефіцієнти порядку, можна створити карти для різних стратегій прийняття рішень. Оператор Ягера є гнучким і дозволяє за допомогою нечіткого квантифікатора формалізувати експертну інформацію про допустиму форму компромісу між значеннями за різними окремими критеріями.

Для агрегування критеріїв можуть бути використані некомпенсаційні методи, наприклад, операції нечіткої логіки перетин або об'єднання.

Стандартний нечіткий перетин визначається:

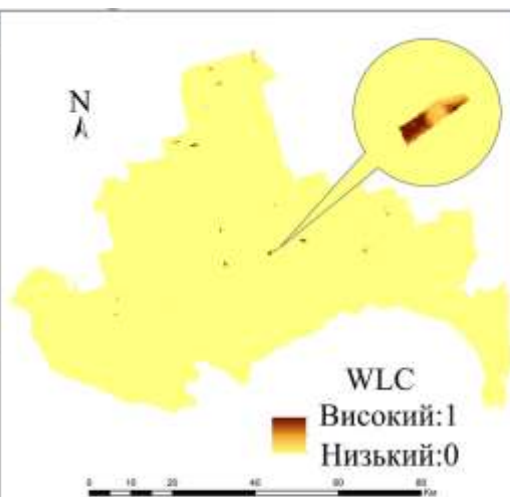
$$\bigcap_{i=1}^t \mu_a^i(x) = \min [\mu_a^1(x), \mu_a^2(x), \dots, \mu_a^t(x)]. \quad (27)$$

Стандартне нечітке об'єднання визначається:

$$\bigcup_{i=1}^t \mu_a^i(x) = \max [\mu_a^1(x), \mu_a^2(x), \dots, \mu_a^t(x)]. \quad (28)$$

Використання операції нечіткого перетину (27) призводить до оцінювання альтернативи на основі лише найнижчого рангу, операція нечіткого об'єднання (28) враховує тільки кращі оцінки всіх критеріїв.

За методикою обробки геопросторової інформації, що запропонована у статті, була побудована мультикритеріальна модель прийняття рішення по розміщенню полігону твердих побутових відходів (ТПВ) на півдні Одеської області [13]. На рис. 5 наведена підсумкова комбінована карта придатності території для розміщення полігонів ТПВ, що була побудована з використанням комбінації нечіткого MAI і WLC.



бінована карта придатності території для розміщення по-
за допомогою набору програм ArcGIS 10.5. В якості в-
ова модель рельєфу (ЦМР) за космічним знімком
ртографічного серверу Open Street Map тематичн
регування критеріїв виконано за допомогою інструменті
лятору растра. Для розрахунку ваги критеріїв згідн
дова ArcGIS на мові програмування Python.
На основі запропонованої методики обробки геопр
ому аналізу придатності територій може бути побуд
виконано ранжування територій за ступенем придатно
тів. Застосування апарату нечіткої логіки, дозволяє вра
що частково компенсує невизначеність вихідної інф
іду експертів, а також отримати більш інформативну
я рангу придатності альтернатив.

бінована карта придатності території для розміщення по-
за допомогою набору програм ArcGIS 10.5. В якості в-
ова модель рельєфу (ЦМР) за космічним знімком
ртографічного серверу Open Street Map тематичн
регування критеріїв виконано за допомогою інструменті
лятору растра. Для розрахунку ваги критеріїв згідн
дова ArcGIS на мові програмування Python.
На основі запропонованої методики обробки геопр
ому аналізу придатності територій може бути побуд
виконано ранжування територій за ступенем придатно
тів. Застосування апарату нечіткої логіки, дозволяє вра
що частково компенсує невизначеність вихідної інф
іду експертів, а також отримати більш інформативну
я рангу придатності альтернатив.

Mousseau V. Spatial multicriteria decision making // Shehkar S.
Springer-Verlag, New York, 2008. P. 747–753.
Martel J.M. Enhancing geographical information systems capabil

бінована карта придатності території для розміщення по-
за допомогою набору програм ArcGIS 10.5. В якості в-
ова модель рельєфу (ЦМР) за космічним знімком
ртографічного серверу Open Street Map тематичн
регування критеріїв виконано за допомогою інструменті
лятору растра. Для розрахунку ваги критеріїв згідн
дова ArcGIS на мові програмування Python.
На основі запропонованої методики обробки геопр
ому аналізу придатності територій може бути побуд
виконано ранжування територій за ступенем придатно
тів. Застосування апарату нечіткої логіки, дозволяє вра
що частково компенсує невизначеність вихідної інф
іду експертів, а також отримати більш інформативну
я рангу придатності альтернатив.

бінована карта придатності території для розміщення по-
за допомогою набору програм ArcGIS 10.5. В якості в-
ова модель рельєфу (ЦМР) за космічним знімком
ртографічного серверу Open Street Map тематичн
регування критеріїв виконано за допомогою інструменті
лятору растра. Для розрахунку ваги критеріїв згідн
дова ArcGIS на мові програмування Python.
На основі запропонованої методики обробки геопр
ому аналізу придатності територій може бути побуд
виконано ранжування територій за ступенем придатно
тів. Застосування апарату нечіткої логіки, дозволяє вра
що частково компенсує невизначеність вихідної інф
іду експертів, а також отримати більш інформативну
я рангу придатності альтернатив.

- бінована карта придатності території для розміщення по-
за допомогою набору програм ArcGIS 10.5. В якості в-
ова модель рельєфу (ЦМР) за космічним знімком
ртографічного серверу Open Street Map тематичн
регування критеріїв виконано за допомогою інструменті
лятору растра. Для розрахунку ваги критеріїв згідн
дова ArcGIS на мові програмування Python.
На основі запропонованої методики обробки геопр
ому аналізу придатності територій може бути побуд
виконано ранжування територій за ступенем придатно
тів. Застосування апарату нечіткої логіки, дозволяє вра
що частково компенсує невизначеність вихідної інф
іду експертів, а також отримати більш інформативну
я рангу придатності альтернатив.

9. Lashari Z., Yousif M., Sahito N., Brohi S., Meghwar S., Khokhar U. D., Land Q. Suitability Analysis for Public Parks using the GIS Application, *Sindh University Research Journal (Science Series)*, 2017. Vol.49(09). P. 505–512.
10. Joerin F., Theriault M., Musy A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment, *Int. j. of geographical information science*, 2001. Vol. 15, No. 2. P. 153-174.
11. Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview, *Progress in planning*, Elsevier, 2004. P. 62-65.
12. Giovanni De Feo, Sabino De Gisi. Using MCDA and GIS for hazardous waste landfill siting considering land scarcity for waste disposal. // *Waste Management*. 2014. No. 34. P. 2225 – 2238.
13. 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.
14. Rikalovic A., Cosic I., Lazarevic D. GIS Based Multi-Criteria Analysis for Industrial Site Selection, *Procedia Engineering*, 2014. Vol. 69, No. 12. P. 1054 – 1063.
15. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965. Vol. 8 (3). P. 338–353.
16. Mardani A., Jusoh A., Zavadskas E. Fuzzy Multiple Criteria Decision-Making Techniques and Applications – Two decades review from 1994 to 2014, *Expert Systems with Applications*, 2015. Vol. 42, No. 05. P. 4126–4148.
17. Chang N., Parvathinathan G., Breeden J.B. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region, *Journal of Environmental Management*, 2008. No. 87. P. 139–153.
18. Feizizadeh B., Shadman Roodposhti M., Jankowski P., Blaschke T. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping, *Comput Geosci*. 2014. No. 73. P. 208–221.
19. Saaty T. L. *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation*. New York, NY: McGraw, 1980. P. 287.
20. Saaty Thomas L. (). *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, 1996. P. 15213.
21. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализы: пер. с англ А.М. Хотинский, С.Б. Королева. – М.: Финансы и статистика, 1989. С. 216 .
22. Yager R. R. “On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making”, *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 1988. Vol. 18. P. 183–190.

REFERENCES:

1. Chakhar S., Mousseau V. Spatial multicriteria decision making // Shehkar S. and H. Xiong (Eds.), *Encyclopedia of GIS*, Springer-Verlag, New York, 2008. P. 747–753.
2. Chakhar S., Martel J.M. Enhancing geographical information systems capabilities with multicriteria evaluation functions, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2003. Vol. 7, No. 2. P. 69–71.
3. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature, *International Journal of Geographical Information Science*, 2006. Vol.20 (7). P. 703–726.
4. Malczewski J., Rinner C., *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*, 2015, Springer, New York.
5. Lidouh K. On themotivation behind MCDA and GIS integration, *Int. J. Multicriteria Decision Making*, 2013. Vol. 3, No. 2/3. P. 101–113.
6. Afshari Ali, Vatanparast Mahdi, Čóckalo Dragan. Application of multi criteria decision making to urban planning – A review, *Journal of Engineering Management and Competitiveness (JEMC)*, 2016. Vol. 6/03. P. 46-53.
7. Kuznichenko S., Buchynska I. Methodology for creating a GIS-based integrated flood monitoring system, *East European Conference on Mathematical Foundations and Software Technology of Internet of Everything (MSTIoE)*, Kyiv, Ukraine – Vol 2: Post-proceedings: Revised Selected Papers, 2017. P. 19-25.
8. Mardani A., Jusoh A., MD Nor K., Khalifah Z., Zakwan N., Valipour A. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014, *Economic Research*, 2015. Vol. 28, No. 1. P. 516-571.
9. Lashari Z., Yousif M., Sahito N., Brohi S., Meghwar S., Khokhar U. D., Land Q. Suitability Analysis for Public Parks using the GIS Application, *Sindh University Research Journal (Science Series)*, 2017. Vol.49(09). P. 505–512.

10. Joerin F., Theriault M., Musy A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment, *Int. j. of geographical information science*, 2001. Vol. 15, No. 2. P. 153-174.
11. Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview, *Progress in planning*, Elsevier, 2004. P. 62-65.
12. Giovanni De Feo, Sabino De Gisi. Using MCDA and GIS for hazardous waste landfill siting considering land scarcity for waste disposal. // *Waste Management*. 2014. No. 34. P. 2225 – 2238.
13. 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.
14. Rikalovic A., Cosic I., Lazarevic D. GIS Based Multi-Criteria Analysis for Industrial Site Selection, *Procedia Engineering*, 2014. Vol. 69, No. 12. P. 1054 – 1063.
15. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965. Vol. 8 (3). P. 338–353.
16. Mardani A., Jusoh A., Zavadskas E. Fuzzy Multiple Criteria Decision-Making Techniques and Applications – Two decades review from 1994 to 2014, *Expert Systems with Applications*, 2015. Vol. 42, No. 05. P. 4126–4148.
17. Chang N., Parvathinathan G., Breeden J.B. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region, *Journal of Environmental Management*, 2008. No. 87. P. 139–153.
18. Feizizadeh B., Shadman Roodposhti M., Jankowski P., Blaschke T. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping, *Comput Geosci*. 2014. No. 73. P. 208–221.
19. Saaty T. L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation. New York, NY: McGraw, 1980. P. 287.
20. Saaty Thomas L. (). Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, 1996. P. 15213.
21. Dzh.-O. Kim, CH.U. M'yuller, U.R. Klekka i dr. Faktornyj, diskriminantnyj i klasternyj analizy. – transl. from english Hotinskij A.M., Koroleva S.B M. 1989. P. 216
22. Yager R. R. “On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making”, *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 1988. Vol. 18. P. 183–190.

к.геогр.н., доц. Кузниченко С.Д., д.т.н., доц. Гунченко Ю.А., Бучинская И.В.
**НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В
МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ПРИГОДНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ**

В статье рассматриваются нечеткая модель и методы обработки геопространственных данных в многокритериальном анализе пригодности территорий. Предложена методика и формализованное описание процесса многокритериального анализа в географическом контексте, где альтернативы, критерии и другие элементы решения проблемы имеют пространственные измерения. Описан способ декомпозиции множества исходных объектов, влияющих на принятие решения, на тематические слои критериев. Описана процедура дискретизации векторных тематических слоев критериев в растровую модель с использованием Евклидовой метрики в качестве меры близости между объектами. Предложен способ стандартизации критериев на основе методов нечеткой логики, что позволяет использовать экспертные знания в пространственном анализе. Показано, что фазификация критериев на основе экспертной оценки нечеткой функции принадлежности, позволяет в дальнейшем объединить критерии с помощью нечетких правил вывода. Описаны различные методы определения нормированных весов важности критериев и операторы агрегирования, которые могут быть применены в среде ГИС. Показано, что использование аппарата нечеткой логики в многокритериальном анализе позволяет учитывать неопределенность исходной информации и получать более информативную комбинированную карту пригодности, за счет определения ранга пригодности альтернатив, то есть выполнять ранжирование территорий по степени пригодности для размещения промышленных объектов.

Ключевые слова: геоинформационные системы, многокритериальный анализ решений, нечеткая логика, анализ пригодности территорий.

Ph.D. Kuznichenko S.D., prof. Gunchenko Yu.A., Buchynska I.V.
**FUZZY MODEL OF GEOSPATIAL DATA PROCESSING IN MULTI-CRITERIA
SUITABILITY ANALYSIS**

The article examines fuzzy model, methods and approaches to geospatial data processing into the multi-criteria site suitability analysis. The formalized description of spatial decision-making process is based on the use of multi-criterial decision analysis in a spatial context, where alternatives, criteria, and other elements of solution to the problem have spatial dimensions. The method of decomposition of the set of source objects influencing the decision making on the thematic layers of criteria, is described. The sampling procedure for vector layers for criteria is described in a raster model, which allows a set of cells, attributes of which contain information about the value of Euclidean distance between objects. The method of standardization of criteria based on fuzzy logic methods, which allows using expert knowledge in spatial analysis, is proposed. It is shown that phasing of criteria, that is, the transformation of their values of attributes into a fuzzy set on the basis of the expert estimation of a fuzzy membership function allows further combining of criteria with the help of fuzzy rules of output. Different methods for determining the standardized weighting criteria and aggregation operators that can be used in the GIS environment, are described. It is shown that the use of fuzzy logic in the multiple-criteria decision analysis allows to take into account the uncertainty of the source information and to obtain a more informative combined suitability map by determining the rank of suitability of alternatives, that is, to perform ranking of territories according to the degree of suitability for industrial site selection.

Keywords: geographic information system, multiple-criteria decision analysis, fuzzy logic, site selection analysis.

