

С. Д. Кузніченко
І. В. Бучинська

МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ В
ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

С. Д. Кузнiченко, І. В. Бучинська

**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ
В ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Монографія

Житомир
ТОВ «505»
2021

УДК 004.827, 004.048, 004.942:628.4.032
К89

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №7 від 24.09.2020 р.)

Рецензенти:

Положаснко А. С., д. техн. н., професор ОНПУ,

Петришин Л. Б., д. техн. н., професор Краківської гірничо-металургійною академії ім. С. Сташціа

Кузніченко С. Д., Бучинська І. В.

К89 Моделі, методи та інструментальні засоби багатокритеріального аналізу рішень в геоінформаційних системах: монографія. Житомир: ТОВ «505», 2021. 202 с.

ISBN 978-617-7892-11-2

У монографії наведено сучасні методи та засоби багатокритеріального аналізу рішень, які можуть бути інтегровані в геоінформаційні системи. Головну увагу приділено питанням розробки методів багатокритеріального аналізу рішень з розміщення просторових об'єктів на основі застосування апарату теорій нечітких множин і нечіткої логіки. Прикладний аспект теорії подано у вигляді створених ГІС-орієнтованих програмних засобів обробки та аналізу просторової інформації для пакету ESRI ArcGIS 10.7. Застосування запропонованих моделей, методів та програмних засобів розглянуто на прикладі розв'язання актуальної проблеми раціонального розміщення полігонів твердих побутових відходів. Для фахівців у галузі інформаційних технологій, геодезії та землеустрою, екології, а також для студентів і аспірантів відповідних спеціальностей.

The monograph presents modern methods and tools for multicriteria analysis of solutions that can be integrated into the GIS. The main attention is paid to the development of methods of multicriteria analysis of solutions for the placement of spatial objects based on the application of the apparatus of fuzzy set theories and fuzzy logic. The applied aspect of the theory is presented in the form of created GIS-oriented software for processing and analysis of spatial information for the ESRI ArcGIS 10.7 package. For specialists in area of information technologies, geodesy, ecology, and for students, graduate students of corresponding specialities.

УДК 004.827, 004.048, 004.942:628.4.032

© Одеський державний
екологічний університет, 2021
© Недострелова Л. В., 2021

ISBN 978-617-7892-11-2

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА ПІДХОДІВ ДО РОЗМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ.....	12
1.1 Еволюція підходів до вирішення проблеми геопросторового розміщення об'єктів.....	12
1.2 Роль ГІС у забезпеченні вирішення задачі розміщення просторових об'єктів.....	22
1.3 Інтеграція методів та засобів багатокритеріального аналізу рішень в ГІС.....	25
1.3.1 Методи геопросторового аналізу.....	27
1.3.2 Методи багатокритеріального аналізу рішень.....	27
1.3.3 Класифікації просторових проблем прийняття рішень.....	38
1.3.4 Типи інтеграції програмних засобів БКАР в ГІС.....	40
1.4 Огляд існуючих інтегрованих ГІС з функціями БКАР.....	42
РОЗДІЛ 2 НЕЧІТКІ МОДЕЛІ ТА МЕТОД ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ З РОЗМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ.....	46
2.1 Формалізація процесу геопросторового багатокритеріального аналізу рішень.....	47
2.2 Етап макроаналізу і нечітка модель обробки геопросторової інформації про розміщення об'єктів.....	51
2.2.1 Структура геопросторових даних.....	51
2.2.2 Формалізація опису просторових відношень між об'єктами....	55
2.2.3 Стандартизація атрибутів критеріїв за допомогою апарату теорії нечітких множин.....	62
2.3 Етап мікроаналізу та методи багатокритеріального аналізу рішень.....	72
2.3.1 Методи розрахунку ваг критеріїв.....	73
2.3.2 Метод скринінгу альтернатив.....	77
2.3.3 Метод агрегування на основі OWA оператора Ягера з лінгвістичними квантифікаторами.....	80

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ З РОЗМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ.....	87
3.1 Розробка функціональної моделі процесу геопросторового БКАР...	87
3.2 Розробка структури просторової системи підтримки прийняття рішень з розміщення об'єктів	91
3.3 Розробка нечіткої моделі реляційної бази даних.....	93
3.4 Розробка інструментів геообробки просторової інформації.....	96
3.5 Розробка алгоритмів геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів.....	101
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДА ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ З РОЗМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ (НА ПРИКЛАДІ ПІВДНЯ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ).....	109
4.1 Аналіз стану в сфері поводження з відходами на державному та регіональному рівнях	109
4.2 Використання просторової СППР з розміщення об'єктів	118
4.2.1 Визначення критеріїв оцінки та побудова ієрархічної структури прийняття рішень.....	118
4.2.2 Стандартизація критеріїв оцінки.....	123
4.2.3 Розрахунок ваг критеріїв.....	126
4.2.4 Агрегування оцінок альтернатив.....	128
4.2.5 Результати геопросторового БКАР з розміщення полігону ТПВ на півдні Одеської області	131
4.3 Оцінка ефективності методу геопросторового БКАР з розміщення просторових об'єктів	134
ВИСНОВКИ.....	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
ДОДАТОК А Функціональна модель процесу геопросторового БКАР з розміщення об'єктів ТПВ.....	158
ДОДАТОК Б Растри критеріїв оцінки придатності території.....	164
ДОДАТОК В Результати розрахунку ваг критеріїв	167

ДОДАТОК Г Діаграма сценаріїв багатокритеріального аналізу рішень з розміщення полігону ТПВ.....	170
ДОДАТОК Г Програмний код набору інструментів PYTHON	171
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК	187
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	189
ГЛОСАРІЙ.....	192

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

C.I.	– Consistency Index;
C.R.	–Consistency Ratio;
DEM	– Digital Terrain Model, цифрова модель рельєфу;
DFD	– Data Flow Diagram;
ELECTRE	– ELimination Et Choix Traduisant la REalité;
FAHP	– False Analytic Hierarchy Process, нечіткий аналіз ієрархій;
MADA	–Multi-Attribute Decision Analysis;
MADM	– Multi-Attributive Decision Making;
MCD A	– Multiple-Criteria Decision Analysis;
MCDM	– Multiple-Criteria Decision Making;
MODM	– Multi-Objective Decision Making;
NIS	– Negative Ideal Solution, негативне ідеальне рішення;
ORT	– Outranking Relation Theory, теорія відношення переваги, або outranking methods;
OWA	– Ordered Weighted Averaging;
PIS	– Positive Ideal Solution, позитивне ідеальне рішення;
PROMETHEE	– Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluation;
RIM	– Regular Increasing Monotone;
SRP	– Score Range Procedure ;
TOPSIS	– Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions;
VIKOR	– VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje;
WLC	– Weighted Linear Combination;
WS	– Weighted Sum;
AHP	– Analytic Hierarchy Process, аналіз ієрархій;
БГД	– база геоданих;
БД	– база даних ;
БКАР	– багатокритеріальний аналіз рішень;
БНЗ	– база нечітких знань;
ДЗЗ	– дистанційне зондування Землі;
ЄС	– Європейський Союз;
IAC	–інформаційно-аналітична система;

ІС	– інформаційна система;
ІТ	– інформаційна технологія;
МАІ	– метод аналізу ієрархій;
МВВ	– місце видалення відходів;
ОПР	– особа, яка приймає рішення;
ПК	– програмний комплекс;
ППВ	– побутові та подібні відходи;
ППР	– підтримка прийняття рішень;
СППР	– система підтримки прийняття рішень;
ТЕО	– техніко-економічне обґрунтування;
ТПВ	– тверді побутові відходи;
ФН	– функція належності;
ЦМР	– цифрова модель рельєфу.

ВСТУП

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 об'єктів будівництва, за своєю природою завжди є багатокритеріальними [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 геоінформаційного аналізу поверхні (Surface analysis), близькості (Proximity analysis) і накладення (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, яка 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 багатокритеріального аналізу рішень (з англ. MCDM, Multiple-Criteria Decision Making або MCDA, Multiple-Criteria Decision Analysis) [2-4], які розширюють можливості ГІС. Методи багатокритеріального аналізу рішень (БКАР) дозволяють структурувати проблему прийняття рішень в географічному просторі, врахувати оціночні судження (тобто вподобання щодо критеріїв і/або альтернатив рішення), забезпечують прозорість процедури прийняття рішень для ОПР, а також можливість враховувати одночасно якісні і кількісні критерії для комплексної оцінки всіх альтернативних варіантів рішення.

Слід відмітити, що більшість сучасних ГІС загального призначення не містять вбудованих повнофункціональних засобів, які можуть реалізувати складну процедуру БКАР. Використання окремих програмних засобів і інструментів та відсутність єдиної системи обробки експертних знань призводить до збільшення тривалості передпроектних робіт, тобто до збільшення життєвого циклу прийняття рішень, а відповідно і до збільшення ймовірності помилкових результатів на різних його етапах.

Одним із можливих шляхів подолання вищезазначених проблем є розробка та інтеграція в ГІС програмних засобів, що реалізують процедуру БКАР.

Окремі спроби повної інтеграції інструментів БКАР 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 БКАР, які можуть забезпечити краще вирішення конкретної проблеми є актуальним завданням для розробників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій демонструє, що поєднання БКАР і ГІС є фундаментальним інструментом вирішення просторових проблем у багатьох областях [6-10]. За останні кілька десятиліть було досягнуто значного прогресу в розробці методів багатокритеріального аналізу придатності територій [11-13] і вибору місць розміщення просторових об'єктів [14-17].

Проблеми інтеграції методів БКАР і ГІС досліджували вчені Carver S., Jankowski P., Malczewski J., Яцало Б.І., Грицюк С.В. та ін. Безпосередньо застосуванню методів БКАР в ГІС-орієнтованих СППР з розміщення просторових об'єктів присвячені роботи вчених: Aksoy E., Feo G., Sener B., Wang G.

Особливістю задачі багатокритеріального аналізу рішень з розміщення техногенно небезпечних та промислових об'єктів є необхідність враховувати екологічний стан і перспективи соціально-економічного розвитку регіону, вплив даного об'єкта на навколишнє природне і антропогенне середовище, а також вимоги чинного природоохоронного законодавства та санітарно-будівельних норм. Обов'язковою умовою є проведення попередніх експертиз зокрема екологічної експертизи в місці планованого розміщення об'єкта. Це обґрунтовує необхідність врахування експертних знань і використання методів, заснованих на експертних оцінках.

Крім того, часто доводиться стикатися з неточністю вихідної просторової інформації і необхідністю використання критеріїв, що не піддаються формалізованому опису, а також 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 привабливим вбачається підхід, що ґрунтується на використанні в методах

БКАР апарату «м'яких» обчислень, теорії нечітких множин [18]. Не зважаючи на те, що питанням дослідження нечітких множин та їх застосуванню в процесі підтримки прийняття рішень приділяється багато уваги [19-25], проблема розробки нечітких моделей обробки геопросторової інформації для багатокритеріального аналізу придатності територій є актуальною.

Таким чином, в інформаційній системі, заснованій на обробленні геопросторової інформації, із метою підтримки прийняття рішень з розміщення просторових об'єктів, повинні бути вирішені наступні задачі:

- автоматизована обробка вихідної різномірної геопросторової інформації;
- ранжування територій за ступенем придатності для розміщення об'єктів на основі поєднання обробки геопросторової інформації з оцінками та судженнями експертів, за допомогою методів БКАР із застосуванням апарату теорії нечітких множин та нечіткої логіки;
- візуалізація результатів моделювання для різних стратегій прийняття рішень у вигляді комплексної карти придатності.

Зазначені задачі можуть бути вирішені в рамках однієї інформаційної технології.

Таким чином, актуальною є задача ранжування територій за ступенем придатності для розміщення просторових об'єктів в умовах невизначеності ОПР щодо ступенів відносної важливості критеріїв та допустимої стратегії прийняття рішень, із метою подальшої візуалізації результатів моделювання у вигляді комплексної карти придатності. При цьому перспективним вбачається підхід, заснований на інтеграції в ГІС методів БКАР з використанням апарату теорії нечітких множин та нечіткої логіки.

В першому розділі наведено аналіз проблем і підходів до розміщення просторових об'єктів. Виконано класифікацію задач розміщення об'єктів. Обґрунтовано ефективність сумісного застосування методів ГІС-аналізу та методів БКАР для відбору і ранжування територій за ступенем придатності для розміщення об'єктів в середовищі ГІС. Наведено опис методів БКАР, які базуються на оціночних судженнях (перевагах ОПР). Розглянуто основні типи невизначеностей, які найчастіше присутні в ситуації прийняття рішення.

В другому розділі запропоновано метод геопросторового БКАР по вибору місць розміщення об'єктів, який складається з етапів макро- та мікроаналізу, та дозволяє виконати ранжування територій за ступенем придатності з поданням результатів в картографічному вигляді. Запропоновано модель обробки вихідної різномірної геопросторової інформації. Описано спосіб декомпозиції множини вихідних об'єктів, що впливають на прийняття рішення, на тематичні шари критеріїв. Запропоновано процедуру дискретизації векторних шарів критеріїв в растрову модель на основі розрахунку евклідової метрики близькості, а також спосіб визначення множини можливих альтернатив з урахуванням обмежень, що можуть бути накладені на значення атрибутів. Запропоновано метод стандартизації критеріїв на основі математичного апарату нечітких множин. Запропоновано метод розрахунку ваг критеріїв з використанням нечіткої модифікації методу аналізу ієрархій. Розроблено метод скринінгу альтернатив, який дозволяє зменшити кількість альтернатив, а в подальшому і час обробки шарів критеріїв операторами агрегування. Запропонована модифікація OWA оператора Ягера з нечіткими лінгвістичними квантифікаторами для агрегування атрибутів альтернатив з можливістю формалізації нечіткої інформації про допустиму форму компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями.

В третьому розділі розроблено функціональну модель процесу геопросторового БКАР з розміщення об'єктів, яка описує ключові інформаційні процеси і пов'язані з ними інформаційні потоки. Розроблено структуру просторової СППР з розміщення об'єктів у вигляді ГІС-застосунку. Запропонована метамодель побудови нечіткої бази знань системи, яка розширяє реляційну модель для подання нечітких даних. Розроблено інструменти геообробки просторової інформації у вигляді моделей, підготовлених у візуальному конструкторі ModelBuilder та скриптів мовою програмування Python для ArcGIS 10.7. Розроблено діаграми діяльності, що описують етапи виконання методу геопросторового БКАР з розміщення об'єктів.

У четвертому розділі виконано експериментальну перевірку та аналіз ефективності розроблених моделей і методів БКАР на прикладі побудови комплексних карт придатності для розміщення полігону твердих побутових відходів (ТПВ) на півдні Одеської області.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА ПІДХОДІВ ДО РОЗМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Еволюція підходів до вирішення проблеми геопросторового розміщення об'єктів

Геоінформатика сьогодні пропонує низку підходів до вирішення завдання геопросторового розміщення об'єктів на географічно обмеженій території. Вперше ця проблема з'явилася в економічній географії в теорії штандорта (Standorttheorie) [26,27], в наш час її здебільше відносять до завдань геомаркетингових досліджень [28–32].

Задачі теорії розміщення в більшості робіт визначаються як задачі, основними параметрами яких є положення будь-яких об'єктів в просторі і відстані між ними [33–36].

Задачі розміщення прийнято класифікувати за такими основними ознаками: простір розміщення об'єктів, кількість об'єктів розміщення, вид об'єктів розміщення. Відповідна класифікація наведена на рис.1.1 [37,38].

З наведеної класифікації задач розміщення в контексті даного наукового дослідження найбільший інтерес представляє розміщення об'єктів на природних поверхнях. Нові об'єкти у таких моделях можуть бути представлені, наприклад, як точки на евклідовій площині або в тривимірному просторі, і можуть бути розміщені де завгодно в деякій допустимій області. Також враховується метрика простору. Просторовий аналіз дає можливість визначити додаткові умови розміщення об'єктів, враховуючи, наприклад, економічні та соціальні характеристики території, а просторове моделювання – подати отримані візуальні моделі в картографічній формі. В цьому випадку можемо віднести ці завдання до геоінформаційного аналізу задач розміщення.

Найбільш вивченими у наш час є мережеві (дискретні) моделі, до яких відносяться задачі розміщення на графах з відомою кількістю об'єктів. У мережевих моделях існуючі об'єкти представлені вузлами мережі (вершинами графа), а нові об'єкти можуть бути розміщені тільки на вершинах або на вершинах і ребрах графа. Функцією відстані служить найкоротший шлях в мережі. Розміщення невідомої кількості об'єктів потребує додаткового використання методів кластеризації. Щодо задач

розміщення на площині, то вони часто зводяться до стандартних дискретних задач математичного програмування, а задачі розміщення на поверхні – до задач розміщення на площині.

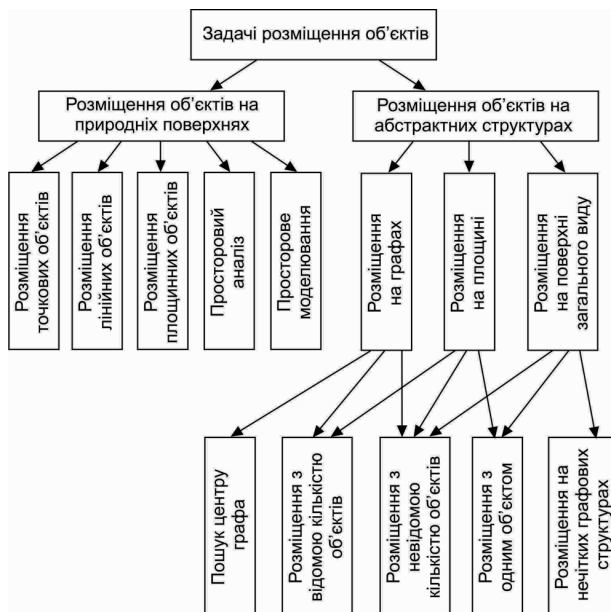


Рисунок 1.1 – Класифікація задач розміщення об'єктів

До перших відомих спроб сформулювати найпростішу задачу розміщення ймовірно можна віднести запропоновану в XVII сторіччі французьким математиком П'єром де Ферма задачу, в якій для трьох точок на площині слід було знайти четверту (медіану), таку, щоб сума відстаней від неї до перших трьох точок була мінімальною [39]. Пізніше, ця задача була частково вирішена математиками Е.Торрічеллі [40] і Б.Кавальєрі [41]. Згодом, цією проблемою займалися і інші математики – Ф.Сімсон, Т.Хайнен та ін.

Появу теорії просторового розміщення прийнято пов'язувати з представником німецької школи Й.Тюненом і його роботою 1826 року «Ізольована держава в її відношенні до сільського господарства і національної економіки» [42], в якій вперше були використані просторові

методи аналізу. В ній економіст пропонує математичну формулу для визначення оптимального розміщення сільськогосподарських виробництв.

Відповідно до моделі Й. Тюнена в економічних межах певної території витрати на виробництво сільськогосподарської продукції і ціни реалізації повинні бути однакові для будь-якої точки ринку, а транспортні витрати доставки продукції кінцевим споживачам – різні через нерівномірність заселення території. Відстань, що відокремлює зони розміщення тих чи інших видів сільськогосподарської діяльності від центру збуту, знаходиться з лінійної моделі «територіального економічного впливу» виробництва даного виду продукції:

$$f(r) = m_i q_i - r t m_i, \quad (1.1)$$

де q_i – прибутковість від i -ї сільськогосподарської культури; t – транспортний тариф на одиницю обсягу виробництва; r – відстань до центру споживання; m_i – обсяг виробництва.

Якщо прибутковість сільськогосподарських культур на одиницю продукції складають q_1 і q_2 , а обсяги їх продуктивності – m_1 і m_2 , тоді межа, що визначає економічну доцільність посіву двох культур, знаходиться з рівняння байдужості (рівності різниць між доходом і транспортними витратами):

$$m_1 q_1 - r t m_1 = m_2 q_2 - r t m_2$$

або

$$r = \frac{m_1 q_1 - m_2 q_2}{t(m_1 - m_2)} \quad (1.2)$$

На підставі цієї моделі Й.Тюнен знаходить оптимальну схему розміщення сільськогосподарського виробництва у вигляді системи концентричних кіл (поясів) різного діаметра навколо центрального міста, які є зонами різної спеціалізації сільського господарства. Ці кола назвали кільцями Тюнена (Thünen'schen Ringe). З точки зору сучасної постановки даної задачі рішення, отримане Й.Тюненом, не можна вважати коректним, тому що воно передбачає однорідність транспортних шляхів, що з'єднують

центр з периферією, чого на практиці ніколи не буває і враховує тільки один територіальний або просторовий фактор – відстань і пов'язані з ним транспортні витрати.

З позицій геоінформатики кільця Тюенена можна розглядати як ізолінії, що характеризують певне відношення між центром і периферійними ресурсами. Значно пізніше А. Вебер [43] ввів назву для таких ліній – ізодапани. В геоінформатиці подібна задача пов'язана з знаходженням буферних зон навколо точкового об'єкта і з знаходженням просторових ізоліній.

У 1882 році підхід Й. Тюенена набув розвитку в роботі іншого вченого В. Лаунхарда, який представив свою модель визначення оптимального розміщення, але вже для промислових підприємств, яка базується на розробленому автором методі локаційного (або вагового) трикутника [44].

Згодом німецький економіст Альфред Вебер розвинув уявлення попередників у своїй теорії промислового штандорта [44]. Вебер модифікував задачу Ферма для довільного числа точок. Крім того, А. Вебер включив в задачу вагові коефіцієнти точок. Задача була сформульована як задача теорії розміщення виробництва.

А. Вебер розширив список факторів оптимального розміщення підприємства, додавши до них, крім транспортних витрат, фактор робочої сили і всі інші умови, що впливають на розміщення підприємства, які він синтезував в поняття «агломераційного ефекту» (спільний їх вплив на вибір місця розміщення).

Задача Вебера [45,46] полягає у пошуку точки X такої, щоб сума зважених відстаней від неї до N відомих точок A_1, \dots, A_N досягала мінімуму (рис. 1.2) [47,48].

$$F(x) = \sum_{i=1}^N w_i L(X, A_i) \rightarrow \min. \quad (1.3)$$

де w_i – вагові коефіцієнти відомих точок, L – відстань між точками, задана в будь-якій метриці (наприклад, евклідовій).

Для множини об'єктів, що розміщуються, задача Вебера полягає в пошуку M додаткових місць розташування для об'єктів:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_M) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M w_j L(X, A_j) \rightarrow \min. \quad (1.4)$$

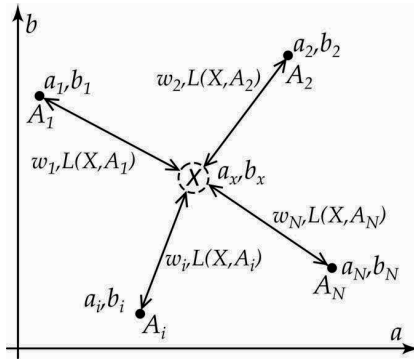


Рисунок 1.2 – Ілюстрація задачі Вебера

Одне з узагальнень задачі Вебера пов'язано з урахуванням бар'єрів і заборонених зон, в яких не можна розміщувати об'єкти. Такими зонами можуть бути як штучні перешкоди (будівлі, обладнання та ін.), так і природні перешкоди (гори, озера та ін.). У цьому випадку з'являється додаткова умова:

$$X_j \notin R_Z, \quad (1.5)$$

де R_Z – множина заборонених зон.

У разі задачі з бар'єрами відстань між двома точками – довжина найкоротшого шляху – є сумою відстаней за евклідовою метрикою декількох сегментів (рис.1.3).

Тут найкоротший шлях складається з відрізків, довжини яких дорівнюють d_1 і d_2 .

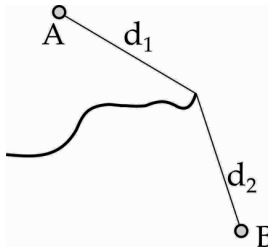


Рисунок 1.3 – Задача Вебера з бар’єрами

Подальше узагальнення задачі – регіональна задача, яка полягає в пошуку однієї або декількох точок, таких, що зважена відстань від них до множини точок «регіону вимоги», є обмеженою областю $\Omega \subset R^n$, мінімальна. В цьому випадку задача з одним об’єктом розміщення [49] (регіональна задача Вебера) полягає в пошуку такої точки X , що

$$F(X) = \sum_{i=1}^N w_i \int_{\Omega} L(X, A_i) d\mu(A_i) \rightarrow \min, \quad (1.6)$$

де $\mu(A_i)$ – математичне сподівання того, що точка A_i знаходиться в деякій точці допустимої області Ω .

У випадку безперервної (регіональної) множинної задачі Вебера з M шуканих точок (центрів) і N «регіонів вимоги»:

$$F(X_1, \dots, X_M) = \sum_{i=1}^N w_i \int_{\Omega_i} \min_{j, 1 \leq j \leq M} L(X_j, A) \rho_i(A) dA \rightarrow \min. \quad (1.7)$$

де

$$\rho_i(A) = \begin{cases} 1, & A \in \Omega_i \\ 0, & A \notin \Omega_i. \end{cases}$$

Задачі оптимального розміщення об’єктів можуть розв’язуватися методами математичного програмування. Для дискретних задач застосовуються методи вектора спаду [50], евристичні алгоритми, поліноміальні наближені схеми, метод гілок та меж, динамічне

програмування, метод випадкового пошуку з локальною оптимізацією [51]. Для неперервних задач використовують методи лінійного, нелінійного та стохастичного програмування [52–54].

В [55] запропонований наближений алгоритм рішення регіональної множинної задачі Вебера з бар'єрами і забороненими зонами з довільною метрикою, шляхом заміни континууму координат дискретними координатами з подальшим рішенням задачі комбінаторної оптимізації. В цьому випадку доводиться мати справу з задачами, які відносяться до класу NP-повних, що не дозволяє гарантовано вирішити їх за прийнятний час. В [56] задача розміщення об'єктів обслуговування зведена до відомої задачі про пакування рюкзака. З урахуванням обмежень, що додаються, показано, що отримані NP-складні задачі, можуть бути розв'язані за псевдополіноміальний час методами динамічного та мережевого програмування.

Оскільки NP-складні задачі важко розв'язувати точно, то, як правило, для їх вирішення застосовують апроксимаційні алгоритми з заданою точністю та часом обчислення. Дослідженню і побудові ефективних апроксимаційних алгоритмів розв'язання задачі оптимального розміщення об'єктів присвячені роботи [57–60].

В [37] на підставі результатів аналізу моделей та методів розміщення об'єктів показано, що навіть за умови наявності одного критерію оптимальності ті задачі, які з необхідним ступенем повноти описують реальну ситуацію, не можна розв'язати за прийнятний час. За наявності декількох критеріїв задачі взагалі не можна розв'язати за допомогою аналітичних методів. Тому автори для знаходження рішення близького до оптимального пропонують використовувати імітаційне моделювання [61–63]. Алгоритм враховує два критерії якості – мінімізацію витрати часу населення регіону на контакт з підприємством та максимізацію потужності підприємства. Екологічні критерії у моделі окремо не використовуються, їх відсутність пропонується компенсувати використанням прийому переведення в обмеження на гранично-допустимі значення.

Щодо задач оптимального розміщення об'єктів поводження з ТПВ, то наприклад, в [64] при моделюванні логістичних задач транспортування ТПВ та пошуку оптимального розміщення об'єктів ТПВ використовується алгоритм знаходження p -медіани графа G . Модель дозволяє враховувати структуру дорожньої мережі. Якщо за вагу вершин графа взяти обсяг

утворення відходів в цьому пункті, а за вагу дуг – фактичну відстань по дорожній мережі між інцидентними їй вершинами, то передавальне число буде показувати потенційний вантажообіг в системі в тому випадку, якщо в представленій підмножині вершин будуть розташовані об'єкти розміщення відходів. Таким чином, критерієм оптимізації буде вантажообіг, і задача оптимізації полягатиме в пошуку p -медіан на дорожньому графі, на яких досягається мінімум вантажообігу в системі. Врахування екологічних критеріїв здійснюється завданням обмежень на місія розташування об'єктів ТПВ. Незважаючи на простоту задача про p -медіани є NP-складною, що істотно впливає на швидкість її вирішення при збільшенні розмірності.

В [65] розглядаються питання маршрутизації руху дорожніх машин для збору та вивезення відходів. В якості математичного апарату для розробки маршруту смітєвоза використаний алгоритм вирішення задачі комівояжера, який має експонентну оцінку складності порядку $O(e^n)$. Відомі алгоритми вирішення таких задач є алгоритмами повного перебору всіх варіантів і не вважаються ефективними.

Історичний розвиток теорії економіко-математичного моделювання територіального розміщення об'єктів ринкового господарства розглядається в [66].

Окреме місце серед інших ідеальних моделей просторового розміщення займає теорія центральних місць В. Кристаллера (1933 р.). Автор виходив з умови, що населення розміщене рівномірно, і транспортні витрати пропорційні відстані, тому функція впливу або зона збуту товару буде мати форму кола, а місце виробництва цього товару розташується в центрі зони збуту, тобто є «центральним місцем». Як показано на рис.1.4а, весь досліджуваний район можна розділити на ряд зон круглої форми, але при цьому можуть виникати території, що не обслуговуються. Тому найбільш ефективними є райони збуту, форма яких утворюється перпендикулярами, проведеними через середини відрізків, що з'єднують центральні місця (рис.1.4б). У геоінформатиці побудовані таким чином зони впливу називаються полігонами Тиссена [67,68].

Розробці і опису прикладних методів економічного аналізу розміщення виробництва і розвитку ринку присвячені роботи У. Ізарда [69], П. Хаггет, Х. Боса, В. Леонтьєва, Д. Хаффа, А.Шефлен, Р.Д. Конверса та ін. [70].

Роботи Й. Тюнена, В. Лаунхардта, А. Вебера, А. Леша, А. Маршалла сприяли розвитку кластерного підходу в економіці і формуванню теорії промислових кластерів М. Портера [71,72].

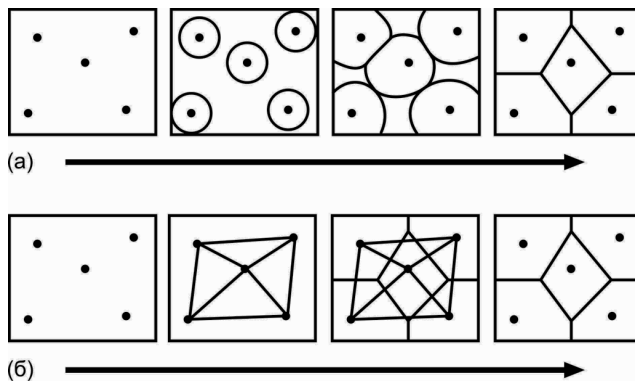


Рисунок 1.4 – Технологія формування зон впливу: а) поширення впливу до заповнення всієї території; б) побудова полігонів Тиссена

Подальший розвиток економічних моделей розміщення зв'язаний з посиленням значимості маркетингових досліджень в оцінці територій і появою нового наукового напрямку – геомаркетингу та геомаркетингового аналізу [30,73]. В прикладному аспекті геомаркетинг можна вважати інформаційною технологією, що сформувалася на основі інтеграції технологій класичного маркетингу і геоінформаційних технологій. Одним з головних інструментів геомаркетингу на етапі обробки інформації, аналізу та представлення даних є геоінформаційні системи [74].

Питанням геомаркетингового підходу присвячені роботи американських географів – У. Епплбома, Б. Епстейна, Ч. Харріса; канадських географів – К. Джонса, Дж. Сіммонса, класика економічної науки М. Портера; економістів американської наукової школи – Ф. Котлера, П. Кругмана, Г. Армстронга, П. Друккера; британської наукової школи – Д. Сандерса, В. Вонг, російських вчених – В.Я. Цветкова, В.А. Фурсова. До числа вчених української наукової школи можна віднести роботи В.М. Андерсона.

Таким чином, аналіз перелічених підходів до просторового розміщення об'єктів показує їх ефективність на обмеженому наборі факторів. Складність алгоритмів вирішення задачі розміщення істотно збільшується при збільшенні факторів, які впливають на рішення. Враховуючи той факт, що задача розміщення техногенно небезпечних та промислових об'єктів є багатофакторною, а деякі її екологічні та еколого-економічні фактори не підлягають математичному опису, виникає необхідність пошуку нових підходів до рішення задачі розміщення просторових об'єктів.

Одним з ефективних рішень проблеми є використання ГІС-технологій, які дозволяють представити географічний опис об'єктів на місцевості. Моделі геопросторового багатокритеріального аналізу дозволяють враховувати множину просторових факторів, кореляцію між еколого-економічними даними і географічними характеристиками території, а також просторове відношення з іншими об'єктами інфраструктури. Крім того, інструментарій ГІС дозволяє отримати візуальні моделі в картографічній або іншій формі та використовувати матеріали дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [75] для аналізу умов і моделювання розміщення просторових об'єктів.

Недосконалість окремих підходів, яка пов'язана з потребою враховувати суб'єктивні і нечіткі фактори для отримання адекватних рішень, сприяла використанню нечітких множин для вирішення задачі розміщення [76]. Проблема обумовлена перш за все тим, що просторові відношення для географічних об'єктів і фактори розміщення, які необхідно враховувати, не завжди можна представити кількісно, тому є неможливим використання у процесі моделювання складних формалізованих описів. Крім того, для моделювання реального явища доводиться використовувати інформацію, яка надається у формі уявлень і побажань експертів. Ця інформація має суб'єктивний характер, який залежить від досвіду конкретного експерта у вирішенні проблеми. Перелічені особливості зумовлюють доцільність використання «м'яких обчислень», тобто методів моделювання, що базуються на апараті нечіткої логіки, які здатні враховувати невизначеність умов властивих задачі для забезпечення прийняттого результату.

1.2 Роль ГІС у забезпеченні вирішення задачі розміщення просторових об'єктів

Існує більш десятка визначень поняття ГІС. Найбільш поширене визначення: «ГІС – це система апаратних засобів, програмного забезпечення і процедур, що сприяють управлінню, маніпулюванню, аналізу, моделюванню, поданню і відображенню геореференційних даних для вирішення комплексних проблем планування і управління ресурсами» [77].

Раціональне розміщення просторових об'єктів потребує виконання просторового аналізу, для забезпечення якого ідеально підходять ГІС з розвиненими функціональними можливостями введення, зберігання, моделювання і представлення географічної інформації. Останні розробки в області просторового аналізу, до яких можна віднести аналіз близькості, аналіз атрибутивних даних, багатокритеріальний аналіз тощо, істотно поліпшили можливості сучасних ГІС в аналізі придатності територій.

Розвитку і становленню ГІС сприяли дослідження багатьох зарубіжних, радянських, пострадянських і вітчизняних вчених, серед яких Берлянт О.М., Бугаєвський Л.М., Данджермонд Дж., ДеМерс М., Зацерковний В.І., Іщук О.О., Калкінз Х., Капралов Є.Г., Карпінський Ю.О., Кошкар'єв А.В., Лур'є І.К., Мере М.Д., Мітчел Е., Мокін В.Б., Розенберг І.Н., Світличний О.О., Тікунов В.С., Томпінсон З.Ф., Шипулін В.Д., Цветков В.Я. та багато інших.

Широкому впровадженню ГІС сприяє стрімкий розвиток наземної навігації, дистанційного зондування Землі, картографічних веб-сервісів, а також поява у відкритому доступі в мережі Інтернет великого обсягу безкоштовних супутникових знімків, просторових моделей, навігаційних даних, різного роду довідників, прив'язаних до карт [78–81]. Це дає можливість зібрати докупи безліч відомостей про територію і виконати найрізноманітніші види комплексного аналізу.

В наш час існує велика кількість ГІС. Найбільш відомі з них – ArcGIS, QGIS, MapInfo, Bentley, ГІС ПАНОРАМА. У даному дослідженні прикладний аспект теорії подано у вигляді створених ГІС-орієнтованих програмних засобів обробки та аналізу просторової інформації для ГІС ArcGIS 10.7.

ArcGIS – сімейство геоінформаційних програмних продуктів американської компанії ESRI [82]. Платформа ArcGIS 10.7 побудована на основі стандартів комп'ютерної галузі, включаючи об'єктну архітектуру COM, .NET, Java, XML, SOAP, що забезпечує підтримку загальноприйнятих стандартів, гнучкість пропонуваніх рішень, широкі можливості взаємодії. Фундаментальна архітектура ArcGIS забезпечує її використання у багатьох прикладних сферах і на різних рівнях організації роботи користувачів.

У ArcGIS for Desktop є чотири основні застосунки, які можна використовувати для картографування і візуалізації [82]:

1) ArcMap – основний застосунок геоінформаційної системи ArcGIS для картографування, редагування, аналізу даних і управління ними. Він використовується для роботи з двовимірними об'єктами.

2) ArcGlobe – застосунок для візуалізації геоданих в тривимірному вигляді, призначений для роботи з великими наборами даних, які повинні відображатися з різним рівнем деталізації. ArcGlobe є опціональною частиною додаткового модуля ArcGIS 3D Analyst.

3) ArcScene – додаток для тривимірної візуалізації сцен і ділянок з можливістю навігації. ArcScene є частиною додаткового модуля ArcGIS 3D Analyst.

4) ArcCatalog – каталог, який використовується для організації та управління різними типами географічної інформації: базами геоданих, файлами растрів, документами карт, глобусами, 3D-сценами, наборами інструментів геообробки, моделями, скриптами Python, ГІС-сервісами, метаданими тощо. Інформація представляється у вигляді дерева і дозволяє вибрати ГІС-елемент, переглянути його властивості та отримати доступ до інструментів.

ArcMap подає географічну інформацію у вигляді набору шарів карти (рис.1.5). Із важливих спеціалізованих задач, що дозволяє вирішувати ArcMap, варто відмітити можливість розробки інструментів геообробки для автоматизації аналізу геоданих та отримання результатів їх роботи у вигляді карти.

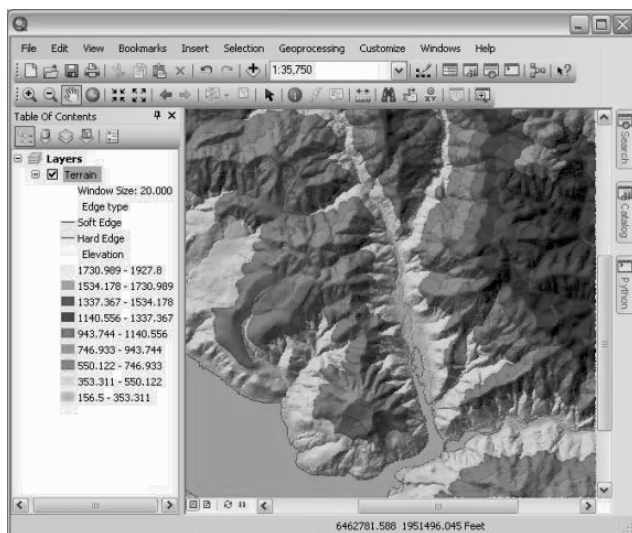


Рисунок 1.5 – Головне вікно програми ArcMap

Середовище ArcGIS містить багатий набір вбудованих засобів програмування. Починаючи з випуску ArcInfo 8.1, розробники ГІС використовують COM-технологію розробки ArcObjects SDK for .NET для таких модулів ArcGIS, як ArcMap, ArcCatalog і ArcScene. ArcObjects є бібліотекою COM-компонентів, написаних на мові програмування C++. Оскільки ArcGIS повністю побудована на ArcObjects, то можна використовувати COM, щоб повністю налаштувати і розширити платформу ArcGIS—meaning. Розширення моделі даних ArcObjects можна зробити практично на усіх COM і .NET сумісних мовах програмування (Visual Basic, C #, Visual Basic.NET, Java і Python).

Починаючи з версії 9.0 у ArcGIS з'явився Python [83], який зараз є основною мовою програмування для написання скриптів геообробки в ArcGIS і область його застосування продовжує розширюватися. Функціональність геообробки доступна при використанні бібліотеки ArcPy, яка забезпечує доступ до додаткових функцій, класів і модулів, що дозволяють швидко створювати як прості, так і складні робочі процеси [84].

1.3 Інтеграція методів та засобів багатокритеріального аналізу рішень в ГІС

У порівнянні з потужними можливостями аналізу даними, функції просторового аналізу в ГІС можуть бути досить елементарними. Дійсно, більшість ГІС зосереджені на аспектах картографії та керуванні картографічними даними. Це прямий наслідок потреб ринку до таких систем, які частіше використовуються для управління даними, а не для аналізу або планування. До кінця 20-го століття методи аналізу в загальних ГІС обмежувались булевими операціями над атрибутами просторових об'єктів (точками, лініями, полігонами), перетинанням ліній, операторами включення точки в полігон, накладенням шарів растрових або векторних форматів даних, створенням буферів, статистичним аналізом атрибутивних даних, інтерполяцією та мережевим аналізом. Ці функціональні можливості, хоч і потужні, але швидко досягають меж, коли вони використовуються в складних ситуаціях. Приклади таких обмежень:

- результати функції накладення швидко стають невіддільними, коли кількість критеріїв перевищує чотири або п'ять;

- у більшості операторів накладення не враховується той факт, що використовувані змінні можуть мати різне значення (тобто що вони можуть бути зважені по-різному);

- використання функції накладення включає в себе специфікацію ряду параметрів, таких як порогові значення, які часто визначаються довільно, що іноді може привести до втрати даних.

Останні декілька десятиліть ГІС використовують в поєднанні з іншими системами і методами, такими як системи підтримки прийняття рішень (СППР) і методи багатокритеріального аналізу рішень [3,14]. Об'єднання інструментів ГІС і БКАР дає синергетичний ефект і сприяє підвищенню ефективності та якості просторового аналізу при виборі оптимального місця розташування об'єктів. В [85] ГІС визначається «як система підтримки прийняття рішень, що включає інтеграцію просторово прив'язаних даних в середовище рішення проблем». БКАР надає багатий набір методів і процедур для структурування проблем прийняття рішень, а також для розробки, оцінки та визначення пріоритетів альтернативних рішень. На елементарному рівні поєднання ГІС-БКАР можна розглядати як

процес, який перетворює і об'єднує географічні дані і оціночні судження (переваги ОПР) для отримання інформації для прийняття рішень.

Проблеми інтеграції методів БКАР і ГІС досліджували вчені Карвер С. [86], Янковський П. [87], Малчевський Я. [88], Яцало Б.І., Грицюк С.В. [89] та ін. Роботи [90–94] безпосередньо присвячені застосуванню методів БКАР в ГІС-орієнтованих СППР з розміщення об'єктів поведження з ТПВ.

Багатокритеріальний аналіз рішень зводиться в більшості випадків до класу дискретних задач з кінцевою множиною явно заданих альтернатив. Клас таких задач в англійській літературі отримав назву MADM – Multi-Attributive Decision Making. Клас задач багатоцільового аналізу рішень (MODM – Multi-Objective Decision Making), або більш коротко – багатоцільової оптимізації, характеризується досить великою або нескінченною множиною неявно заданих альтернатив [95,96]. Для вирішення дискретних багатокритеріальних задач використовуються такі класичні методи, як MAVT, MAUT, ANP, PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS і ін. [97,98]. Багатоцільові завдання вирішуються з використанням різних оптимізаційних методів, включаючи широкий клас еволюційних/генетичних алгоритмів [99–101].

У процесі відбору місць розміщення доцільно застосовувати процедуру, що складається з двох етапів: макро та мікроаналізу (рис.1.6) [17, 102].

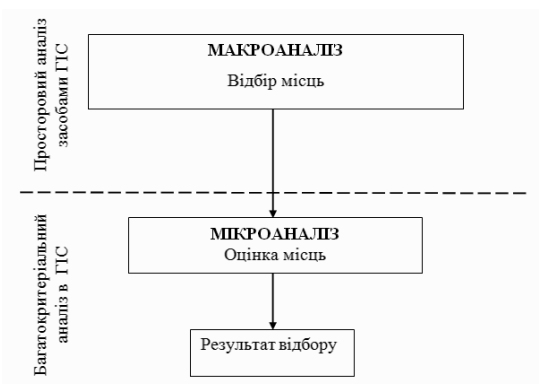


Рисунок 1.6 – Процес відбору оптимальних місць розміщення об'єктів

На етапі макроаналізу особа, що приймає рішення, обирає географічну зону, регіон, який може відповідати основним вимогам для будівництва та розвитку промисловості з мінімальними експлуатаційними витратами. На етапі мікроаналізу проводиться докладний аналіз попередньо обраних альтернатив з урахуванням критеріїв відбору із застосуванням методів БКАР, після чого кількість потенційних місць, як правило, істотно зменшується. В результаті ОПР залишається зробити вибір з невеликого набору визначених місць.

1.3.1 Методи геопросторового аналізу

На етапі макроаналізу генерація набору альтернатив, як правило, здійснюється за допомогою операцій геопросторового аналізу (табл.1.1), які включають: аналіз атрибутивних даних, аналіз поверхні, аналіз близькості та аналіз накладення або оверлейний аналіз.

Атрибутивний аналіз може бути виконаний за допомогою SQL-запитів до атрибутивних таблиць з використанням різних арифметичних і логічних операцій. Операції «буферизація» і «вибір за містом розташування» застосовують для пошуку місць, що знаходяться в зоні (на певній відстані від) спостережуваного об'єкта або поза неї. За допомогою побудови буфера можна визначити місця, які задовольняють державним вимогам до будівництва об'єктів, наприклад, побудувати полігональні об'єкти навколо автомобільних шляхів на відстані 200 м, або водойм із заданими параметрами відстані 3000 метрів.

1.3.2 Методи багатокритеріального аналізу рішень

Якщо на етапі макроаналізу основним інструментом дослідження є геопросторовий аналіз, то на етапі мікроаналізу для оцінки та ранжування обраних альтернатив слід підключати методи БКАР, засновані на оціночних судженнях ОПР, які в поєднанні з операціями накладення (оверлея) дозволяють визначити альтернативи, які одночасно задовольняють набір критеріїв [8, 9, 24].

Таблиця 1.1 – Опис операцій геопросторового аналізу

Тип аналізу	Операції	Опис
Аналіз атрибутивних даних	вибірка	вибір за допомогою SQL- запиту лише тих рядків атрибутивної таблиці певного шару даних, які відповідають заданим умовам
	обчислення	визначення нових атрибутивних характеристик на основі вже існуючих за певним виразом
	статистична обробка	розрахунок статистичних характеристик на основі атрибутивних даних як вибірки
Аналіз поверхні (Surface Analysis)	ухил	ухил поверхні розраховується як ступінь максимального зміни в z-значенні, яка визначається з кожної комірки
	експозиція	визначає напрямок ухилу максимальної швидкості зміни значень від кожної комірки до сусідніх з нею комірок. Може розглядатися як напрямок ухилу
	створення ізоліній	створює клас лінійних об'єктів ізоліній з растрової поверхні. Застосовується для пошуку областей однакових значень
Аналіз близькості (Proximity Analysis)	буфер	будує нові територіальні об'єкти навколо існуючих точкових, лінійних і просторових об'єктів таким чином, що їх межі знаходяться на визначеній відстані від вихідних об'єктів
	евклідова відстань	розраховує Евклідову відстань до найближчого об'єкта-джерела для кожної комірки растра
Оверлейний аналіз (Overlay Analysis)	операції накладення кількох шарів, у результаті якого утворюється або графічна композиція (графічний оверлей) вихідних шарів, або один похідний шар, топологічні і семантичні атрибути якого є похідними від значень атрибутів вихідних шарів	

Методи БКАР [103] представляють собою систематизовану процедуру аналізу множини альтернатив з використанням декількох критеріїв з метою подолання обмежень неструктурованого індивідуального або групового прийняття рішень [104].

Найбільш затребуваними є наступні категорії проблем, що вирішуються з використанням методів БКАР [104]:

- відбір альтернатив (screening) – процес відсіювання (відбракування) альтернатив з множини можливих/заданих, тобто формування звуженої/ меншої множини альтернатив, яка містить допустимі або кращі альтернативи;

- пошук найбільш кращої альтернативи з множини розглянутих (choice problem);

- ранжування (ranking) альтернатив (від найкращої до найменш кращої з урахуванням всіх оцінок і переваг);

- класифікація/сортування альтернатив за класами/категоріями (sorting methods); наприклад, неприйнятні, можливо прийнятні, безумовно прийнятні альтернативи і т.п.

Існує велика кількість методів БКАР, але теоретичні та прикладні дослідження в географічному контексті сфокусовані на відносно невеликій кількості методів, включаючи метод зваженої суми, методи ідеальної точки, метод аналізу ієрархій та методи сімейства Outranking. Далі розглянемо ці методи докладніше.

Метод зваженої суми (Weighted Sum), розроблений Л. Заде у 1963 р. [105], і є одним з перших, що був реалізований в географічному контексті за допомогою операцій оверлею під назвою метод зваженої лінійної комбінації (Weighted Linear Combination, WLC) [106]. Підставою для цього є його простота та відносно низька обчислювальна вартість.

Метод WS визначає процедуру агрегування загальної оцінки i -ої альтернативи, шляхом зв'язування з нею набору ваг критеріїв w_1, w_2, \dots, w_n :

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^n v(a_{ij})w_j, \quad (1.8)$$

де $P(A_i)$ – загальна пріоритетна оцінка i -ої альтернативи (один індекс i використовується для спрощення); $v(a_{ij})$ – цінність i -ої альтернативи за j -им критерієм; w_j – вага критерію j ; n – кількість критеріїв.

При застосуванні метода зваженої суми треба пам'ятати, що він має деякі недоліки [106,107], тому перед його використанням потрібно зробити кілька припущень:

- необхідність виконання попередньої процедури нормалізації оцінок альтернатив за критеріями;

- наявність компенсації між оцінками за різними критеріями: низьке значення за одним критерієм (наприклад, поганий вплив на навколишнє середовище) може бути компенсовано високим значенням за іншим (наприклад, високий дохід);

- адитивність атрибутів: зважена сума може застосовуватися тільки в тому випадку, якщо атрибути є адитивними. Це припущення означає, що атрибути повинні бути незалежними один від одного, що в багатьох випадках є нереалістичним припущенням.

Застосування моделі зваженої суми також призводить до деяких розбіжностей, які потрібно вирішити:

- втрата інформації внаслідок нормалізації;
- складність призначення ваги, особливо якщо кількість критеріїв велике і критерії дуже різні за своїм характером.

Метод аналізу ієрархії (МАІ), розроблений Т. Сааті [108], є одним з найпопулярніших методів прийняття рішень, заснований на трьох принципах: декомпозиція, попарні судження і синтез пріоритетів. Принцип декомпозиції вимагає, щоб рішення проблеми було розкладено в ієрархію, яка охоплює основні елементи проблеми. Принцип порівняльного судження вимагає оцінки парних порівнянь елементів в рамках даного рівня ієрархічної структури по відношенню до їх батьків на вищому рівні. Принцип синтезу приймає кожен із похідних пріоритетів шкали співвідношення на різних рівнях ієрархії та будує складений набір пріоритетів для елементів на найнижчому рівні ієрархії (тобто альтернатив). Таким чином, МАІ складається з трьох основних етапів: розробки ієрархії, привласнення вагових коефіцієнтів кожному елементу ієрархічної структури з використанням методу парного порівняння і побудови загального рейтингу пріоритетів [108,109]. Як правило, МАІ інтегрують в ГІС і використовують сумісно з оператором зважена сума.

Одним з найважливіших кроків методу МАІ є побудова матриці A , де кожен елемент A_{ij} ($i, j = 1, \dots, n$) представляє відносну важливість критерію i в порівнянні з критерієм j . Для того, щоб висловити цю відносну важливість, ОПР може скористатися вербальною шкалою, яка потім перетворюється на фундаментальну шкалу абсолютних чисел, набирає цілих значень від 1 до 9 [110]. Крім того, елементи цієї матриці повинні дотримуватися наступної властивості узгодженості: $A_{ij} = 1/A_{ji}, \forall i, j$.

При використанні 9-бальної шкали, матриця A набуває свої значення в наступному діапазоні $\{\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{9}, 1, 2, \dots, 9\}$.

В ідеальному випадку матриця є послідовною, тобто вона, природно, має таку властивість: $A_{ik} \times A_{kj}, \forall i, j, k$.

У цьому випадку матрицю попарних порівнянь A можна записати наступним чином:

$$A = \begin{bmatrix} w_1 / w_1 & w_1 / w_2 & \cdots & w_1 / w_n \\ w_2 / w_1 & w_2 / w_2 & \cdots & w_2 / w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n / w_1 & w_n / w_2 & \cdots & w_n / w_n \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

де w_1, w_2, \dots, w_n є вагами критеріїв. Щоб знайти вектор $w(w_1, w_2, \dots, w_n)$, можна розв'язати наступне рівняння:

$$A_w = \lambda_{max} w, \quad (1.10)$$

де λ_{max} – найбільше власне значення матриці A .

При використанні парних порівнянь може виникати небажаний ефект транзитивної неузгодженості в оцінках переваг одних об'єктів над іншими. Для контролю узгодженості експертних оцінок використовують дві пов'язані характеристики – індекс узгодженості (Consistency Index, C.I.) і відношення узгодженості (Consistency Ratio, C.R.) [109]:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (1.11)$$

Т.Саати також встановив набір контрольних значень R.I., середніх відношень узгодженості, які залежать від кількості альтернатив [109]. Коли C.I. менша або рівна 10% від R.I., рівень узгодженості вважається прийнятним.

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}, \quad (1.12)$$

де R.I. – середнє відношення узгодженості, яке залежить від розміру вибірки (табл.1.2).

Розумний рівень узгодженості в парних порівняннях передбачається на рівні C.R. <0.10, якщо C.R. ≥0.10, це показує суперечливі судження.

Таблиця 1.2 – Значення випадкового індексу (R.I.) 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

Процес побудови матриці оцінки альтернатив такий самий, як і розглянутий вище. Різниця полягає лише в тому, що замість порівняння критеріїв на підставі їх важливості, ОПП буде запропоновано порівняти альтернативи на основі їхніх уподобань.

Методи ідеальної точки. Один з методів, який досить широко використовується для багатокритеріального аналізу (ранжування) альтернатив є метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions), який заснований на концепції, що обрана альтернатива повинна мати найкоротшу геометричну відстань від позитивного ідеального рішення (PIS) і найдовшу геометричну відстань від негативного ідеального рішення (NIS). TOPSIS вперше був запропонований Хвангом і Юном [103]. Це метод компенсаторної агрегації, який порівнює набір альтернатив шляхом визначення ваг для кожного критерію і розрахунку геометричної відстані між кожною альтернативою і ідеальною альтернативою. Компроміс при виборі оптимальної альтернативи заснований на тому, що обране рішення повинно бути одночасно максимально близьким до ідеального та найбільш віддалене від найгіршого рішення [111].

Класичний метод TOPSIS складається з 6 етапів:

1) Оцінки n альтернатив за m критеріями збираються в $n \times m$ матрицю рішень $X=(x_{ai})$, де x_{ai} – оцінка альтернативи a за критерієм i .

2) Матриця рішень нормалізується, це необхідно для порівняння критеріїв, наданих в різних одиницях. Отримаємо матрицю $R=(r_{ai})$, де:

$$r_{ai} = \frac{x_{ai}}{\sqrt{\sum_{a=1}^n x_{ai}^2}}, \quad (1.13)$$

де $a = 1, \dots, m$ і $i = 1, \dots, n$.

3) Вагова нормалізація матриці рішень будується шляхом множення нормованої матриці рішень r_{ai} на ваги критеріїв w_i .

$$v_{ai} = w_i \cdot r_{ai} \quad (1.14)$$

1. Ідеальна та анти-ідеальна альтернатива будується шляхом збору найкращих та найгірших показників за кожним критерієм в матриці нормалізованих рішень.

Ідеальна альтернатива:

$$A^+ = v_1^+, \dots, v_m^+, \quad (1.15)$$

де $v_i^+ = \max_a(v_{ai})$, якщо i треба максимізувати, $\min_a(v_{ai})$, якщо i слід мінімізувати.

Анти-ідеальна альтернатива:

$$A^- = v_1^-, \dots, v_m^-, \quad (1.16)$$

де $v_i^- = \min_a(v_{ai})$, якщо i треба максимізувати, $\max_a(v_{ai})$, якщо i слід мінімізувати.

5) Обчислюється відстань до кожної альтернативи:

Ідеальна альтернатива:

$$d_a^+ = \sqrt{\sum_i (v_i^+ - v_{ai})^2}, \quad (1.17)$$

де $a = 1, \dots, m$.

Анти-ідеальна альтернатива:

$$d_a^- = \sqrt{\sum_i (v_i^- - v_{ai})^2}, \quad (1.18)$$

де $a = 1, \dots, m$.

б) Обчислюється коефіцієнт відносної близькості кожної альтернативи:

$$C_a = \frac{d_a^-}{d_a^+ + d_a^-}. \quad (1.19)$$

Коефіцієнт близькості знаходиться між 0 і 1, де 1 є кращою альтернативою. Якщо альтернатива ближче до ідеалу, ніж до анти-ідеалу, то C_a наближається до 1, якщо альтернатива ближче до анти-ідеалу, то C_a наближається до 0.

У 1998 році Оприковичем [112,113] був розроблений метод VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), що є аналог методу TOPSIS. Відмінність між TOPSIS і VIKOR полягає у підходах до нормалізації значень критеріїв та розрахунках відстаней до ідеальних точок. TOPSIS для кожної альтернативи розраховує показник, що характеризує ступінь її віддаленості від найгіршої точки, а VIKOR – близькість до найкращої. Що стосується нормалізації, TOPSIS використовує векторне нормування, тоді як VIKOR – лінійне [113].

Methodu класу Outranking. Сімейство методів ELECTRE, PROMETHEE відносяться до методів класу ORT (теорія відношення переваги, Outranking Relation Theory, або outranking methods). Методи ґрунтуються на теорії французького професора Бернарда Роя, який є автором сімейства методів ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) [114], і їх прийнято відносити до європейської наукової школи. На сьогоднішній день існують сім модифікацій методу ELECTRE. На

практиці найбільш часто застосовують метод ELECTRE III як найбільш досконалий.

Методи передбачають проведення попарного порівняння альтернатив на основі функції переваги, що дозволяє вирішити проблему компенсації, яка є в методі TOPSIS.

Метод PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluation) [115] дозволяє оцінити і вибрати альтернативу, ґрунтуючись на критеріях, що відображають плюси і мінуси альтернатив, а також дозволяє ранжувати дані альтернативи за привабливістю для ОПР. Методи сімейства PROMETHEE були розроблені в різні роки Дж. П. Бренсом та Б. Маршалем [115,116].

PROMETHEE не вимагає строгих суджень про дійсну структуру переваг ОПР. При оцінці альтернатив ключове завдання полягає в отриманні інформації про те, чи є деяка альтернатива як мінімум настільки ж приваблива, як інша. На підставі так званих відносин переваги, які визначаються на першому кроці, здійснюється ранжування альтернатив.

Від ОПР потрібно задати ваги критеріїв і вибрати функцію переваг. PROMETHEE не надає способу визначення цих ваг, але припускає, що ОПР здатний поставити ваги правильно, як мінімум коли кількість критеріїв не надто велика. Визначення вагових коефіцієнтів завжди суб'єктивно. Тому аналіз чутливості, що відображає те, наскільки обрані ваги впливають на результат, є важливою частиною процесу пошуку рішень.

В рамках методу PROMETHEE розроблені різні модифікації, серед яких:

- PROMETHEE I для часткової оцінки альтернатив;
- PROMETHEE II для повноцінного ранжування;
- GAIA для візуалізації рішень.

Розглянемо основні етапи:

1) Завдання функції переваг. Стартовою точкою є формування матриці оцінок, яка відображає привабливість альтернатив за кожним з критеріїв. На підставі інформації, що міститься в матриці оцінок, альтернативи порівнюються попарно щодо кожного з критеріїв. Ідея PROMETHEE полягає в тому, щоб уникнути використання оцінок $f_k(a)$ кожної альтернативи, а лише порівнювати їх попарно. Метод може бути застосований до будь-якого дискретного набору альтернатив

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ і починається шляхом обчислення різниць між кожною парою альтернатив і для кожного критерію:

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, q\}, \quad \forall a_i, a_j \in A: \quad d_k(a_i, a_j) = f_k(a_i) - f_k(a_j) \quad (1.20)$$

Результати виражаються функціями переваги, які розраховуються для кожної пари варіантів і можуть варіюватися від 0 до 1. У той час як 0 показує відсутність відмінності між варіантами, 1 означає велику різницю.

$$P_k : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1] : d_k(a_i, a_j) \mapsto P_k(d_k(a_i, a_j)) \quad (1.21)$$

де P_k – незростаюча функція, яка дорівнює нулю для від’ємних значень.

Приклад такої функції наведений на рис. 1.7. У цьому прикладі функція переваги потребує різних параметрів, таких як поріг індиферентності q_i та поріг переваги p_i . Якщо різниця $d_k(a_i, a_j)$ між оцінками альтернатив a_i та a_j за критерієм k вище, ніж p_i , альтернатива a_i є переважнішою за a_j . Якщо $d_k(a_i, a_j) < q_i$, то альтернативи a_i та a_j є індиферентними. Кілька типових форм функцій переваги запропоновано у [117], таких як лінійна, багаторівнева або гауссова функція переваги.

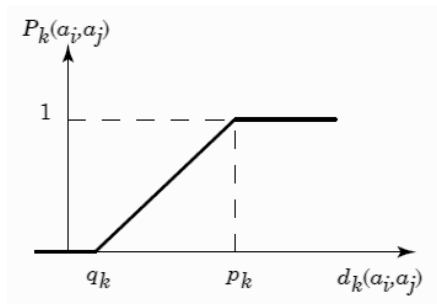


Рисунок 1.7 – V-подібна функція переваги

2) Оцінка ступеня переваги альтернатив. Матриця загальної цінності складається на основі значень, отриманих шляхом перемноження значень цінності альтернатив за кожним критерієм на вагу відповідного критерію.

У цій матриці сума всіх значень в рядку відображає ступінь домінування (привабливості) альтернативи.

$$P(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^q w_k \cdot P_k(d_k(a_i, a_j)) \quad (1.22)$$

Сума всіх значень в стовпці показує те, наскільки альтернатива пригнічується іншими.

Нарешті, метод агрегує ці ступеня переваг для обчислення кожної альтернативи оцінки за критерієм $\phi_k(a_i)$ (1.23) або глобальної оцінки $\phi(a_i)$ (1.24), що веде для повноцінного ранжування PROMETHEE II.

$$\phi_k(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_j \in A} [P_k(a_i, a_j) - P_k(a_j, a_i)] \quad (1.23)$$

$$\phi(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_j \in A} [P(a_i, a_j) - P(a_j, a_i)] = \sum_{k=1}^q \phi_k(a_i) \cdot w_k \quad (1.24)$$

Найвище значення $\phi(a_i)$ – це кращий рейтинг альтернативи.

Також можна визначити $\phi^+(a_i)$ та $\phi^-(a_i)$:

$$\phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_j \in A} [P(a_i, a_j)] \quad (1.25)$$

$$\phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_j \in A} [P(a_j, a_i)] \quad (1.26)$$

Потім використовуючи перетин рейтингу, отриманого цими двома способами, можна встановити частковий рейтинг PROMETHEE I.

Перевага методів ELECTRE та PROMETHEE складається в спробі усунути проблему компенсації, яка є в інших методах ранжування альтернатив. Однак, хоча парні порівняння вирішують цю проблему, але вони мають більш високу обчислювальну вартість. Це робить неможливим

застосування методів для великої кількості альтернатив. У просторових завданнях це означає, що використовуючи методи переваг, можна вирішувати лише дискретні проблеми з обмеженою кількістю альтернатив. Поширені проблеми, подібні до тих, де треба оцінити кожний піксель на карті, треба покладати на інші методи, наприклад, метод аналізу ієрархій, або використовувати наближені підходи, такі, як запропоновані у [118].

1.3.3 Класифікації просторових проблем прийняття рішень

В роботах [95, 3] запропоновані окремі класифікації просторових проблем прийняття рішень для геоінформаційної та БКАР складових. Розглядаючи геоінформаційну складову, проблему можна поділити на три основні групи:

1) *Растрова або векторна модель даних*. Методи, які застосовуються в аналізі, можуть відрізнятися в залежності від типів даних, що використовуються для представлення географічних об'єктів. Моделі даних, що базуються на растрах, вимагають використання дискретних методів, тоді як моделі на основі векторних даних використовують безперервні методи.

2) *Явні або неявні просторові критерії*. Природа критеріїв іноді може бути ідентифікована як явно просторова, коли вони є просторовими характеристиками альтернатив, таких як форма, розмір, орієнтація, компактність, сусідство. З іншого боку, можна розглядати деякі критерії як неявно просторові, коли вони включають просторові атрибути, такі як відстань, доступність, ухил, близькість, висота для розрахунку оцінок альтернатив.

3) *Явні або неявні просторові альтернативи*. Просторові альтернативи можуть визначатися явно або неявно. Явні просторові альтернативи виникають у вирішенні проблем, таких як вибір місця розташування [119], місцеположення, придатність землекористування, зонування, у цих проблемах альтернативи є просторовими об'єктами або їх комбінаціями. Неявні просторові альтернативи відносяться до проблем, де реалізовані рішення можуть мати ряд позитивних або негативних наслідків у певних місцях. До цього виду проблеми можна віднести, наприклад, низку заходів для зменшення ризику ерозії. Реалізоване рішення дійсно

може мати позитивний вплив на місцевому рівні, але має інші наслідки в інших частинах вододілу.

Для БКАР складової просторової проблеми прийняття рішень в [95] запропонована наступна класифікація:

1) *Багатоатрибутивний та багатоцільовий аналіз рішення.* У багатьох просторових проблемах прийняття рішень набір альтернатив заздалегідь є визначеним та обмеженим. Ці методи можна назвати дискретними методами. З іншого боку, багатоцільові проблеми, як правило, неперервні, тому що зазвичай визначаються через використання обмежень. В [95] методи БКАР поділяються на відповідні типи правил прийняття рішень, які вони використовують.

Таким чином, багатоатрибутивні підходи поділяються на наступні категорії:

- зважена сума (Weighted sum) / логічне накладення (Boolean overlay);
- ідеальна/контрольна точка (TOPSIS, MOLA);
- метод аналізу ієрархій (АНР);
- методи переваги за рангом (ELECTRE, PROMETHEE);
- інші.

Методи багатоцільової оптимізації розділені на наступні категорії:

- багатоцільові алгоритми програмування (цілочисельне лінійне програмування);
- евристичний пошук/еволюційні/генетичні алгоритми;
- цільове програмування/алгоритми контрольних точок (reference point),
- інше.

2) *Індивідуальне та групове прийняття рішень.* У вирішенні проблеми можуть приймати участь одна особа, або кілька осіб або груп інтересів, представлених різними структурами цільових переваг. В цьому випадку рішення проблеми називається груповим прийняттям рішень і буде покладатися на підходи прийняття спільних рішень.

3) *Рішення в умовах визначеності та невизначеності.* Такий розподіл залежить від обсягу інформації, яка доступна для ОПП. Коли є досконалі, впевнені знання про проблему, то підхід називається детерміністичним. Коли деякі аспекти проблеми не пізнаються або дуже

важко передбачити, то це рішення в умовах невизначеності. Існує два типи підходів, які можуть бути використані на основі типів невизначеності:

- імовірнісний (або стохастичний), коли інформація обмежена;
- нечіткого прийняття рішень, коли інформація нечітка.

Багатокритеріальний аналіз рішень, заснований на суб'єктивних оцінках, часто виконується в умовах неточності і невизначеності вихідної інформації. Можна виділити два типи невизначеності, які найчастіше є присутніми в ситуації прийняття рішення: невизначеність ступенів відносної важливості (ваг) критеріїв та невизначеність допустимої для ОПП форми компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями для можливості побудови узагальненого показника оцінки альтернатив.

В [120] запропоновано сценарій процесу прийняття рішень, який ґрунтується на розглянутих категоріях (рис.1.8).

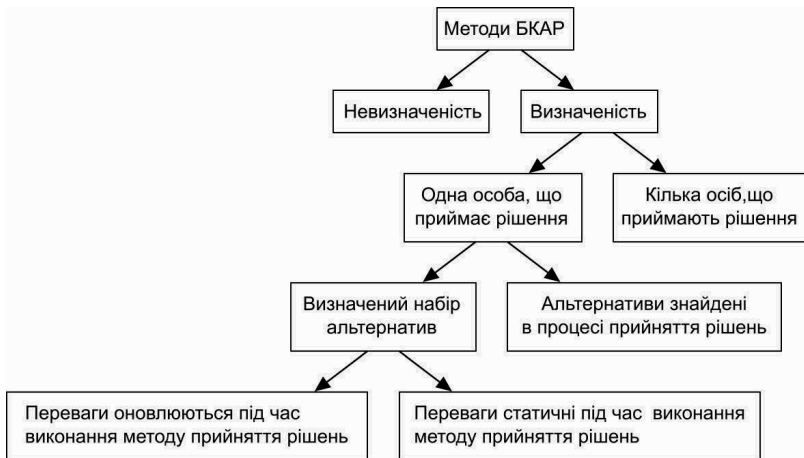


Рисунок 1.8 – Блок-схема сценаріїв прийняття рішень [120]

1.3.4 Типи інтеграції програмних засобів БКАР в ГІС

Системи підтримки прийняття рішень, які засновані на спільному використанні ГІС та методи БКАР можуть мати декілька рівнів інтеграції, починаючи від слабких зв'язків до повної інтеграції.

Слабкий зв'язок – цей тип інтеграції полягає у використанні певних програм або інструментів для різних етапів аналізу. Загальний процес прийняття рішень може складатися з наступних кроків:

- визначення альтернатив за допомогою функцій керування даними ГІС (наприклад, булевих операцій або операцій накладення);

- оцінювання альтернатив, шляхом введення їх характеристик в програму БКАР;

- отримання результатів та створення карти для їх відображення за допомогою ГІС.

Пряма перевага цієї процедури – це низька вартість її розробки. Однак розділення між окремими кроками ускладнює повне розуміння просторового аспекту проблеми. Так просторові взаємозв'язки між альтернативами не розглядаються явно під час етапу оцінювання БКАР. Крім того, оскільки передача даних здійснюється за допомогою людських втручань, ризик помилок є високим. Практичним прикладом слабого зв'язку є будь-яке дослідження, яке виконано за допомогою двох програмних пакетів для окремих частин процесу: ГІС для збору даних про проблему та програми БКАР для етапу оцінки.

Тісний зв'язок – це тип інтеграції коли засоби одного процесу (як правило, БКАР) реалізовані як модуль або скрипт в іншу систему (наприклад, ГІС), яка використовується в якості бази. Основними проблемами подібних систем є відсутність гнучкості та інтерактивності. Першою розробленою системою з тісним зв'язком методів БКАР в рамках ГІС є система IDRISI. У цій ГІС методи БКАР були реалізовані як модулі.

Повна інтеграція – це повністю інтегрована система, що має багатокритеріальну функціональність і функції просторового аналізу, та дозволяє користувачу отримувати доступ до них в будь-який момент часу протягом аналізу. Користувач повинен також мати можливість взаємодіяти з різними процесами, змінюючи параметри методів і візуалізуючи результати або різні просторові елементи проблеми безпосередньо на карті. Опис систем з різними типами інтеграцій наведений у табл. 1.3.

З табл. 1.3 видно, що крайні випадки інтеграції мають свої переваги та недоліки. Для створення інтегрованої системи, що спрощує аналітику роботу із засобами БКАР, але має певну гнучкість їх застосування, пропонується використовувати інтеграцію з тісним зв'язком, тобто виконати розробку окремих інструмент (скриптів геообробки), що

реалізують методи БКАР, з подальшою їх інтеграцією в ГІС загального призначення ArcGIS 10.7.

Таблиця 1.3 – Опис систем з різними типами інтеграцій моделі ГІС-БКАР

Назва	Слабкий зв'язок	Повна інтеграція
Опис	використовує окремі інструменти або програми для різних способів аналізу шляхом експортування / імпортування даних	використовує одну систему, яка пропонує кілька функцій для вирішення просторових проблем
Переваги	залишає більшу свободу для користувача (тобто аналітика) і покладається на його досвід	– покращує передачу даних; – спрощує застосування процесів; – дозволяє взаємодіяти під час аналізу
Недоліки	– технічно найслабша інтеграція; – схильна до помилок	змушує користувача працювати з попередньо визначеними методами або інструментами

1.4 Огляд існуючих інтегрованих ГІС з функціями БКАР

Перша комерційна ГІС, яка інтегрувала процедури для методології SMART та визначення ваг за допомогою MAI була ГІС IDRISI (рис. 1.9). Поточна версія програмного забезпечення включає в себе повний модуль БКАР з підтримкою процедури Ordered Weighted Average (OWA), евристичного MOLA та MAI.

Програмний пакет ESRI ArcGIS також має інструменти та надбудови БКАР. В розділ ArcScripts свого веб-сайту компанія дозволила розробникам запропонувати власні функції та додаткові пакети для існуючих систем ESRI. На жаль ArcScript більше не відкривається для нових пакетів, але ESRI додав кілька інших послуг для заміни. Ця поведінка характерна для більшості програмних платформ, які

передбачають можливість розширення функцій шляхом залучення спільноти розробників.

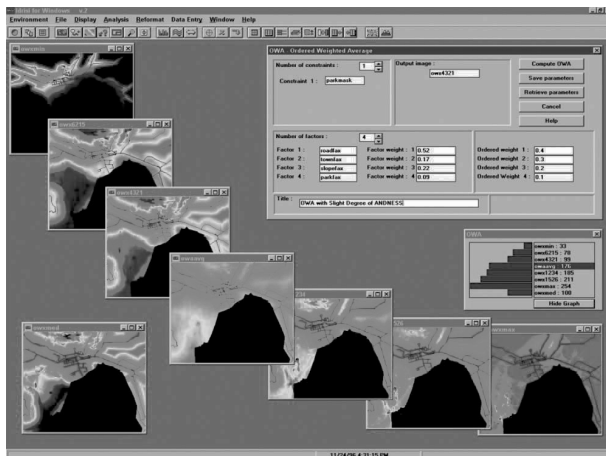


Рисунок 1.9– Інтерфейс IDRISI GIS

Програма DECERNS SDSS, що розроблена в Обнінському університеті (Росія), представляє собою інтеграцію БКАР та ГІС в єдину веб-архітектуру [121]. Оскільки обидва інструмента мають одну базу даних, ця система дозволяє користувачу швидко перейти на будь-який інструмент у будь-який момент аналізу. Система реалізує велику кількість методів БКАР (MAVT, MAUT, ANP, TOPSIS, PROMETHEE, SMAA, FlowSort) та допоміжних засобів. Однак, хоча обидва інструменти були розроблені разом, вони зберігаються окремо як дві незалежні підсистеми, здатні взаємодіяти. Таким чином, ця система технічно є повною інтеграцією, але веде себе як система з тісним зв'язком. Дійсно, з точки зору користувача, ці два інструменти здаються роздільними, тому що мають різні інтерфейси. Тим не менш, заплановані деякі поліпшення, що означає, що DECERNS може стати однією з перших систем, що забезпечить користувачам повну інтеграцію. На рис. (1.10 і 1.11) показані вікна підсистеми підтримки прийняття рішень (ППР) та підсистеми ГІС відповідно.

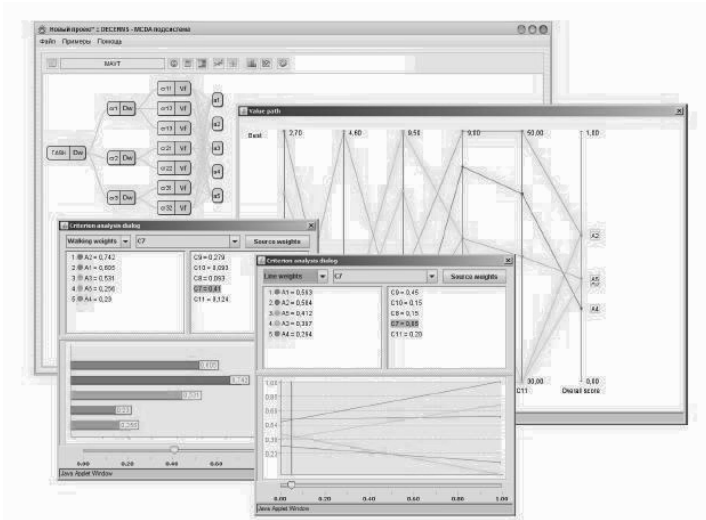


Рисунок 1.10 – Підсистема ППР системи DECERNS SDSS [121]

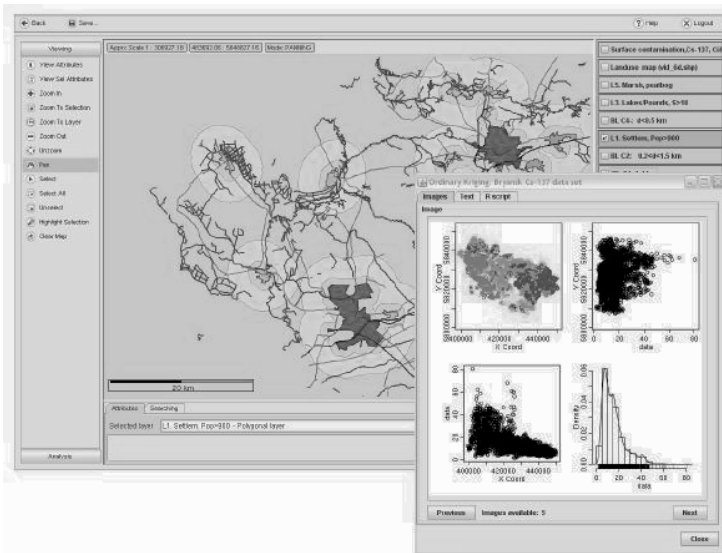


Рисунок 1.11 – Підсистема ГІС системи DECERNS SDSS [121]

Розглянуті системи були прикладами інтегрованих систем, але є й інші варіанти вирішення проблеми, пов'язаної з інтеграцією БКАР і ГІС. Так більшість аналітиків для проблем, які не вимагають складних аналітичних функцій, використовують об'єднання окремих програмних продуктів для різних етапів аналізу. Аналітичні програми, такі як R, Mathworks Matlab та Microsoft Excel використовуються в просторовому аналізі деяких основних ГІС. Тому більшість із них можуть експортувати свої дані атрибутів в найбільш популярні формати, такі як Excel або CSV.

Окрім вже інтегрованих рішень, існує декілька інструментів, бібліотек та програмних засобів, які можуть бути використані для розробки робочого рішення для певного призначення. Системи з відкритим вихідним кодом, такі як GRASS GIS, дозволяють користувачам розробляти модулі або плагіни, щоб покращити функціональність.

Деякі комерційні ГІС, такі як ArcGIS ESRI або Microsoft MapPoint, також доступні як інтерфейси API. Таким чином, можна додавати можливості візуалізації карти або управління просторовими даними або навіть доступ до деяких функцій просторового аналізу. Нарешті ці API можуть також бути незалежними від будь-якого повного програмного забезпечення ГІС. GeoTools та GeotoolKit – це приклади бібліотек, які можна використовувати для додавання географічних функцій до існуючих проектів, що розвиваються.

РОЗДІЛ 2

НЕЧІТКІ МОДЕЛІ ТА МЕТОД ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ З РОЗМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ

В розділі 1 було запропоновано та обґрунтовано сумісне застосування методів геоінформаційного аналізу та методів багатокритеріального аналізу рішень для відбору та ранжування територій за ступенем придатності для розміщення об'єктів, зокрема техногенно небезпечних та промислових об'єктів. Синергія цих підходів дозволить отримати більш гнучкий інструмент для підтримки прийняття рішень. Геоінформаційні технології та ГІС, в яких вони реалізовані, дозволять здійснити збір, збереження, обробку, аналіз та візуалізацію різномірної геопросторової інформації для прийняття рішень. Методи БКАР – врахувати переваги ОПР та різні стратегії прийняття рішень, тобто додати в ГІС відсутні функціональні можливості, які не можна реалізувати, виконуючи пошук місць розміщення просторових об'єктів спираючись лише на операції накладення (оверлею). Інтеграція методів БКАР в ГІС та розробка відповідної інформаційної технології «геопросторового» багатокритеріального аналізу рішень призведе до появи емерджентних властивостей системи, дозволить автоматизувати та зробити процес відбору і ранжування територій більш гнучким, оснований на оціночних судженнях та перевагах ОПР відносно критеріїв та/або альтернатив рішень, врахувати компроміси між цілями, інтерпретувати і зробити більш зрозумілими результати аналізу для ОПР.

Передбачається, що розробка інформаційної технології геопросторового БКАР дозволить:

- автоматизувати процес геопросторового БКАР, що підвищить його ефективність за рахунок зменшення помилок та скорочення часу виконання аналізу;
- врахувати складні взаємозв'язки, які не можуть бути представлені картографічно;
- врахувати стратегії прийняття рішень, тобто форми компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями;

– візуалізувати результати геопросторового БКАР для різних стратегій прийняття рішень для їх систематизації та формування рекомендацій ОПР.

2.1 Формалізація процесу геопросторового багатокритеріального аналізу рішень

Багатокритеріальний аналіз рішень може бути представлений в наступному формалізованому записі [23,102,122]:

$$\langle A, C, F, P; D \rangle, \quad (2.1)$$

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

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – набір критеріїв, за якими оцінюються альтернативи;

F – процедура критеріального оцінювання;

P – система переваг ОПР, містить інформацію про оцінки альтернатив за кожним критерієм;

D – вирішальне правило, задає процедуру виконання потрібної дії над множиною альтернатив (відбір, ранжування, сортування альтернатив).

В географічному контексті процес БКАР включає набір географічно визначених альтернатив (наприклад, земельні ділянки) і набір критеріїв оцінки, представлених у вигляді шарів карти. Аналіз полягає в комбінуванні атрибутів критеріїв відповідно до переваг ОПР, використовуючи правило прийняття рішення (правило комбінування).

Передбачається, що шари критеріїв представляються в растровій моделі даних, яка має вигляд двовимірної дискретної прямокутної сітки $x \times y$. Кожна комірка растру є альтернативою, яка описується своїми просторовими даними (географічними координатами) та атрибутивними даними (значеннями критеріїв). Запишемо множину альтернатив A , що оцінюються за критеріями C_j :

$$A = \{a_{ij} \mid i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}, \quad (2.2)$$

де a_{ij} – значення атрибуту альтернативи, тобто значення атрибуту за j -им критерієм і за i -ою альтернативою; n – кількість критеріїв; $m = m_x \cdot m_y$ – кількість альтернатив (комірок растру).

Переваги ОНР щодо оцінки критеріїв визначаються через призначення ваг критеріїв w_j , де $j = 1, 2, \dots, n$. Будемо вважати, що переваги ОНР є просторово однорідними, тобто кожному критерію C_k призначена одна вага w_k . Таким чином, матриця прийняття рішень буде мати вигляд, наведений в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Матриця прийняття рішень

Альтернативи	Просторові координати		Критерії/атрибути C_j			
	X_i	Y_i	C_1	C_2	...	C_n
A_1	x_1	y_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
A_2	x_2	y_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
A_3	x_3	y_3	a_{31}	a_{32}	...	a_{3n}
...
A_m	x_m	y_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}
Вага, w_j			w_1	w_2	...	w_n

З урахуванням особливостей завдання пошуку місць розміщення об'єктів, пропонується діаграма процесу геопросторового багатокритеріального аналізу рішень, яка наведена на рис. 2.1, що складається з наступних етапів [24,25,123]:

1) Макроаналіз – етап попереднього дослідження чи збору інформації. На цьому етапі відбувається збір даних про об'єкти ТПВ, формуються множини критеріїв та альтернатив з урахуванням обмежень, що накладаються на рішення:

- структурування проблеми – цей крок визначає цілі, вибір конкретного рішення проблеми (відбір, ранжування, пошук кращих альтернатив, класифікація/сортування альтернатив за класами);

- збір даних – передбачає підготовку та збереження геоданих, що характеризують чи описують проблему розміщення об'єктів і повинні бути враховані;

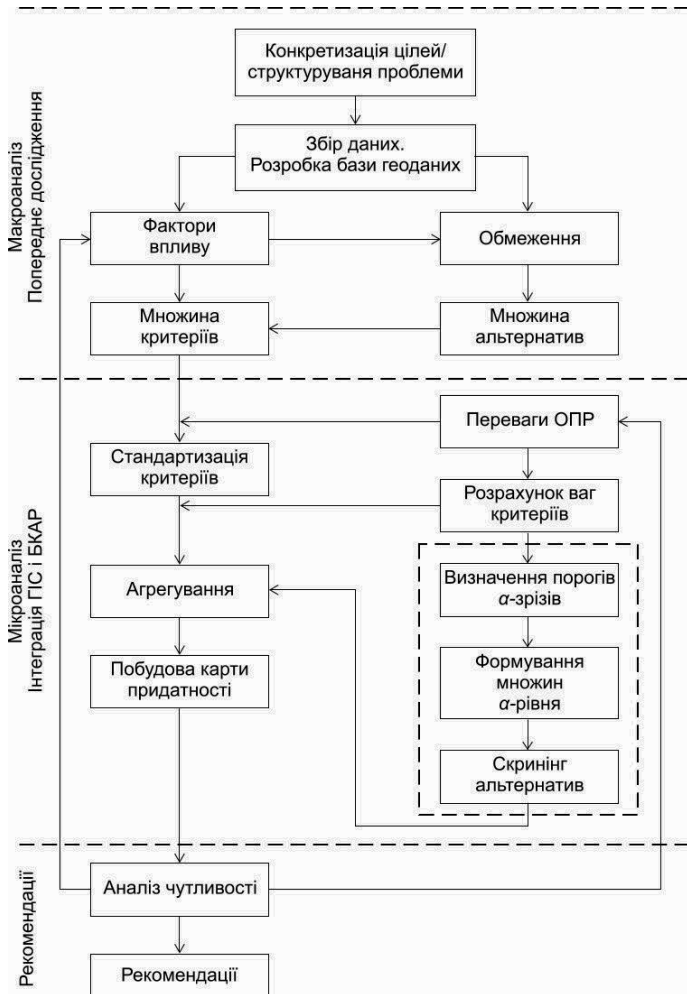


Рисунок 2.1 – Діаграма процесу геопросторового багатокритеріального аналізу рішень

– фактори впливу – визначення факторів, що впливають на рішення проблеми розміщення об’єктів;

– обмеження – на альтернативи рішень можуть бути накладені обмеження; альтернативи, що за цими обмеженнями є неприпустимими, вилучаються і не розглядаються в подальшому аналізі;

– критерії – формуються на основі аналізу факторів впливу та надаються у вигляді просторових шарів критеріїв в ГІС;

– альтернативи – набір можливих рішень, що отримані після врахування обмежень.

2) Мікроаналіз – етап, що передбачає інтеграцію ГІС-технологій і методів БКАР. Після збору всіх необхідних даних, до вирішення проблеми підключаються методи БКАР:

– стандартизація критеріїв – перетворення атрибутів критеріїв в порівнянні одиниці, наприклад, до діапазону $[0,1]$ шляхом їх фазифікації;

– переваги ОНР – на цьому етапі можуть бути враховані оціночні судження та переваги ОНР;

– розрахунок ваг критеріїв – для визначених на попередніх етапах критеріїв можуть бути розраховані ваги важливості для ОНР;

– попередній скринінг альтернатив – дозволяє зменшити кількість альтернатив рішень з урахуванням переваг ОНР, а в подальшому відповідно і час обробки шарів критеріїв операторами агрегування;

– агрегування – об'єднання атрибутів за певними правилами прийняття рішень (тобто побудова узагальненого показника оцінки альтернатив) з використанням операцій накладення (overlay); важливо, щоб метод агрегування, що буде використовуватися, враховував допустимі для ОНР форми компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями.

3) Рекомендації – етап вирішення проблеми та надання рекомендацій ОНР. Після виконання аналізу, його результати у вигляді карт придатності можуть бути використані для вивчення набору прийнятних рішень:

– аналіз чутливості – цей крок дозволяє перевірити надійність отриманого рішення або налаштувати процес відповідно до побажань ОНР;

– рекомендації – по завершенню аналізу ОНР можуть бути надані обґрунтовані рекомендації щодо вирішення проблеми розміщення об'єктів.

Відповідно до запропонованої діаграми (рис.2.1) виконаємо розробку методу геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з

розміщення просторових об'єктів, в якому надамо формалізований опис кожного з перелічених етапів: макро- та мікроаналізу.

2.2 Етап макроаналізу і нечітка модель обробки геопросторової інформації про розміщення об'єктів

2.2.1 Структура геопросторових даних

При вирішенні завдання багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів важливим є врахування множини 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 еколого-економічної природи. Чим точніше будуть визначені ці фактори на попередньому етапі дослідження проблеми, тим більш адекватною буде модель.

У відповідності з діаграмою геопросторового БКАР (рис.2.1), треба виконати декомпозицію множини об'єктів, які належать території, що досліджується, і впливають на прийняття рішення, в тематичні шари критеріїв з метою подальшого дослідження засобами ГІС [24,25,123].

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

$$O = \{o_i\} = \left\{ \left(G, \{A_j\} \right)_i \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (2.3)$$

де G – інформація щодо просторового положення об'єкту; A – 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.

$$O = \bigcup_{j=1}^T O_j, \quad (2.4)$$

де T – множина властивостей території, яку треба врахувати у багатокритеріальному 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 $A = \{Q, N\}$, 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 $S = \langle G, A \rangle$. Будемо розглядати стаціонарні об'єкти з постійними властивостями.

Після проведення декомпозиції об'єктів отримуємо карту M , що являє собою набір тематичних шарів L_i (рис.2.2):

$$M = \{L_i\}, i = \overline{1, t}, \quad (2.5)$$

$$L_i = \{O_j^i\}, j = \overline{1, n}, \quad (2.6)$$

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

Схематично процес декомпозиції множини об'єктів O на тематичні шари наведений на рис.2.2.

Точкові об'єкти на карті представлені парою координат (x,y) і можуть описувати об'єкти інфраструктури, міста утворення відходів, несанкціоновані звалища, місця переробки відходів, тощо:

$$L_p = \{O_i^p\} = \left\{ \left(ID, (x, y), \{A_j\} \right)_i \right\}, i = \overline{1, n}, \quad (2.7)$$

де n – кількість об'єктів точкового шару, ID – ідентифікатор об'єкта, $\{A_j\} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множина атрибутів об'єкта точкового шару.

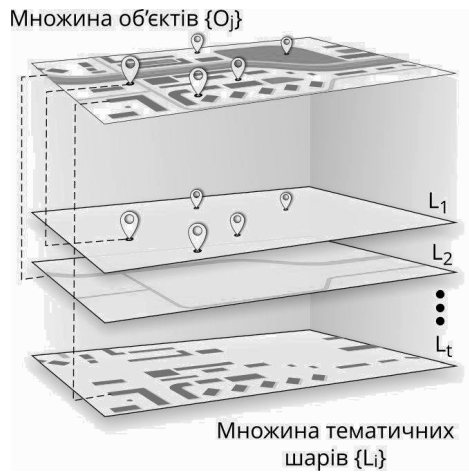


Рисунок 2.2 – Схема декомпозиції об'єктів у тематичні шари

Лінійні об'єкти, до яких відносяться криві або межі полігонального об'єкта, можуть бути представлені у вигляді послідовності точок, що їх утворюють, тобто набором лінійних відрізків прямих, що утворюють полілінію (рис.2.3).

Відмінність лінійних об'єктів від точкових об'єктів полягає в тому, що запис лінійного об'єкта, крім ідентифікатора та вектора атрибутів, містить послідовність координатних пар. Векторна модель лінійного об'єкта, який може представляти на карті водні об'єкти чи автошляхи, виглядає наступним чином:

$$L_i = \{O_i^l\} = \left\{ \left(ID, \{(x, y)_k\}, \left(\bigcup_{l=1}^{m_S} S_{l,l+1} \right), \{A_j\} \right) \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_A}, l = \overline{1, m_S} \quad (2.8)$$

де n – кількість об'єктів лінійного шару, m_A – кількість атрибутів i -го лінійного об'єкта, m_S – кількість відрізків в i -му лінійному об'єкті, ID – ідентифікатор об'єкта.

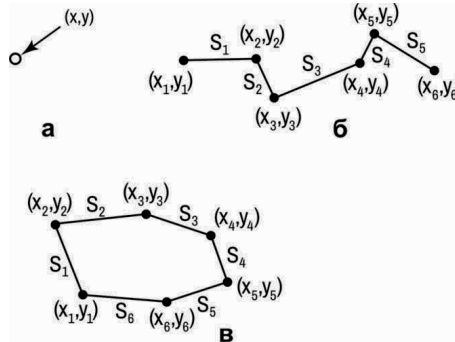


Рисунок 2.3 – Подання об'єктів карти у векторній моделі даних:
а) – точковий об'єкт; б) – лінійний об'єкт; в) – полігональний об'єкт

При цьому відрізок може бути заданий через вираз:

$$y_{l,l+1} = k_{l,l+1} \cdot x_{l,l+1} + b_{l,l+1}, \quad (2.9)$$

де параметри визначаються співвідношенням:

$$\begin{aligned} k_{l,l+1} &= \frac{y_{l+1} - y_l}{x_{l+1} - x_l} \\ b_{l,l+1} &= \frac{x_{l+1} \cdot y_l - x_l \cdot y_{l+1}}{x_{l+1} - x_l}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Полігональний шар містить об'єкти, представлені набором точок деякої області, обмеженої ламаною лінією, при цьому початок першого відрізка лінії повинний збігатися з кінцем останнього (рис. 2.3).

Полігональними об'єктами в ГІС можуть бути представлені полігони ТПВ, населенні пункти, водні об'єкти та ін. Нижче наведено аналітичний запис для полігонального шару:

$$L_{pol} = \left\{ O_i^{pol} \right\} = \left\{ \left(ID, \{ (x, y)_k \}, \left(\bigcup_{l=1}^{m_S} S_{l,l+1} \right), \{ A_j \} \right) \mid x_1 = x_{m_S+1}, y_1 = y_{m_S+1} \right\}, \quad (2.11)$$

$$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_A}, l = \overline{1, m_S}, k = \overline{1, m_p}$$

де n – кількість об'єктів полігонального шару, m_A – кількість атрибутів i -того полігонального об'єкту, m_S – кількість відрізків в i -тому полігональному об'єкті, m_p – кількість точок обмеженої області i -того полігонального об'єкта, ID – ідентифікатор об'єкту.

Отримані просторові та атрибутивні дані про об'єкти, що впливають на прийняття рішень, необхідно далі привести до єдиного узгодженого вигляду, зручного для проведення процедури геопросторового БКАР. Згідно діаграми на рис.2.1 треба сформувати множину альтернатив з урахуванням обмежень, які можуть на неї накладатися.

2.2.2 Формалізація опису просторових відношень між об'єктами

Всі об'єкти, що належать території, і впливають на прийняття рішень про розміщення полігону ТПВ, мають різний ступінь цього впливу в кожній точці території, який у загальному випадку залежить від:

- властивостей території (наприклад рельєфу чи ухилу) та інших зовнішніх умов (наприклад, напрямку вітру);
- діапазону впливу, тобто граничної відстані, на якій ще проявляється дія i -го об'єкта, або відстань, за межами якої впливом об'єкта можна знехтувати;
- відстань між i -м об'єктом та j -ю точкою території.

Тому можна стверджувати, що придатність j -ї точки території визначається сумарним впливом об'єктів, який в свою чергу залежить від взаємного розташування об'єктів, що виражається через відстань.

Для проведення геопросторового БКАР з розміщення об'єктів ТПВ, зручно використовувати растрову модель даних. ГІС-аналіз передбачає здійснення певного набору просторових операцій з шарами

карти, що були отримані після декомпозиції об'єктів. При роботі з векторними наборами даних вони виконуються ступінчастим чином – два вхідних шари використовуються для формування нового шару, цей проміжний шар оброблюється спільно з третім шаром, щоб формувати інший проміжний шар, і так далі до досягнення бажаного результуючого шару карти. При роботі з растровими наборами даних є можливість одночасної обробки декількох шарів, алгоритм якої реалізується в растровому калькуляторі [68]. Це особливо зручно при виконанні операції накладання (overlay). У растровій структурі значення атрибутів зберігаються для кожній комірки растру.

Таким чином, всі тематичні шари об'єктів представимо 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 (рис.2.4):

$$A = \{a_i \mid a_i = n\Delta r, m\Delta r\} \quad (2.12)$$

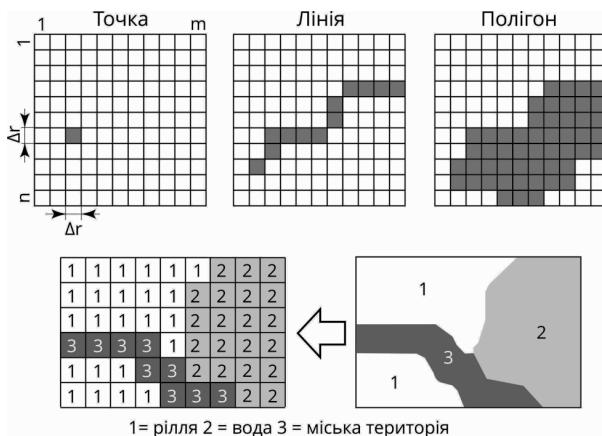


Рисунок 2.4 – Растрове подання просторових об'єктів в ГІС

Будемо використовувати один індекс для зазначення місця розташування комірки растру(комірка, позначена $i=1$, знаходиться в верхньому лівому куті карти сітки-комірки та комірки пронумеровані зліва направо, справа для кожного рядка, комірка $n \times m$ розташована в нижньому

правому куті растрової карти). Для скорочення (2.12) можна записати у вигляді:

$$A = \{a_i \mid i = \overline{1, n \cdot m}\} \quad (2.13)$$

Важливо обрати таку процедуру дискретизації векторних шарів в растр, яка дозволить отримати набір комірок, атрибути яких несуть в собі змістовну інформацію про значення впливу об'єктів шару. Так, наприклад, атрибути можуть бути отримані з векторних карт, що містять точкові об'єкти пунктів спостереження за значенням деякого фактора шляхом використання різних методів інтерполяції.

Для вивчення співвідношення між об'єктами і їх взаємодії зручно використовувати різні метрики близькості [124]: манхеттенську, евклідову, Чебишева та ін.

Евклідова відстань – найбільш розповсюджена метрика, яка виражається геометричною відстанню у багатовимірному просторі:

$$\rho(x, x') = \sqrt{\sum_i^n (x_i - x'_i)^2}. \quad (2.14)$$

Квадрат евклідової відстані застосовується для придання більшої ваги більш віддаленим один від одного об'єктам і розраховується наступним чином:

$$\rho(x, x') = \sum_i^n (x_i - x'_i)^2. \quad (2.15)$$

Відстань міських кварталів (Манхеттенська відстань) є сумою модулю різниць по координатах. На відміну від Евклідової відстані, для цієї міри вплив викидів зменшується (так як вони не підносяться до квадрата):

$$\rho(x, x') = \sum_i^n (x_i - x'_i). \quad (2.16)$$

Відстань Чебишева може бути корисною, коли потрібно визначити два об'єкти як «різні», якщо вони розрізняються за якоюсь однією координатою, і обчислюється за формулою:

$$\rho(x, x') = \max(|x_i - x'_i|). \quad (2.17)$$

Ступенева відстань застосовується, коли необхідно збільшити або зменшити вагу, що відноситься до розмірності, для якої відповідні об'єкти сильно відрізняються. Ступенева відстань обчислюється за формулою:

$$\rho(x, x') = \sqrt[r]{\sum_i^n (x_i - x'_i)^p}, \quad (2.18)$$

де r і p – параметри, що визначаються користувачем. Параметр p відповідає за поступове зважування різниць за окремими координатами, параметр r – за прогресивне зважування великих відстаней між об'єктами. Якщо обидва параметри – r і p – дорівнюють двом, то ця відстань збігається з відстанню Евкліда.

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 :

$$d(O_1, O_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (2.19)$$

При перетворенні векторного шару в растровий шар, векторний об'єкт O_j представляється набором комірок (рис.2.5), кожна з яких має просторові координати і атрибут:

$$O_j = \{(a)_i\} = \{((x', y'), v')_i\}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (2.20)$$

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

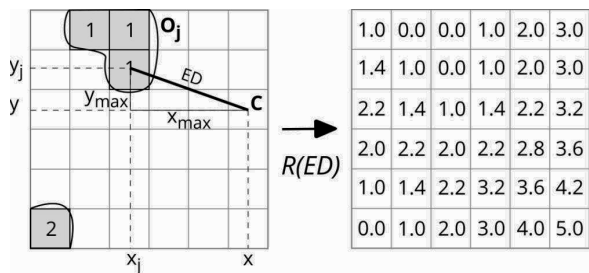


Рисунок 2.5 – Схема процесу побудови растру Евклідових відстаней

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

$$ED(O_j, a) = \min_i \left\{ \left(d(O_j, a) \right)_i \right\}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2.21)$$

Таким чином, можна побудувати растр відстаней $R(ED)$ для j -го шару карти, кожна комірка якого містить атрибут, який дорівнює значенню Евклідової відстані ED від неї до найближчого об'єкта, розрахований відповідно (2.21):

$$R_j(ED) = \left\{ \left((x^j, y^j), ED^j \right)_i \right\}, \quad i = \overline{1, n \cdot m}, \quad j = \overline{1, t}, \quad (2.22)$$

де n – кількість рядків двовимірної сітки растра, m – кількість стовбців двовимірної сітки растра.

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

$$A = \left\{ a_{ij} \mid i = \overline{1, n \cdot m}, \quad j = \overline{1, t} \right\}. \quad (2.23)$$

На множину альтернатив A можуть бути накладені обмеження: на значення атрибутів (непросторові обмеження) або на розташування

(просторові обмеження). Цей крок може бути виконано, якщо з множини альтернатив (точок території, що досліджується) необхідно вилучити окремі альтернативи за певними признаками. Наприклад, для пошуку місць розміщення полігонів ТПВ це може бути певні санітарні зони від території заповідників, сільськогосподарських угідь, аеропортів та ін. 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:

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{if } a_i \in P \\ 0, & \text{if } a_i \notin P, i = \overline{1, n \cdot m}, \end{cases} \quad (2.24)$$

де P – множина припустимих значень альтернатив.

Загальний обмежуючий шар K_c може бути побудований з використанням операції кон'юнкції [25,123]:

$$K_c = \prod_{r=1}^R K_r, R \subset T, \quad (2.25)$$

де K_r – 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 вилучити множину неприпустимих за обмеженнями комірок, використовуючи шар K_c в якості кон'юнктивного фільтра.

В ArcGIS виконати процедуру побудови обмежувального шару можна, наприклад, шляхом застосування інструментів за наступною схемою:

- 1) За допомогою інструменту Buffer з бібліотеки Spatial Analyst побудувати обмежувальні буферні зони навколо об'єктів для різних шарів критеріїв.
- 2) Об'єднати побудовані буферні зони в один векторний шар за допомогою інструменту Union.

3) Перетворити векторний обмежувальний шар у растр за допомогою інструменту Polygon To Raster з набору Conversion.

4) Перекласифікувати растр за допомогою інструменту Reclassify бібліотеки Spatial Analyst, так щоб всім коміркам растру в яких є будь-яке значення було привласнено значення 1, коміркам зі значенням NoData – 0 (рис.2.6). Це дасть змогу при виконанні булевого накладання з обмежувальним шаром за допомогою калькулятора растрів виключити зони обмежень з карти території.

Приклад побудованого за розглянутою схемою обмежувального шару наведено на рис. 2.7.

Таким чином, на даному етапі виконання методу геопросторового БКАР з розміщення об'єктів маємо сформовану множину критеріїв та альтернатив з урахуванням обмежень. Далі згідно діаграмі процесу геопросторового БКАР (рис.2.1) виконаємо стандартизацію атрибутів критеріїв.

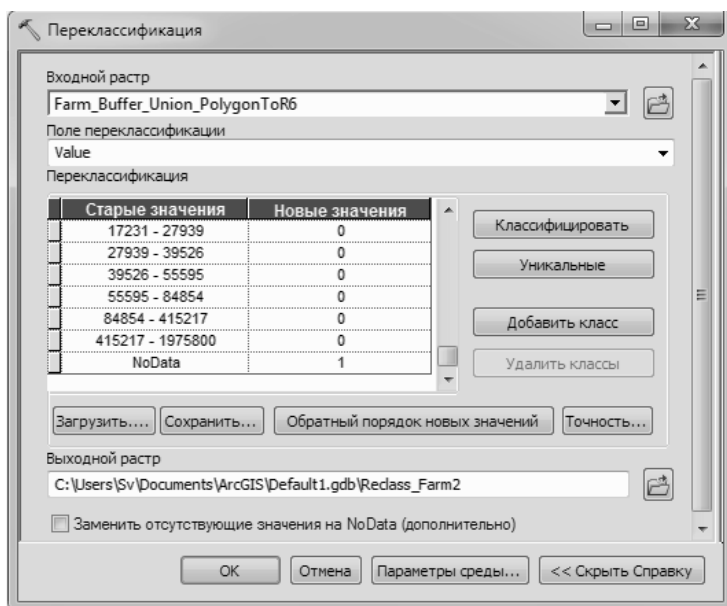


Рисунок 2.6 – Вікно виконання інструменту Reclassify

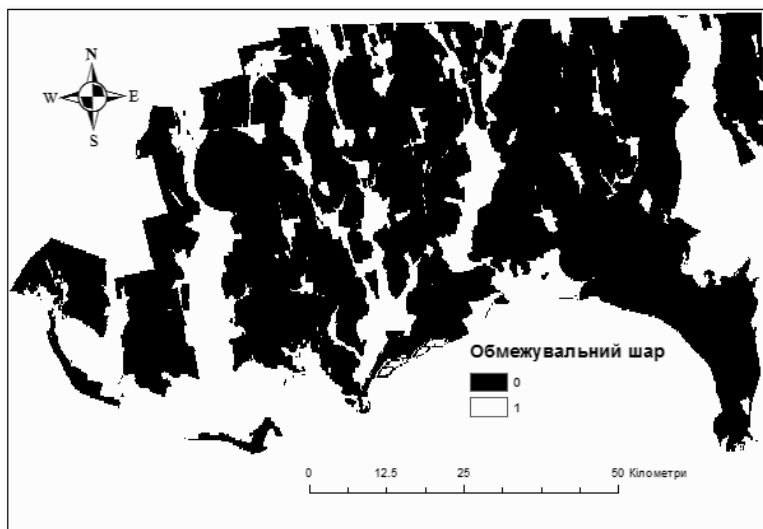


Рисунок 2.7 – Приклад карта обмежувального шару

2.2.3 Стандартизація атрибутів критеріїв за допомогою апарату теорії нечітких множин

Отримані в результаті проведення процедури дискретизації растрові шари об'єктів, як правило, мають різні діапазони чи шкали значень атрибутів. Метод геопросторового БКАР вимагає перетворення атрибутів в порівнянні одиниці. Процедури перетворення необроблених даних у порівнянні одиниці називають методами масштабування значень або стандартизацією. Процедура стандартизації дозволяє виконати масштабування, тобто перенесення вихідних значень атрибутів з необробленої шкали в шкалу $[0,1]$.

Одним з популярних методів для стандартизації критеріїв оцінки, який просто реалізувати в ГІС, є метод оцінки діапазону (Score Range Procedure, SRP) [3]. Так для k -го шару перетворення вихідних значень a_{ik} в стандартизовані значення $v(a_{ik})$, задається наступним чином:

$$v(a_{ik}) = \frac{a_{ik} - \min_i \{a_{ik}\}}{\max_i \{a_{ik}\} - \min_i \{a_{ik}\}}. \quad (2.26)$$

Ця процедура є окремим випадком більш загального підходу до масштабування з використанням функції корисності. Важливим кроком перед застосуванням процедури стандартизації атрибутів є видалення обмежувальних областей. Це виключення буде видаляти значення вихідних атрибутів цих областей, які в іншому випадку могли б вплинути на стандартизацію, якщо вони були включені.

З урахуванням особливостей завдання, що вирішується, пропонується для стандартизації атрибутів критеріїв використовувати більш зважений підхід до масштабування із застосуванням апарату теорії нечітких множин, а саме виконати фазифікацію критеріїв, тобто перетворення у нечітку множину, на підставі експертної оцінки нечіткої функції належності.

Використання чітких меж класів, які визначаються за допомогою порогових значень, можуть бути обґрунтовані необхідністю виконання суворих вимог (чітких обмежень), що накладаються на місце розміщення об'єкту, наприклад, будівельними нормами. Але для вирішення інших питань розміщення об'єктів, наприклад еколого-економічних, вони можуть виявитися нереалістичними.

Наприклад, для полігонів ТПВ будівельними нормами передбачено наявність відстані 200 м від залізничних і автошляхів, однак, не можна вважати будь-яку відстань, що перевищує 200 м, однаково придатною. Економічно ефективним є близькість полігону ТПВ до існуючої транспортної мережі. Будівництво нових доріг, особливо на великій відстані, вимагає величезних попередніх витрат.

Тобто, вибір придатного місця розташування лише на основі чітких, фіксованих меж класифікації альтернатив (точок території, що досліджується) призводить до прийняття обмежених управлінських рішень. Щоб впоратися з невизначеністю і неточностями, пов'язаними з оцінкою придатності, де важко визначити чіткі межі, пропонується апарат теорії нечітких множин.

Поняття нечітких множин як узагальнення звичайних (чітких) множин було введено Л. Заде [18, 125–130]. Традиційний спосіб

представлення елемента множини A полягає в застосуванні функції належності $\mu_a(x)$, яка дорівнює 1, якщо елемент x належить до множини A , або дорівнює 0 в іншому випадку. В нечітких системах елемент може належати до множини A частково, тобто $\mu_a(x) \subseteq [0,1]$. Конкретне значення функції належності називається ступенем або коефіцієнтом належності. Цей ступінь може бути визначена явно у вигляді функціональної залежності.

Нечітка множина універсальної множини U визначається як множина впорядкованих пар:

$$\tilde{V} = \{ \langle \mu_v(a) | a \rangle \}, \quad (2.27)$$

де $\mu_v(a)$ функція належності, що приймає значення в деякій цілком впорядкованій множині $M=[0;1]$. Якщо $M=[0;1]$, то нечітка підмножина може розглядатися як чітка множина. Функція належності вказує ступінь належності елемента x нечіткій підмножині A . Чим більше $\mu_v(a)$, тим більшою мірою елемент універсальної множини відповідає властивостям нечіткої підмножини.

В [20, 131–133] пропонується підхід, що відносить територію не до одного, а до декількох класів за різними належностями, з межами між класами, які носять перехідний характер, що поліпшує і робить більш інформативними результати просторового аналізу.

Таким чином, опис просторової інформації на основі апарату теорії нечітких множин базується на перетворенні значень атрибутів k -го шару на значення ступені належності до нечіткої множини \tilde{V}_k :

$$\tilde{V}_k = \{ \langle a, \mu_v^k(a) \rangle | a \in U \}, \mu_v^k(a) : a \rightarrow [0,1], \quad (2.28)$$

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

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 $\mu_v^k(a)$ для атрибуту комірки a :

$$R_k(\tilde{v}(a_i^k)) = \left\{ \left((x_i^k, y_j^k), \mu_v^k(a_{ij}^k) \right) \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, t}. \quad (2.29)$$

Як правило, функція належності будується за участю експерта (групи експертів), таким чином, що ступінь належності приблизно дорівнює інтенсивності прояву деякого фактору.

Складність практичного застосуванню теорії нечітких множин полягає в тому, що функція належності повинна бути задана поза самої теорії і, отже, її адекватність не може бути перевірена безпосередньо засобами теорії. У кожному в даний час відомому методі побудови функції належності формулює свої вимоги й обґрунтування до вибору саме такої побудови [134].

В [135–137] обговорюються прямі і непрямі методи побудови функцій належності для одного і групи експертів в залежності від застосування теорії нечітких множин для рішення конкретних практичних завдань.

Особливістю вирішення проблеми розміщення просторових об'єктів є наявність певних умов, які враховуються експертами, тому перевага при побудові функції належності може бути надана прямим методам з використанням типових функцій належності [138, 139].

Прямі методи основані на безпосередньому призначенні міри належності для досліджуваних об'єктів або безпосередньому призначенні функції (правила), що дозволяє обчислити її значення. Вибір функції належності і їх параметрів при цьому визначається досвідом, інтуїцією і іншими суб'єктивними факторами ОПР (експерта в галузі). Маючи деякий набір типових функцій належності, можна підібрати ту, яка буде достатньою мірою відповідати уявленням особи, що її обирає. Суттєвим є те, що для цих функцій заздалегідь відомі їхні аналітичні записи, що дозволяє обчислити їх значення в будь-якій точці області визначення [134].

На практиці часто застосовуються такі види функцій належності (рис.2.6): лінійні, трикутні і трапецієподібні (лінійно-кускові); нелінійні (функція Гауса, сигмоїдальна функція, сплайн). Їх аналітичні вирази представлені в [138, 139].

Для задачі розміщення об'єктів, можуть бути запропоновані наступні функції належності (ФН):

Кусково-лінійні ФН – використовуються для завдання властивостей, що характеризують невизначеність типу: «приблизно дорівнює», «розташований в інтервалі» та ін. Характерним прикладом таких функцій є трикутна та трапецевидна ФН. Трикутна ФН (рис.2.6,а) у загальному випадку може бути задана аналітичним виразом:

$$f_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & c < x \end{cases}, \quad (2.30)$$

де a, b, c – деякі числові параметри, які набувають довільних дійсних значень і впорядковані відношенням: $a \leq b \leq c$.

Трапецієподібна ФН (рис.2.6,б) в загальному випадку може бути задана аналітично виразом:

$$f_T(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & d < x \end{cases}, \quad (2.31)$$

де a, b, c, d – деякі числові параметри, які набувають довільних дійсних значень і впорядковані відношенням: $a \leq b \leq c \leq d$.

Z-образні і S-образні функції належності. Z-образні функції (монотонно спадні) використовуються для представлення таких властивостей нечітких множин, які характеризуються невизначеністю типу: "невелике значення", "незначна величина" та ін. (рис.2.6,г). Загальним для всіх таких ситуацій є слабкий ступінь прояву тієї чи іншої якісної або кількісної ознаки. Може бути задані наступними аналітичними виразами:

$$f_{z_1}(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-a}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases}, \quad (2.32)$$

$$f_{z_2}(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad (2.33)$$

де a, b – деякі числові параметри, які набувають довільних дійсних значень і впорядковані співвідношенням: $a < b$.

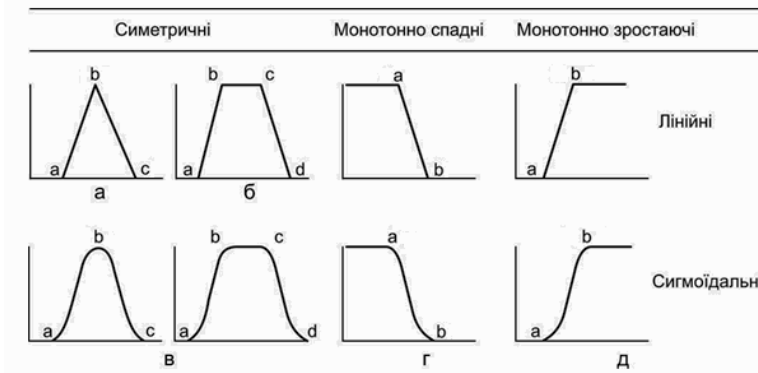


Рисунок 2.6 – Типи функцій належності, що можуть бути використані для стандартизації критеріїв: а) – трикутна ФН; б) – трапецієподібна ФН; в) – П-образна ФН; г) – Z-образні ФН; д) – S-образні ФН

S-образні функції (монотонно зростаючі) використовуються для подання таких нечітких множин, які характеризуються невизначеністю

типу: "велике значення", "значна величина" та ін. (рис.2.6,д). Загальним для всіх таких ситуацій є високий ступінь прояву тієї чи іншої якісної або кількісної ознаки. Може бути заданий наступними аналітичними виразами:

$$f_{S_1}(x; a, b) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x < a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-b}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 1, & x > b \end{array} \right\}, \quad (2.34)$$

$$f_{S_2}(x; a, b) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1, & b \leq x \end{array} \right\}, \quad (2.35)$$

де a, b – деякі числові параметри, які набувають довільних дійсних значень і впорядковані співвідношенням: $a < b$.

До типу S-образних і одночасно Z-образних функцій належності може бути віднесена сигмоїдальна функція, яка в загальному випадку задається аналітично наступним виразом:

$$f_{S_3}(x; a, b) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}}, \quad (2.36)$$

де a, b – деякі числові параметри, які приймають довільні дійсні значення і впорядковані співвідношенням: $a < b$. Якщо $a > 0$ може бути отримана S-образна ФН, а в разі $a < 0$ – Z-образна ФН.

Як окремі випадки Z- і S-образних кривих часто використовують так звану лінійну Z-подібну функцію:

$$f_{z_{\downarrow}}(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad (2.37)$$

і лінійну S-образну функцію:

$$f_{S_{\uparrow}}(x; a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \geq x \end{cases}. \quad (2.38)$$

П-подібна функція належності (рис.2.6,в) в загальному випадку задається аналітично виразом:

$$f_{\Pi}(x; a, b, c, d) = f_S(x; a, b) \cdot f_Z(x; c, d) \quad (2.39)$$

На рис. 2.7 наведений приклад стандартизації растрового шару, що містить об'єкти транспортної мережі. Векторний шар з лінійними об'єктами транспортної мережі відповідно (2.22) був перетворений на растровий шар Евклідових відстаней. Растр, що враховує ступінь придатності кожної комірки за критерієм, був побудований відповідно до запропонованої експертами кусково-лінійної трапецієподібної функції належності $\mu_a(v)$ за формулою (2.31) [15,16,140,141].

Фазифікація критеріїв дозволяє в подальшому об'єднати критерії за допомогою нечітких правил виведення. Для цього можуть бути використані нечіткі арифметичні операції перетину або об'єднання, які в даному випадку можна розглядати як некомпенсаційні методи агрегування.

Нечіткий перетин (або AND) визначається:

$$\bigcap_{j=1}^n \mu_v^j(a_i) = \min [\mu_v^1(a_i), \mu_v^2(a_i), \dots, \mu_v^n(a_i)]. \quad (2.40)$$

Нечітке об'єднання (або OR) визначається:

$$\bigcup_{j=1}^n \mu_{v_j}^i(a_i) = \max[\mu_{v_1}^i(a_i), \mu_{v_2}^i(a_i), \dots, \mu_{v_n}^i(a_i)]. \quad (2.41)$$

Використання операції нечіткого перетину (2.40) призводить до оцінювання альтернативи на основі лише найнижчого значення атрибутів критеріїв, операція нечіткого об'єднання (2.41) враховує тільки кращу оцінку критеріїв.

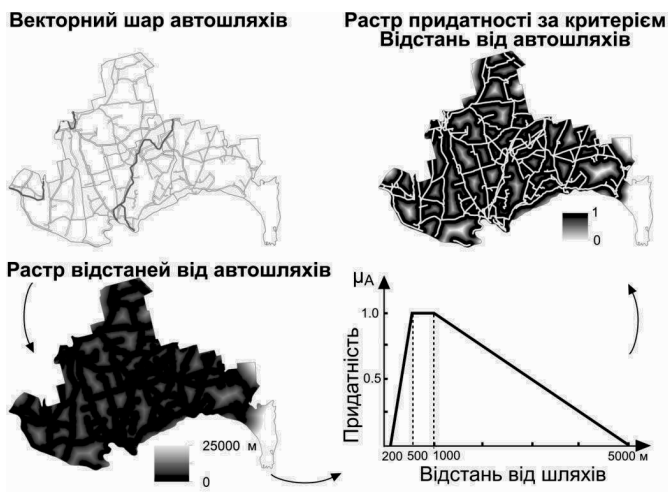


Рисунок 2.7 – Схема процесу стандартизації растру відстаней від транспортної мережі

В ArcGIS для стандартизації критеріїв можуть бути використано розглянутий раніше інструмент Reclassify.

Розглянемо роботу інструменту на прикладі стандартизації атрибутів критерію ухилу. Нехай, була використана трапецієвидна функція належності з контрольними точками $a = 5$, $b = 10$, $c = 15$, $d = 30$, яка в загальному випадку може бути задана аналітично (2.31). Щоб задати цю функцію, спочатку було виконано перекласифікацію растра в інтервалі $[0,10]$, так як показано на рис. 2.8, а далі з використанням інструменту

«Калькулятор растра» (рис. 2.9) усі значення комірок отриманого растру були поділені на 10, таким чином отримано діапазон [0,1].

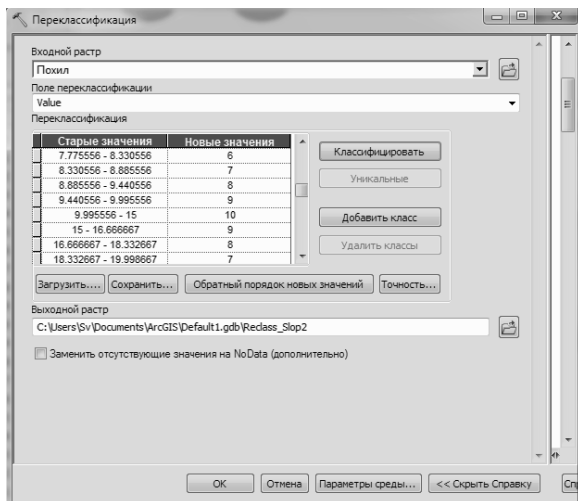


Рисунок 2.8 – Перекласифікація значень растру для критерію «Ухил»

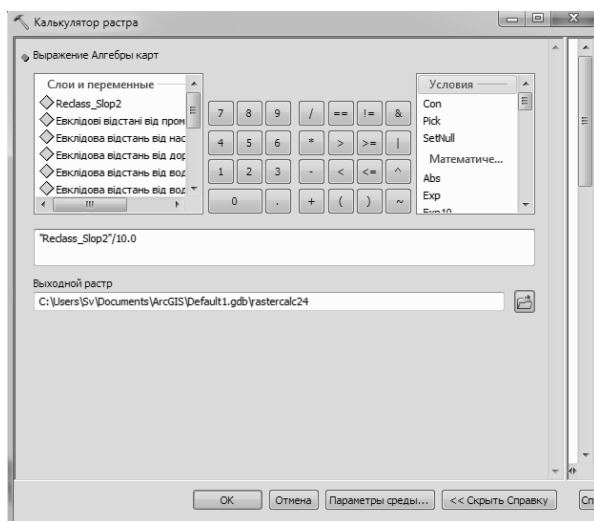


Рисунок 2.9 – Вікно інструменту «Какултор растра»

Таким чином, використання для стандартизації шарів критеріїв апарату теорії нечітких множин дозволяє врахувати невизначеність вихідної інформації та досвід і судження експертів, а також отримати більш інформативну карту придатності, за рахунок визначення рангу придатності альтернатив.

2.3 Етап мікроаналізу та методи багатокритеріального аналізу рішень

Розглянемо докладніше формалізований опис етапу мікроаналізу для запропонованої процедури геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів, що представлена на рис.2.1. На цьому етапі виконуються методи розрахунку ваг важливості критеріїв, скринінгу альтернатив та агрегування атрибутів критеріїв.

Важливим аспектом етапу мікроаналізу є його інтеграція в ГІС, тобто передбачається створення інформаційної технології та програмних засобів реалізації даного етапу у вигляді окремих скриптів геообробки. Тому доцільно обирати методи БКАР, які можуть бути реалізовані у пакетах ГІС і мають невисоку обчислювальну вартість. Також, як було згадано раніше, обґрунтованим є застосування методів БКАР, заснованих на апараті теорії нечітких множин, які дозволять врахувати невизначеність в оцінках та перевагах ОПР.

Наукові дослідження, присвячені вирішенню проблеми пошуку придатних місць розміщення територіально-розподілених об'єктів, підтверджують ефективність поєднання методів БКАР з теорією нечітких множин і нечіткою логікою.

Так, в [20] був застосований нечіткий підхід, при якому ваги критеріїв були описані лінгвістичними змінними, вираженими в трикутних нечітких числах. Автори сконцентрували свою увагу на етапі ранжування семи ділянок, які були визначені у результаті операції булевого накладення шарів критеріїв. Результати роботи [131] показали, що комбінація методів зваженої лінійної комбінації і метода аналізу ієрархії має кращі можливості прийняття рішень в порівнянні з булевою логікою. А в [132] апарат теорії нечітких множин був використаний на етапі стандартизації критеріїв. В результаті нечіткого накладення отримана растрова карта придатності зі значенням комірок в діапазоні $[0,1]$. Для стандартизації

критеріїв були використані лінійні та сигмоїдальні функції належності до нечіткої множини.

На відміну від розглянутих робіт [20, 131, 132] в даному дослідженні апарат теорії нечітких множин та нечітка логіка будуть використані на етапах стандартизації критеріїв, розрахунку ваг важливості критеріїв, скринінгу альтернатив та агрегування атрибутів критеріїв для вдосконалення відповідних методів геопросторового БКАР з розміщення просторових об'єктів.

2.3.1 Методи розрахунку ваг критеріїв

Розглянемо методи розрахунку важливості критеріїв. У випадку n критеріїв, множина ваг визначається наступним чином:

$$W = \{w_i \mid \sum w = 1, i = \overline{1, n}\}. \quad (2.42)$$

Найпростішим способом оцінювання важливості критеріїв є ранжування (Ranking Method), тобто упорядкування критеріїв експертом у порядку важливості (самий важливий – 1, другий важливий – 2, і т.д.). Після того, як рейтинг встановлений, ваги критеріїв розраховуються відповідно до рівняння [95]:

$$w_i = \frac{n - r_i + 1}{\sum_{i=1}^r (n - r_i + 1)}, \quad (2.43)$$

де w_i – нормована вага для i -го критерію, n – кількість критеріїв ($j = 1, 2, \dots, n$), 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 [95]:

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum w'}, \quad (2.44)$$

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

Можна також згадати метод зважування критеріїв на основі ентропії, який на відміну від розглянутих вище підходів не вимагає визначення переваг стосовно критеріїв оцінки. Метод заснований на концепції інформаційної ентропії, запропонованого К.Шенноном (1947) [142]. Ентропія – це міра очікуваного інформаційного вмісту повідомлення. З цієї точки зору ваги критеріїв "можна розглядати як послідовні повідомлення, важливі для оцінки" альтернатив рішення. З огляду на це, можна оцінити ваги критерію, виходячи з кількості інформації, що міститься в кожному критерії, a_{ik} , яка вимірюється ентропією E_k [4]:

$$E_k = - \frac{\sum_{i=1}^m p_{ik} \ln(p_{ik})}{\ln(m)} \quad (2.45)$$

де $p_{ik} = a_{ik} / \sum_{i=1}^m a_{ik}$; a_{ik} – значення k -го атрибута для i -ї альтернативи.

Ступінь різноманітності інформації, що міститься в наборі значень критеріїв, можна обчислити так: $b_k = 1 - E_k$. Використовуючи ступінь різноманітності, b_k , критерій ваги на основі ентропії визначається як [4]:

$$w_{E_k} = \frac{b_k}{\sum_{k=1}^n b_k}. \quad (2.46)$$

Критерій ваги на основі ентропії може поєднуватися з вагами w_k , отриманими за допомогою будь-якого іншого метода. Зокрема, нова вага визначається наступним чином [4]:

$$w_{E_k}^* = \frac{w_{E_k} w_k}{\sum_{k=1}^n w_{E_k} w_k}. \quad (2.47)$$

Значення ваг критеріїв на основі ентропії, w_{E_k} і $w_{E_k}^*$ коливаються від 0 до 1. Чим різноманітніша інформація міститься в k -му критерії, тим вище

значення цього критерію. Чим менше значення ентропії, E_k , тим вищий ступінь різноманітності критеріїв, b_k , і більша вага на основі ентропії. Це означає, що чим більше інформації надає k -й критерій, тим важливішим є цей критерій у процедурі прийняття рішень. Якщо k -му критерію притаманна досконала однорідність (тобто a_{ik} – це постійне значення для $i = 1, 2, \dots, m$), то вага критерію дорівнює нулю. Отже, критерій може бути вилучений із набору критеріїв оцінки, оскільки він не містить інформації про проблему прийняття рішення. Метод оцінки ваги критеріїв, заснований на ентропії, рідко застосовується в ГІС-БКАР.

Метод парного порівняння. 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-ти бальної фундаментальної шкала абсолютних чисел Сааті [108–110]. 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:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} \neq 0. \quad (2.48)$$

Для етапу розрахунку ваг важливості критеріїв пропонується модифікований нечіткий МАІ, в якому парні порівняння критеріїв виконуються через лінгвістичні змінні представлені трикутними числами (табл. 2.2).

На першому етапі трансформуємо чітку матрицю парних порівнянь A , після перевірки узгодженості оцінок, $C.R. < 0.10$ (1.11) – (1.12) у нечітку матрицю \tilde{A} за допомогою шкали з трикутними нечіткими числами:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2.49)$$

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

Таблиця 2.2 – Лінгвістичні змінні і відповідні нечіткі числа

Шкала Саагі	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)

Нечіткі ваги кожного критерію можна знайти, використовуючи векторне підсумовування, згідно рівняння [7]:

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = (lw_i, mw_i, uw_i), \quad (2.50)$$

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:

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3}, \quad (2.51)$$

де M_i – чітке число, яке треба нормалізувати, щоб отримати вагу критерію:

$$w_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}. \quad (2.52)$$

2.3.2 Метод скринінгу альтернатив

Метод скринінгу альтернатив пропонується як додатковий етап фільтрації альтернатив з урахуванням переваг ОНР, який може бути застосований після накладення непросторових обмежень на множину альтернатив та стандартизації атрибутів критеріїв [22, 23,102,122]. Опишемо докладніше цей метод. Оцінки альтернатив за критеріями представимо як нечіткі множини, що виражені через функції належності:

$$\tilde{C}_j = \{\mu_j(a_i) / a_i\}, \mu_j(a_i) \in [0, 1], j = \overline{1, n}. \quad (2.53)$$

Далі виконаємо ранжування критеріїв C_j за важливістю і пронумеруємо їх в порядку спадання ваг критеріїв w_j . Для розрахунку ваг критеріїв може бути використана нечітка модифікація методу аналізу ієрархій.

Задамо поріг рівня α_j і побудуємо множину α -рівня вигляду:

$$A_j = \{a | a \in A_{j-1}, \mu_j(a) \geq \alpha_j\}, A_0 \equiv A, j \leq n. \quad (2.54)$$

Нагадаємо, що множиною α -рівня для нечіткої множини A є множина A_α усіх таких елементів універсальної множини U , ступінь належності яких до нечіткої множини A більше або дорівнює α . На рис. 2.10 показаний приклад порогу α -зрізу, застосованого до нечіткої множини A .

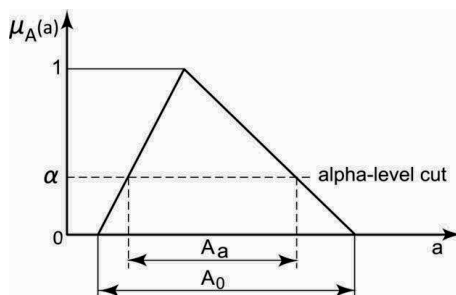


Рисунок 2.10 – Приклад α -зрізу для нечіткої множини A

Якщо за формулою (2.54) на певному кроці j $A_j \equiv 0$ (порожньо), то потрібно змінити поріг рівня α_j або повернутися на крок раніше та змінити поріг рівня α_{j-1} . Розрахунок повторюється до тих пір, поки на останній ітерації множина A_n не буде містити тільки придатні за оцінками експертів альтернативи.

ОПР може змінювати множину A_n шляхом варіювання ваг критеріїв w_j або порогів рівня α_j . Якщо критерії за важливістю рівнозначні, то для кожного критерію C_j розраховується окремо множини α -рівня A_j за заданими порогоми α_j , а далі будується множина виду:

$$A^* = \bigcap_{j=1}^n A_j. \quad (2.55)$$

Якщо $A^* \equiv 0$ (порожньо) або не задовольняє ОПР, тоді змінюються або всі пороги рівня α_j , або деякі з них і повторюється j -й крок. В іншому випадку алгоритм закінчує роботу. Для отриманої множини альтернатив A^* виконується агрегування оцінок альтернатив.

Приклад використання запропонованого алгоритму скринінгу альтернатив для трьох шарів критеріїв $C = \{C_1, C_2, C_3\}$, представлений на рис.2.11 [22,23,102].

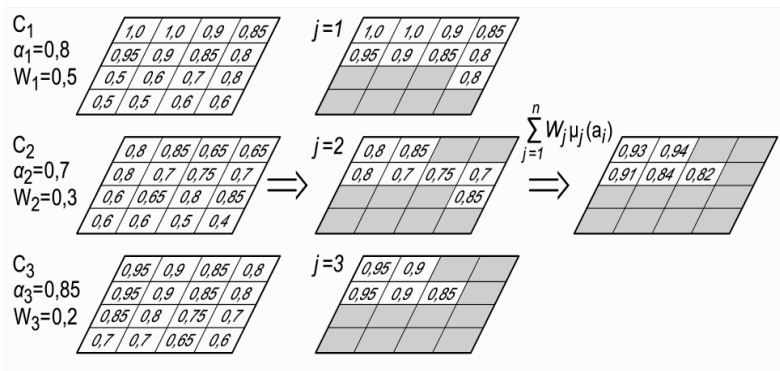


Рисунок 2.11 – Приклад реалізації алгоритму скринінгу альтернатив для трьох критеріїв

Розглянемо приклад, в табл.2.3 наведені значення атрибутів альтернатив за трьома критеріями, що розраховані відповідно до функцій належності, які були визначені експертами.

Нехай всі критерії впорядковані за зменшенням важливості (ваги): $C_1 > C_2 > C_3$ і $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{16}\}$. Глянемо етапи виконання алгоритму.

- 1) Нехай $\alpha_1 = 0,8$, тоді $A_1 = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_{12}\}$.
- 2) Нехай $\alpha_2 = 0,7$, тоді $A_2 = \{a_1, a_2, a_5, a_6, a_7, a_8, a_{12}\}$.
- 3) Нехай $\alpha_3 = 0,85$, тоді $A_3 = \{a_1, a_2, a_5, a_6, a_7\}$.

Тобто за результатом роботи алгоритму найбільш придатними є альтернативи $\{a_1, a_2, a_5, a_6, a_7\}$. Далі можна знайти їх загальні оцінки придатності шляхом виконання агрегування оцінок за окремими критеріями.

Таблиця 2.3 – Експертна оцінка альтернатив за критеріями

	C_1	C_2	C_3
w_i	0,5	0,3	0,2
a_1	1,00	0,80	0,95
a_2	1,00	0,85	0,90
a_3	0,90	0,65	0,85
a_4	0,85	0,65	0,80
a_5	0,95	0,8	0,95
a_6	0,90	0,7	0,90
a_7	0,85	0,75	0,85
a_8	0,80	0,70	0,80
a_9	0,50	0,60	0,85
a_{10}	0,60	0,65	0,80
a_{11}	0,70	0,80	0,75
a_{12}	0,80	0,85	0,70
a_{13}	0,50	0,60	0,70
a_{14}	0,50	0,60	0,70
a_{15}	0,60	0,50	0,65
a_{16}	0,60	0,40	0,60

2.3.3 Метод агрегування на основі OWA оператора Ягера з лінгвістичними квантифікаторами

Одним з аспектів появи нечіткості інформації в БКАР є невизначеність переваг ОПР. Ця інформація стосується, по-перше, ступенів відносної важливості (ваг) критеріїв, по-друге, допустимої для ОПР форми компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями для можливості побудови узагальненого показника оцінки альтернатив.

В якості причин нечіткості ваг критеріїв можна відмітити їх вираз у словесній формі, а також складність або неможливість точно та однозначно оцінити значення відповідних параметрів.

Форма компромісу між оцінками визначає допустимий, з точки зору ОПР, ступінь компенсації більш низьких оцінок більш високим та найчастіше виражається словесно за допомогою суджень виду «альтернатива повинна мати високу оцінку за більшістю (за всіма, за кількома, не менш ніж за половиною) критеріїв». Ці судження також мають нечіткий характер.

Для формалізації невизначених, якісних понять, які мають словесну форму виразу обґрунтованим є використання нечіткої логіки і поняття нечіткої змінної. На основі нечітких змінних формуються більш складні структури – лінгвістичні змінні.

Нечітка змінна визначається кортежем параметрів $\langle \alpha, U, \tilde{A} \rangle$, де α – найменування нечіткої змінної, $U = \{u\}$ – область визначення змінної α , $\tilde{A} = \{\mu_A(u) | u\}$ – нечітка множина, що описує можливі значення змінної α [125].

Лінгвістичною називається змінна, значеннями якої є слова і фрази природної мови, що формалізуються у вигляді нечітких множин. Лінгвістична змінна – це множина нечітких змінних, яка задається кортежем [125]:

$$LZ = \langle \beta, U, T, M, G \rangle, \quad (2.56)$$

де β – назва лінгвістичної змінної,
 U – універсальна множина,

T – множина значень лінгвістичної змінної, кожне з яких є нечіткою змінною на U ,

M – синтаксична процедура, що дозволяє отримувати (формувати) нові значення лінгвістичної змінної,

G – семантичне (смісловіе) правило, що дозволяє інтерпретувати нові значення лінгвістичної змінної.

Терм-множина – це множина всіх можливих значень лінгвістичної змінної. Терм – будь-який елемент терм-множини. Терм формалізується нечіткою множиною за допомогою функцій належності.

Наприклад, лінгвістична змінна «Відстань» в рамках дослідження місця розташування об'єктів розміщення відходів може приймати значення з терм-множини $T = \{\text{«близько»}, \text{«недалеко»}, \text{«далеко»}\}$, кожне з яких визначається відповідною функцією належності (рис. 2.12).

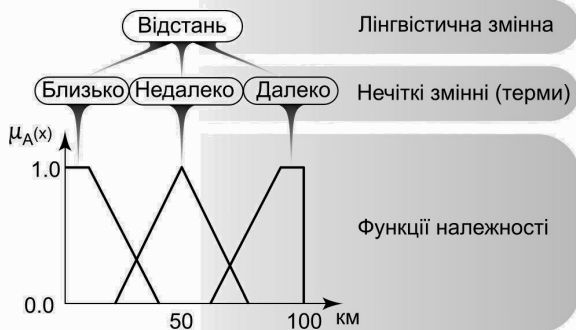


Рисунок 2.12 – Приклад лінгвістичної змінної «Відстань»

Звернемося до формалізованого запису багатокритеріального аналізу рішень (2.1). Нехай оцінки альтернатив $a_i \in A$ за кожним критерієм $C_j \in C$ виражені в числовій формі, шляхом перетворення їх чітких значень у нечітку множину на підставі експертної оцінки нечіткої функції належності $\mu_{a_j}(v)$ і приймають значення на відрізьку $[0,1]$. Система переваг ОПП P може бути представлена у вигляді:

$$\langle C_j(a) \rightarrow \max, a \in A (j = 1, \dots, n); W, Q \rangle, \quad (2.57)$$

де W – інформація про відносну важливість критеріїв, яка задається набором ваг $w_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$; Q – інформація про допустиму форму компромісу між оцінками за різними критеріями. Для формалізації інформації Q можна скористатися поняттям нечіткого квантифікатора [143].

Нечіткі квантифікатори є розширенням класичного набору логічних квантифікаторів, що включають до себе квантори \exists («існує») та \forall («для всіх»), за рахунок введення нечітких понять «майже для всіх», «приблизно для половини» та ін. Нечітка множина Q , що задана на одиничному відрізку, називається пропорційним нечітким квантифікатором. Функцію належності даного нечіткого квантифікатора будемо позначати як $Q(r)$, де r – змінна, що показує частку елементів деякої множини U , що володіє властивістю S (наприклад, $r=0,25$, означає, що властивістю S володіють 25% елементів множини U). Приклади функцій належності різних нечітких квантифікаторів наведені на рис.2.13 [144, 146, 147].

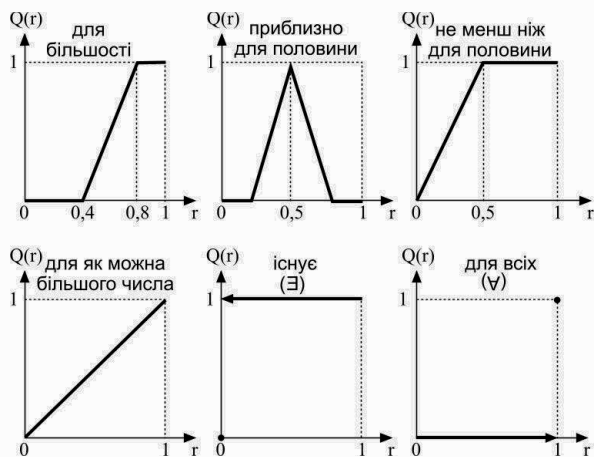


Рисунок 2.13 – Приклади функцій належності нечітких квантифікаторів

На форму Q можна накласти наступні вимоги [144]:

1) альтернатива, що має найменші оцінки за всіма критеріями, не є допустимою (прийнятною), тобто $Q(0)=0$;

2) альтернатива, що має максимальну оцінку за всіма критеріями, є найбільш прийнятною (має максимальну загальну оцінку), тобто $Q(1)=1$;

3) чим більшої кількості критеріїв задовольняє альтернатива, тим вище ступінь її прийнятності, тобто $r_1 > r_2 \Rightarrow Q(r_1) \geq Q(r_2)$.

Застосуємо оператор впорядкованого зваженого усереднення, запропонований Р.Ягером (Ordered Weighted Averaging, OWA) [143] в якості правила прийняття рішення для (2.1), (2.57).

OWA оператор Ягера дозволяє комбінувати шари карти, зв'язуючи з шарами карти два типи ваг: набір ваг критеріїв $w_1, w_2, \dots, w_n, 0 \leq w_j \leq 1$, де $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, та набір ваг порядку $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, 0 \leq \lambda_j \leq 1$, де $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$.

Формалізований запис OWA оператора Ягера має наступний вигляд:

$$V(a'_i) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\lambda_j w_j^b}{\sum_{j=1}^n \lambda_j w_j^b} \right) b_{ij}, \quad (2.58)$$

де $V(a'_i)$ – загальна оцінка i -ї альтернативи; $b_{i1} \geq b_{i2} \geq \dots \geq b_{in}$ – елементи вектора $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ впорядковані за зменшенням; w_j^b – ваги критеріїв, впорядковані у відповідності зі значенням атрибуту b_{ij} .

Рівняння (2.58) має схожість з (1.8), але містить змінені ваги критеріїв, які формуються шляхом множення ваг критеріїв w_j на ваги порядку λ_j . Можна показати, що у випадку, коли $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = 1/n$, (2.58) повністю ідентично (1.8). За рівнянням (2.58) можна отримати широкий спектр операторів агрегування шляхом вибору відповідного вектора ваг порядку λ_j .

Таким чином, можна говорити про те, що OWA – є універсальним оператором агрегування, тому що має здатність реалізовувати широкий спектр комбінування шарів критеріїв: від логічного AND (у випадку, коли $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{n-1} = 0, \lambda_n = 1$), до OR (у випадку, коли $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = \dots = \lambda_n = 0$). Оператори AND (2.40) і OR (2.41) є екстремальними випадками оператора OWA [146,147].

Важливим питанням залишається розрахунок ваг порядку. Р.Ягером [145] для визначення ваг порядку пропонується підхід, що базується на використанні лінгвістичних квантифікаторів.

Нехай є вектор $(\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \dots, \tilde{\lambda}_n)$, де $0 \leq \tilde{\lambda}_j \leq 1$ і $\sum_{j=1}^n \tilde{\lambda}_j = 1$. OWA оператор, що керується квантифікатором, для даного вектора задається у вигляді:

$$V(a_i) = \sum_{j=1}^n \tilde{\lambda}_j b_{ij}. \quad (2.59)$$

де $V(a_i)$ – загальна оцінка i -ї альтернативи; $b_{i1} \geq b_{i2} \geq \dots \geq b_{in}$ – елементи вектора $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ впорядковані за зменшенням. Важливим аспектом даного підходу є те, що вага порядку $\tilde{\lambda}_j$ пов'язана з позицією елементів в упорядкованому за зменшенням векторів таким чином, що $\tilde{\lambda}_1$ 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:

$$\tilde{\lambda}_j = Q\left(\sum_{i=1}^j w_i^b\right) - Q\left(\sum_{i=1}^{j-1} w_i^b\right). \quad (2.60)$$

Розглянемо сімейство кванторів *RIM* (*Regular Increasing Monotone*) (рис.2.14) [3,145]:

$$Q_\alpha(r) = r^\alpha, \alpha \geq 0. \quad (2.61)$$

Змінюючи параметр α , можна генерувати різні типи квантифікаторів від «для всіх» до «принаймні для одного». Характеристики квантифікаторів RIM наведені у табл.2.4.

Вибір конкретного значення α можна інтерпретувати в контексті схильності ОПР до ризику при прийнятті рішення, тобто є рішення оптимістичним чи песимістичним.

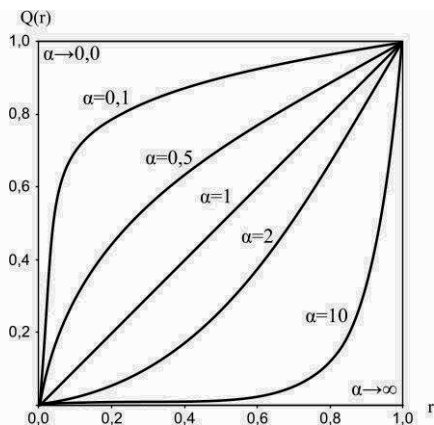


Рисунок 2.14 – Сімейство RIM квантифікаторів

Таблиця 2.4 – Характеристики RIM квантифікаторів при різних значеннях параметру α

Параметр α	Нечіткий квантифікатор (Q)	Ставлення ОПР до ризику	OWA ваги порядку ($\tilde{\lambda}_j$)
$\rightarrow 0$	принаймні для одного	надзвичайно оптимістично (прийняття ризику)	$\tilde{\lambda}_1 = 1; \tilde{\lambda}_k = 0,$ для $k = 2, 3, \dots, n$
0.1	принаймні для декількох	оптимістичний	–
0.5	для декількох	помірно оптимістичний	–
1.0	тотожність	нейтральний	$\tilde{\lambda}_k = 1/n,$ для $k = 1, 2, 3, \dots, n$
2.0	для більшості	помірно песимістичний	–
10.0	майже для всіх	песимістичний	–
$\rightarrow \infty$	для всіх	надзвичайно песимістичний (відмова від ризику)	$\tilde{\lambda}_n = 1; \tilde{\lambda}_k = 0,$ для $k = 1, 2, \dots, n-1$

Для $\alpha=1$ значення Q пропорційно α позначається квантифікатором «тотожності». Цей квантифікатор може обиратися ОПР, яка є байдужою або нейтральною до ризику. Коли α прямує до нуля, квантифікатор Q

наближається до свого крайнього стану «принаймні для одного». Перехід від «тотожності» до «принаймні для одного» збільшує ступінь прийняття ризику (рівень оптимізму). Ця ситуація характерна для кривих над квантифікатором «тотожність» (рис.2.14). З іншого боку, будь-яка крива під квантифікатором «тотожність» відображає ступінь песимістичних стратегій прийняття рішень. Чим ближче крива до крайнього стану «для всіх», тим вище ступінь уникнення ризику. Квантифікатор «для всіх» є надзвичайно песимістичною стратегією прийняття рішень.

Параметр α можна використовувати для розрахунку набору ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$ [145]:

$$\tilde{\lambda}_j = \left(\sum_{i=1}^j w_i^b \right)^\alpha - \left(\sum_{i=1}^{j-1} w_i^b \right)^\alpha, \quad (2.62)$$

де w_i^b – вага критерію w_i , упорядкована відповідно до значення атрибута b_{ij} .

Таким чином, для агрегування критеріїв пропонується використовувати OWA оператор Ягера, керований лінгвістичними квантифікаторами, який дозволяє більш повно відобразити особливості системи переваг ОПР і таким чином підвищити адекватність і обґрунтованість прийнятих рішень. У випадку коли лінгвістичні квантифікатори задаються відповідними функціями належності (рис.2.13), розрахунок ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$ виконується за формулою (2.60). Для спрощення розрахунку ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$ пропонується використання параметру α RIM квантифікаторів (рис. 2.14) та рівняння (2.62).

Таким чином, застосування нечіткого квантифікатора OWA забезпечує певний механізм для аналізу невизначеностей шляхом застосувань різних лінгвістичних квантифікаторів (параметра α) для широкого діапазону стратегій (сценаріїв) прийняття рішень.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

РІШЕНЬ З РОЗМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ

На основі запропонованого методу геопросторового БКАР з розміщення об'єктів розробимо інформаційну технологію (ІТ), яка включає базові інформаційні процеси, що надають можливість ОПР отримати комбіновані карти придатності територій з визначеним рангом придатності альтернатив.

Під ІТ прийнято розуміти комп'ютерні технології, а саме систему методів збирання, зберігання, захисту, обробки, передавання й використання інформації на основі застосування апаратних засобів і програмного забезпечення. Тобто, ІТ є інструментарієм, що забезпечує інформаційну діяльність, пов'язану з підготовкою та прийняттям рішень [148]. Кожну ІТ можна представити у вигляді комплексу процесів обробки інформації, що наведено на рис. 3.1 [149].

3.1 Розробка функціональної моделі процесу геопросторового БКАР

Для формального опису процесу геопросторового БКАР розробимо функціональну модель з використанням демонстраційної версії CASE-засобу All Fusion Process Modeler 7 (BPwin) [150], який підтримує методологію IDEF0 (функціональна модель), IDEF3 (Work Flow Diagram) і DFD (Data Flow Diagram). Будемо розробляти функціональну модель БКАР в контексті вирішення задачі розміщення полігону ТПВ.

Контекстна діаграма функціональної моделі ІТ, яка узагальнює всі процеси обробки інформації для геопросторового БКАР з розміщення об'єктів ТПВ, наведена на рис.3.2.

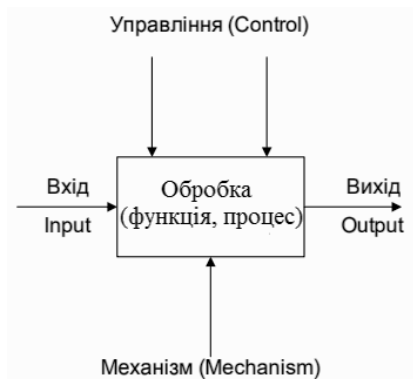


Рисунок 3.1 – Комплекс процесів обробки інформації

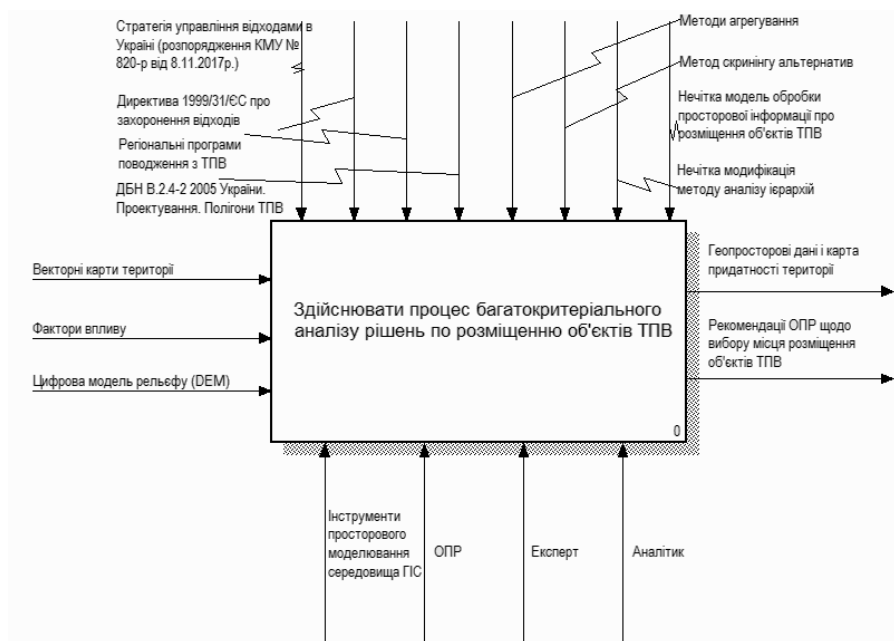


Рисунок 3.2 – Контекстна діаграма процесу геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів ТПВ

Для цього бізнес-процесу потрібні: будівельні норми проектування полігонів ТПВ [151], директива 1999/31/ЄС про захоронення відходів, розпорядження КМУ №820-р від 8.11.2017 «Стратегія управління відходами в Україні до 2030 р.», регіональні програми поводження з ТПВ, нечітка модель обробки просторової інформації про розміщення об'єктів ТПВ, нечітка модифікація методу аналізу ієрархій, метод скринінгу альтернатив, методи агрегування. На вхід контекстної діаграми поступають векторні карти території, що досліджується, цифрова модель рельєфу (DEM), перелік факторів, що впливають на рішення.

Декомпозиція функціональної моделі процесу геопросторового БКАР з розміщення ТПВ наведена на рис.А.1 і включає п'ять процесів: «Визначати критерії оцінки альтернатив», «Виконувати фазифікацію атрибутів критеріїв», «Розраховувати ваги критеріїв», «Виконувати скринінг альтернатив», «Здійснювати агрегування шарів критеріїв».

На першому етапі процесу геопросторового БКАР визначається множина критеріїв оцінки альтернатив. Кожний критерій представляється окремим шаром карти в растровій моделі даних ГІС. Потім виконується процес фазифікації кожного критерію із використанням функцій належностей, запропонованих експертами. Процес «Розраховувати ваги критеріїв» передбачає оцінку важливості (ваги) критеріїв експертами на основі їх парного порівняння з використанням нечіткої модифікації МАІ. Результатом процесу «Виконувати скринінг альтернатив» є шари критеріїв, які містять множину альтернатив α -рівня, яка визначена відповідно до методу скринінгу альтернатив за значеннями α -порогів сформованих з урахуванням переваг ОНР. Ці шари критеріїв разом зі значеннями їх ваг надходять на вхід процесу «Здійснювати агрегування шарів критеріїв», результатом якого є комбінована карта придатності території з визначеним рангом придатності альтернатив в діапазоні [0,1]. На підставі отриманої карти придатності можуть бути надані рекомендації ОНР щодо вибору місця розміщення об'єктів ТПВ.

На наступних етапах декомпозиції представлені детальні дії, пов'язані з багатокритеріальним аналізом придатності територій (рис. А.2–А.6). Врахування особливостей їх здійснення має сприяти підвищенню ефективності розроблюваної системи. Аналіз процесів обробки просторової інформації про об'єкти розміщення ТПВ дозволяє виділити види діяльності та пов'язані з ними інформаційні потоки, задіяні в процесі

пошуку місця розташування для розміщення відходів. Результатом аналізу є вибір кращого способу автоматизації зазначених видів діяльності з використанням методів, описаних у розділі 2.

Так декомпозиція процесу «Визначати критерії оцінки» (рис.А.2) передбачає етапи, пов'язані з формуванням на основі цифрової моделі рельєфу растрових шарів ухилу та експозиції території, формування на підставі будівельних норм буферних обмежувачих зон та об'єднання їх в один загальний растровий шар обмежень, який пізніше за допомогою кон'юнктивного фільтра дозволить побудувати растрові шари критеріїв.

Декомпозиція процесу «Виконувати фазифікацію атрибутів критеріїв» (рис.А.3) передбачає вибір експертами функцій належності, на основі яких далі виконується перекласифікація шарів критеріїв з метою ранжування альтернатив за ступеню придатності за даним критерієм та стандартизації атрибутів в діапазоні [0,1].

Процес «Розраховувати ваги критеріїв» (рис.А.4) виконується згідно нечіткої модифікації МАІ та передбачає формування чіткої матриці парних порівнянь критеріїв, на основі якої потім будується нечітка матриця парних порівнянь, розраховуються нечіткі ваги критеріїв, а далі шляхом дефазифікації і чіткі ваги критеріїв.

Декомпозиція процесу «Виконувати скринінг альтернатив» (рис.А.5) складається з наступних процесів: ранжування критеріїв за зменшенням їх важливості, визначення на підставі переваг ОПП множини α -порогів та виконання алгоритму скринінгу альтернатив, після чого формується множина альтернатив α -рівня.

Процес «Здійснювати агрегування шарів критеріїв» (рис.А.6) виконується за допомогою ОWA-оператору Ягера з лінгвістичними квантифікаторами. Спочатку аналітиком впорядковуються атрибути альтернатив за зменшенням їх значень, далі за отриманим набором впорядкованих атрибутів формується впорядкований набір ваг критеріїв, а далі на основі лінгвістичного квантифікатора, визначеного на підставі форми компромісу прийнятної для ОПП, розраховується ваги порядку. Надалі отримані ваги порядку застосовуються при агрегуванні шарів критеріїв, результатом якого є комбінована карта придатності території з визначеним рангом придатності альтернатив.

3.2 Розробка структури просторової системи підтримки прийняття рішень з розміщення об'єктів

Система підтримки прийняття рішень (СППР) з розміщення просторових об'єктів реалізована у вигляді ГІС-застосунку на основі платформи ArcGIS for Desktop американської компанії ESRI [152,153], який може бути опублікований в Інтернет як веб-сервіс з метою використання необмеженою кількістю настільних і мобільних клієнтів за допомогою серверного програмного забезпечення ArcGIS for Server.

Структура СППР наведена на рис.3.3. Інформація, яка необхідна для забезпечення функціонування системи, зберігається в окремих базах даних: картографічна – у спеціалізованій базі геоданих (БГД), експертна інформація, яка необхідна для обробки просторових даних методами БКАР – в базі даних (БД) під керуванням СКБД Microsoft SQL Server.

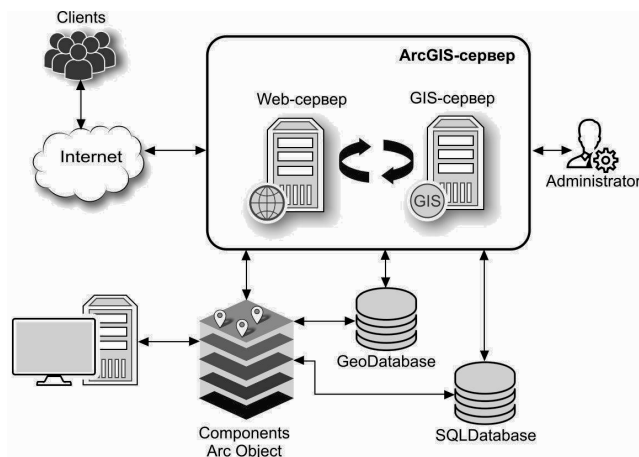


Рисунок 3.3 – Структура просторової СППР з розміщення просторових об'єктів

Бази геоданих системи складають векторні шари масштабу 1:100000. Векторні карти землекористування, водних об'єктів, населених пунктів, залізничних і автомобільних шляхів отримані шляхом імпортування бази Open Street Map [154,155]. За допомогою SQL запитів до атрибутивної

таблиці карти землекористування були отримані карти сільськогосподарських угідь, заповідників, житлової забудови, лісів і лісопосадок. Цифрова модель рельєфу (ЦМР), а також похідні від неї карти ухилу та експозиції були побудовані за даним космічних знімків ASTER з розміром комірки растру – 27 м [156]. Растрова карта глибини залягання ґрунтових вод побудована за допомогою методу просторової інтерполяції (крігінг) за даними моніторингових спостережень, проведених Причорноморським державним регіональним геологічним підприємством. Залежно від специфіки завдань можуть використовуватися додаткові спеціалізовані шари (особливо охоронювані природні території, рибпромислові ділянки та ін.).

Система підтримує набір інструментів для роботи з просторовими даними. Для цього використовуються деякі інструменти геообробки, що входять до складу ArcGIS for Desktop, і інструментів ArcGIS ArcToolbox [74, 157].

Окремі робочі процеси були спроектовані у вигляді власних інструментів за допомогою візуального конструктору ModelBuilder [157, 158] та скриптів на мові програмування Python.

Конструктор моделей Model Builder – це вбудований засіб, що дозволяє більш ефективно управляти процесами обробки даних в ArcGIS. Модель в ModelBuilder – це відображення опису робочих процесів, які з'єднані один з одним, в послідовності інструментів геообробки, подаючи вихід одного інструменту на вхід іншого інструменту. ModelBuilder можна також розглядати як візуальну мову програмування для побудови робочих потоків. Інструменти моделі повністю інтегровані в середовище геообробки, працювати з ними можна так само, як і з системними інструментами або інструментами скриптів, наприклад, додавати і запускати їх в іншій моделі.

Для надання ГІС-застосунку необхідної функціональності та бізнес-логіки було використано розширення ArcObjects SDK для .NET [158], за допомогою якого на основі мови програмування C# та технології Windows Forms розроблені додаткові модулі (надбудови), що реалізують нечіткі моделі обробки просторових даних, а також методи та алгоритми процедури БКАР з розміщення просторових об'єктів, які представлені у розділі 2. Це є необхідною умовою створення інформаційної системи, тому що платформа ArcGIS for Desktop не містить окремих спеціальних

інструментів для проведення процедури БКАР і потребує їх додаткової розробки та інтеграції до середовища ГІС. Низькорівневий код ArcObjects і інфраструктура геообробки ArcGIS for Desktop доповнюють один одного та використовуються разом для розширення функціональності системи.

3.3 Розробка нечіткої моделі реляційної бази даних

При побудові БД СППР була використана концепція нечітких реляційних баз даних [159], яка дозволяє розширити реляційну модель для подання нечітких даних. Цей підхід дозволяє за допомогою реляційних структур зберігати судження експертів, використовуючи апарат нечітких множин в якості основи для управління певними видами невизначеності в ГІС. Більш детально концепція побудови бази нечітких знань (БНЗ) за допомогою реляційної БД для зберігання нечітких атрибутів розглядається в [159,160].

Нечіткі дані представляється функціями належності, які зазвичай можуть бути визначені кількома числовими параметрами (рис. 2.6). Зберігаючи ці параметри таким чином, щоб виконувалися вимоги нормальності і цілісності, можна управляти нечіткими даними в реляційній БД. Для цього пропонується нечітка метамодель, яка управляє нечіткими даними і зв'язується з реляційними таблицями реальних об'єктів (рис. 3.4).

В таблиці `is_fuzzy` зазначено, які атрибути і в яких таблицях БД є нечіткими. Таблиця `fuzzy_link` пов'язує тип ФН з атрибутом в реляційній моделі реальних об'єктів. Таблиця `fuzzy_type` визначає тип ФН: трикутна, трапецієподібна, Z-подібна, S-подібна. В системі для фазифікації атрибутів критеріїв були використані лінійні ФН, кожна з яких представлена своїми числовими параметрами в окремій таблиці. Наприклад, таблиця `trapezoidal` має наступні атрибути (`fuzzy_id`, `a`, `b`, `c`, `d`) для управління зберіганням трапецієподібних нечітких даних. Відповідно, таблиця `triangular` – атрибути (`fuzzy_id`, `a`, `b`, `c`).

Зв'язок нечіткої метамоделі БД з базою геоданих демонструє рис. 3.5. Таблиця `survey_area` містить інформацію про тематичні растрові шари території, що досліджується, які потребують фазифікації.

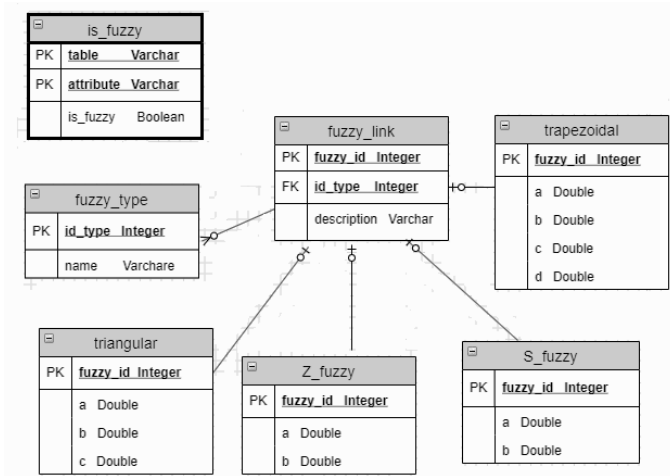


Рисунок 3.4 – Нечітка метамодель реляційної бази даних

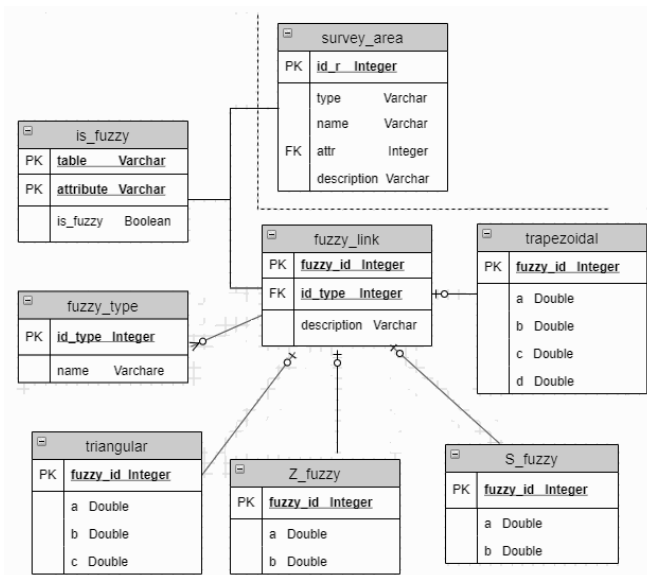


Рисунок 3.5 – Інформаційна модель зберігання нечіткої інформації в реляційній базі даних системи

За допомогою таблиць `is_fuzzy` та `fuzzy_link` кожному растру БГД ставиться у відповідність певний тип ФН. Реляційний екземпляр нечіткої реляційної бази даних показаний на рис. 3.6.

З таблиць, показаних на рис. 3.6, можна відновити всі нечіткі, а також чіткі дані. Так, наприклад, растровий шар відстаней від транспортної мережі в базі геоданих системи має ім'я `Road`, для фазифікації його атрибутів буде використовуватися трапецієподібна ФН з числовими параметрами $a=200$ м, $b=500$ м, $c=1000$ м, $d=5000$ м, тобто найбільшу ступінь придатності за даним критерієм будуть мати альтернативи, що знаходяться від залізничних і автошляхів на відстані від 500 до 1000 м. На основі наявних числових параметрів трапецієподібної ФН за формулою (2.31) можуть бути отримані відповідні нечіткі значення для всього діапазону чітких значень атрибутів критеріїв і сформована таблиця для перекласифікації растра інструментом геообробки `Reclassify` набору `ArcToolbox`.

survey_area				
id_r	type	name	attr	description
1	raster	Road	1101	Відстань від шляхів
2	raster	Cities	1102	Відстань від міст
3	raster	Residential	1103	Відстань від забудов
...

is_fuzzy			fuzzy_link	
table	attribute	is_fuzzy	fuzzy_id	id_type
survey_area	type	0	1101	trapezoidal
survey_area	name	0	1102	trapezoidal
survey_area	attr	1	1103	s
...

S_fuzzy			trapezoidal			
fuzzy_id	a	b	fuzzy_id	a	b	c
1103	500	1500	1101	200	500	1000
...	1102	1000	10000	20000
...

Рисунок 3.6 – Фрагмент записів бази даних, що кодують нечітку інформацію

Запропонований реляційний підхід до організації нечіткої бази даних дозволяє використовувати її в складі організованої структури зберігання

даних про об'єкти розміщення, а також забезпечити взаємодію бази просторових і атрибутивних даних і нечіткої бази даних на основі використання прийнятих в системі запитів, що істотно полегшує реалізацію системи і гарантує цілісність і несуперечливість всіх накопичених відомостей про об'єкти розміщення.

3.4 Розробка інструментів геообробки просторової інформації

Для обробки просторової інформації були використані системні інструменти геообробки, що входять до складу ArcGIS ArcToolbox. Окремі робочі процеси були спроектовані у вигляді власних інструментів за допомогою візуального конструктору ModelBuilder та скриптів на мові програмування Python, які в подальшому використовувалися у програмному коді модуля ГІС-застосунку.

Візуальний конструктор ModelBuilder дозволяє створювати робочі процеси (моделі), що реалізують виконання послідовності інструментів, завдяки чому можна більш ефективно управляти логікою виконання процесу та його параметрами. Конструктором ModelBuilder підтримуються:

- ітерації або циклічна організація процесу;
- списки з декількома значеннями;
- зворотний зв'язок, коли в якості вхідних даних використовуються вихідні дані;
- попередні умови для управління послідовністю операцій в моделі та логіка якщо-інакше (if-then-else).

Інструменти моделі повністю інтегровані в середовище геообробки. В модель можна інтегрувати скрипти Python і зовнішні програми.

Мова Python є незалежною, міжплатформною, відкритою мовою програмування, яка широко використовується для написання скриптів, що містять процеси геообробки [161]. Бібліотека ArcPy забезпечує доступ до всіх інструментів геообробки, включаючи додаткові модулі, а також пропонує функції і класи для роботи з просторовими даними. До складу бібліотеки ArcPy входять: модуль доступу до даних (arcpy.da), модуль картографії (arcpy.mapping), додатковий модуль ArcGIS Spatial Analyst (arcpy.sa) і додатковий модуль ArcGIS Network Analyst (arcpy.na).

Мовою Python можуть бути створені різні види файлів та інструментів:

- автономний скрипт – це виконуваний файл з розширенням .py, який можна запустити з командного рядка;

- інструмент-скрипт – це скрипт Python, доданий в набір інструментів геообробки. Його можна викликати у ModelBuilder, а також з інших скриптів та інструментів-скриптів.

- надбудова Python (add-in) – набір інструментів на панелі інструментів, призначений для забезпечення додаткових функціональних можливостей робочих процесів;

- набори інструментів Python – набори інструментів геообробки Python (.pyt), які визначені певним чином у файлах ASCII.

В роботі були створені окремі робочі процеси геообробки для попередньої підготовки просторової інформації та створення бази геоданих системи, перш за все це модель побудови обмежувального растру та модель побудови растрів евклідових відстаней для критеріїв. Розглянемо їх разом з процедурою визначення критеріїв оцінки докладніше.

На першому етапі пошуку місця розміщення для об'єктів ТПВ слід визначити в межах якої території буде проводитися оцінка поточного стану об'єктів, які безпосередньо або побічно впливають на рішення поставленої задачі. Перелік інформації, що використовується в цьому випадку, включає просторову і атрибутивну характеристики представлених на карті об'єктів та думки експертів, виражені у вигляді критеріїв вибору розташування об'єктів.

Аналітиком підготовлюються відповідні растрові і векторні карти території, що досліджується. Наприклад, цифрова модель рельєфу, векторні карти землекористування, водних об'єктів, населених пунктів, залізничних і автомобільних шляхів тощо.

Оскільки для виконання завдання потрібен аналіз всієї множини точок, що утворюють безперервну поверхню (досліджувану територію), то необхідно встановити цю множину за допомогою перетворення вихідного векторного представлення об'єктів на растрове – регулярну обмежену сітку, з кожною коміркою якої асоційоване своє місце розташування і значення певної властивості в даному місці. Тобто подальший процес вирішення завдання полягає в створенні БГД, що складається з набору n

растрових шарів карти, кожна i -та комірка якої є альтернатива і містить набір атрибутів a_{ij} . Атрибут використовується для виміру ефективності по відношенню до цілі, яка в даному випадку може формулюватися як «мінімізувати шкідливий вплив об'єкту ТПВ на навколишнє середовище».

Зв'язок між цілями та атрибутами має ієрархічну структуру. На найвищому рівні знаходяться найбільш загальні цілі. Вони можуть бути визначені з точки зору більш конкретних цілей, які самі можуть бути додатково визначені на ще більш низьких рівнях. Такими цілями можуть бути, наприклад, «мінімізувати витрати на обслуговування об'єкту ТПВ», «підвищити екологічну безпеку об'єкту ТПВ», «мінімізувати вплив об'єкту ТПВ на еколого-економічні умови проживання та здоров'я населення» тощо. Таким чином, ієрархічна структура цілей і пов'язаних з ними атрибутів дає рекомендації щодо визначення набору карт атрибутів, які повинні бути включені в конкретний аналіз рішень.

Крім того, атрибути повинні володіти деякими властивостями, щоб адекватно представляти проблему просторового рішення в базі даних ГС. По-перше, кожен атрибут повинен бути вичерпним і вимірюваним. По-друге, набір атрибутів повинен бути повним (тобто охоплювати всі відповідні аспекти проблеми рішення і адекватно вказувати ступінь досягнення цілі). Небажаною властивістю набору критеріїв є висока кореляція між атрибутами. Атрибути повинні бути ненадлишковими і їх кількість має бути якомога меншою. На жаль перелічені вимоги важко забезпечити на практиці. Дані, що потрібні для аналізу, можуть бути недоступні, а деякі пари атрибутів можуть корелювати. Але у будь-якому випадку слід дотримуватися зазначених вимог до атрибутів, і якщо атрибути сильно надлишкові, то вони повинні бути виключені з аналізу.

Особливості задачі розміщення об'єктів ТПВ є наявність певних вимог, які виражаються в обмеженнях відстані. Це потребує, по-перше, створення для окремих критеріїв растрових шарів евклідових відстаней згідно (2.21)–(2.22), а по-друге, врахування обмежень при визначенні набору можливих альтернатив. Друге забезпечується створенням так званого обмежувального растрового шару, у якого неприпустимі альтернативи мають значення 0, а припустимі – значення 1. Використовуючи шар обмежень в якості кон'юнктивного фільтра можна визначити множину можливих альтернатив.

На рис. 3.7 представлена модель побудови растрів евклідових відстаней, яка була розроблена в ModelBuilder. Список Input, що складається з класів просторових об'єктів, є параметром моделі і заповнюється аналітиком при запуску моделі (рис.3.8), подається на вхід інструменту Euclidean Distance бібліотеки Spatial Analyst Tools.

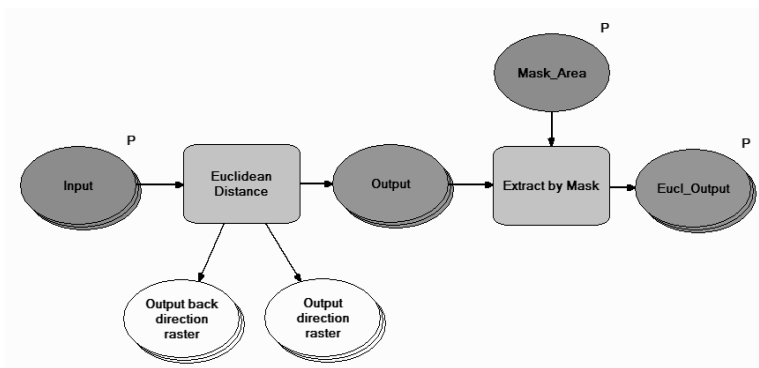


Рисунок 3.7 – Модель побудови растрів евклідових відстаней

В результаті виконання інструменту створюються растри евклідових відстаней, які обрізаються по межі території за допомогою інструменту Extract by Mask. Отримані в результаті роботи моделі растри зберігаються у БГД за шляхом вказаним у списку Eucl_Output.

	Mask_Area	Input	Eucl_Output
1	D:\model\ModelIGDB.gdb\Area	D:\model\ModelIGDB.gdb\Limits\Road	D:\model\ModelIGDB.gdb\Euc_Road
2		D:\model\ModelIGDB.gdb\Limits\Cities	D:\model\ModelIGDB.gdb\Euc_Cities
3		D:\model\ModelIGDB.gdb\Limits\Residenti	D:\model\ModelIGDB.gdb\Euc_Residential

Рисунок 3.8 – Вхідні дані моделі побудови растрів евклідових відстаней

Модель побудови обмежувального растра представлена на рис. 3.9.

Спочатку в моделі для вхідних класів просторових об'єктів, список яких міститься у змінній Input, за допомогою інструменту Buffer будуються обмежувальні буферні зони, радіус яких задається при запуску моделі в параметрі Distance. Далі отримані полігональні класи об'єктів збираються в одно значення та за допомогою інструменту Merge

зливаються в один новий вихідний набір даних. Перетворення полігонального класу об'єктів в растр здійснюється інструментом Polygon to Raster. Растр обрізується за маскою (кордоном модельної території), яка представлена класом просторових об'єктів в параметрі Area.

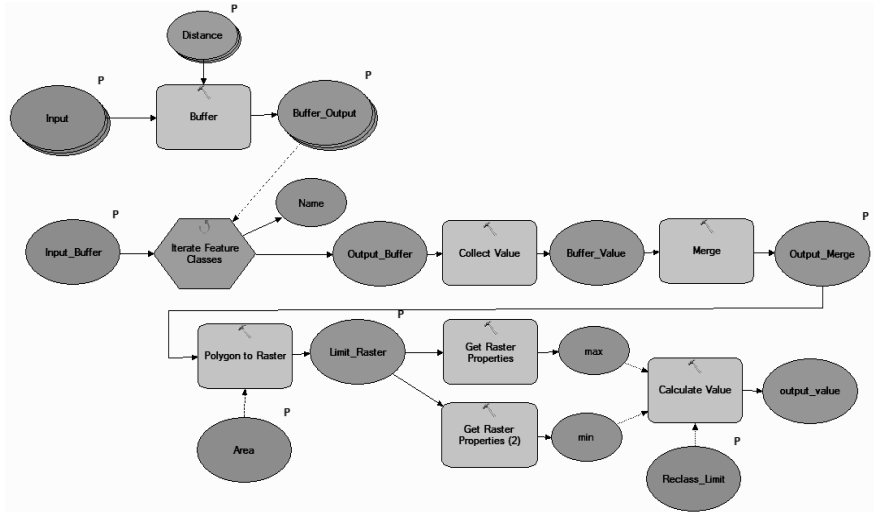


Рисунок 3.9 – Модель побудови обмежувального растру

Наступним кроком є перекласифікація растру в два класи таким чином, щоб альтернативи, що мають будь-яке значення дорівнювали NoData, а альтернативи зі значенням NoData – 1. Перекласифікація здійснюється з використанням функції Python (рис.3.10). За допомогою інструментів Get Raster Properties, були отримані мінімальні (min) та максимальні (max) значення з вхідного растру Limit_Raster, які надалі були використані для зазначення діапазону перекласифікації від min до max у функції apply_limit(). Новий растр Reclass_Limit зберігається у БГД.

За цією же схемою були побудовані і деякі інші робочі процеси та інструменти геообробки просторової інформації, які потім були інтегровані у програмний код ГІС-застосунку. Їх опис та алгоритми роботи наведені у наступному розділі.

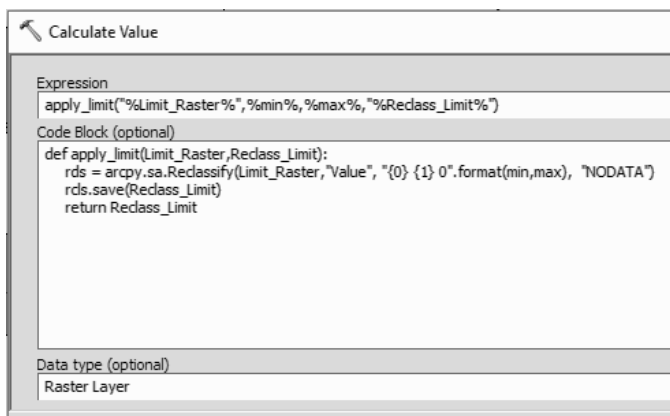


Рисунок 3.10 – Функція перекласифікації растру

3.5 Розробка алгоритмів геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об’єктів

Для опису життєвого циклу програмного забезпечення з переходами з одного стану в інший та типової послідовності дій користувачів в системі UML-нотації використовуються діаграми діяльності (Activity Diagrams) [162–164]. На рис. 3.11 наведена діаграма діяльності процесу фазифікації атрибутів критеріїв.

Після виконання етапу визначення критеріїв оцінки за допомогою моделей, наведених на рис.3.7 і 3.9, був сформований набір n растрів для досліджуваної території, який в подальшому використовується для розрахунку набору растрів приналежності до нечітких множин, тобто для етапу фазифікації. Розглянемо його більш докладно.

Для формування растра приналежності необхідною умовою є вибір типу ФН та її параметрів з нечіткої БД системи. На підставі обраної ФН далі розраховується таблиця перекласифікації растру. Діаграма діяльності процесу розрахунку таблиці перекласифікації наведена на рис.3.12.

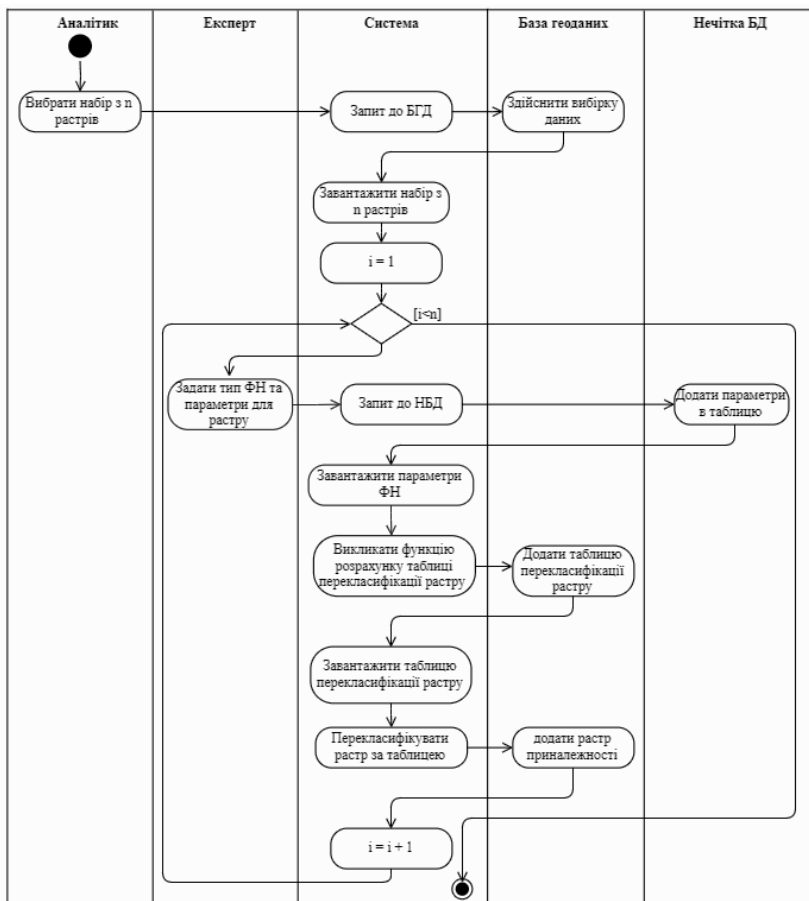


Рисунок 3.11 – Діаграма діяльності процесу формування растрів приналежності

Для виконання функції необхідно ввести кількість класів растру K , обрану функцію належності $F()$, значення якої розраховується за однією з формул (2.30) – (2.39) залежно від її типу, та растр, для якого треба побудувати таблицю перекласифікації. За допомогою інструменту Get Raster Properties визначаються мінімальні (min) та максимальні (max) значення всього діапазону значень вхідного растру. За цими параметрами

розраховується крок h , за яким далі визначаються масиви значень для таблиці перекласифікації: $from[]$, $to[]$, $out[]$.

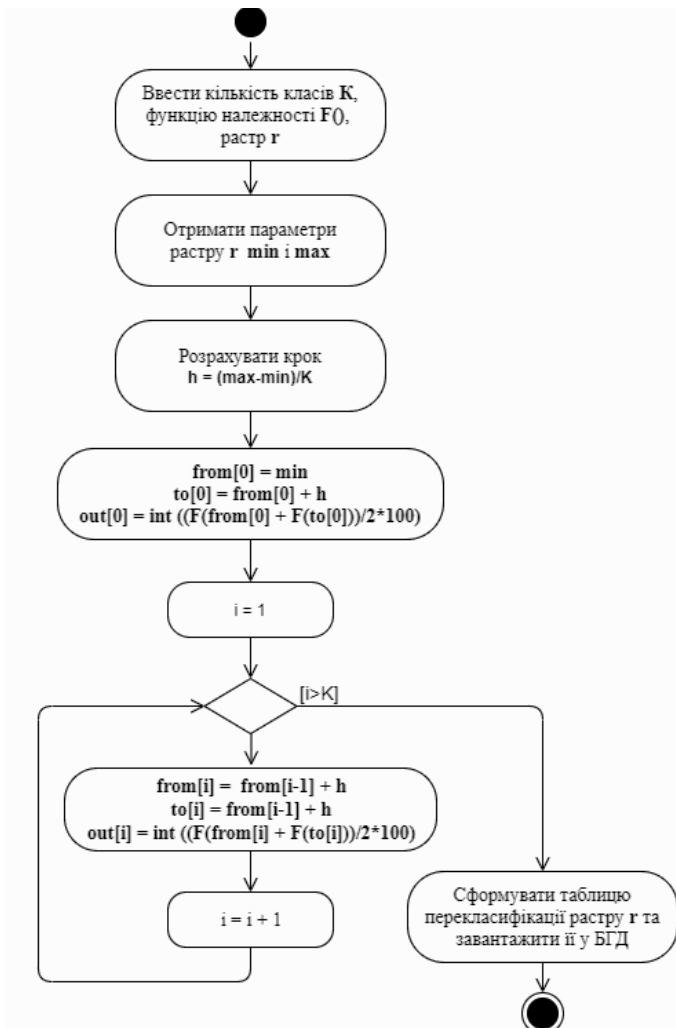


Рисунок 3.12 – Діаграма діяльності процесу розрахунку таблиці перекласифікації растра

Для перекласифікації растру застосовується інструмент Reclass by Table, який використовує таблицю, що складається з трьох полів: початкове (From) та кінцеве (To) значення кожного діапазону, а також нове значення (Output), яке має бути присвоєно діапазону. Таблиця перекласифікації може бути таблицею бази геоданих, текстовим файлом, таблицею INFO або файлом dbase. Значення в полях From і To можуть бути представлені будь-яким числовим полем. Значення в полі Output повинні бути цілочисельними. Для формування остаточного набору растрів приналежності, спочатку було виконано перекласифікацію растрів в інтервалі [0,100], а далі з використанням інструменту Map Algebra усі значення комірок отриманого растру були поділені на 100, таким чином був отриманий діапазон [0,1]. Значення в полі Output розраховується як середнє арифметичне значень ФН для граничних значень відповідного діапазону.

На рис. 3.13 наведена діаграма діяльності процесу розрахунку ваг відносної важливості критеріїв з використанням модифікації MAI. Для заданого набору критеріїв експерт заповнює чітку матрицю парних порівнянь за допомогою фундаментальної шкали Сааті, на основі якої розраховується вектор локальних пріоритетів, а далі обчислюється рівень узгодженості оцінок.

У разі незадовільного рівня узгодженості оцінок ($C.R. \geq 0.10$) проводиться корекція чіткої матриці парних порівнянь, в протилежному випадку експерт трансформує чітку матрицю парних порівнянь у нечітку матрицю за допомогою шкали з трикутними нечіткими числами, а далі розраховуються нечіткі ваги критеріїв та виконується їх дефазифікація.

На рис. 3.14 наведена діаграма процесу скринінга альтернатив. Для заданого набору критеріїв задається строгий порядок важливості і вони нумеруються у порядку спадання. Далі ОПР задає бажаний поріг рівня α_i і система буде множиною за формулою (2.54). Якщо множина є порожньою, то ОПР, має змінити поріг рівня α_i або повернутися на один крок вище і змінити поріг рівня $\alpha_i - 1$. Даний крок повторюється ($i \leq n$) до тих пір, поки множина не буде містити тільки допустиму кількість альтернатив, за якою і будуватиметься відповідний растр, у якого атрибути неприпустимих альтернатив мають значення NoData. Далі використовуючи отриманий растр як маску за допомогою інструменту Map Algebra можна сформувати

набір n растрів приналежності, які містять атрибути тільки допустимих альтернатив.

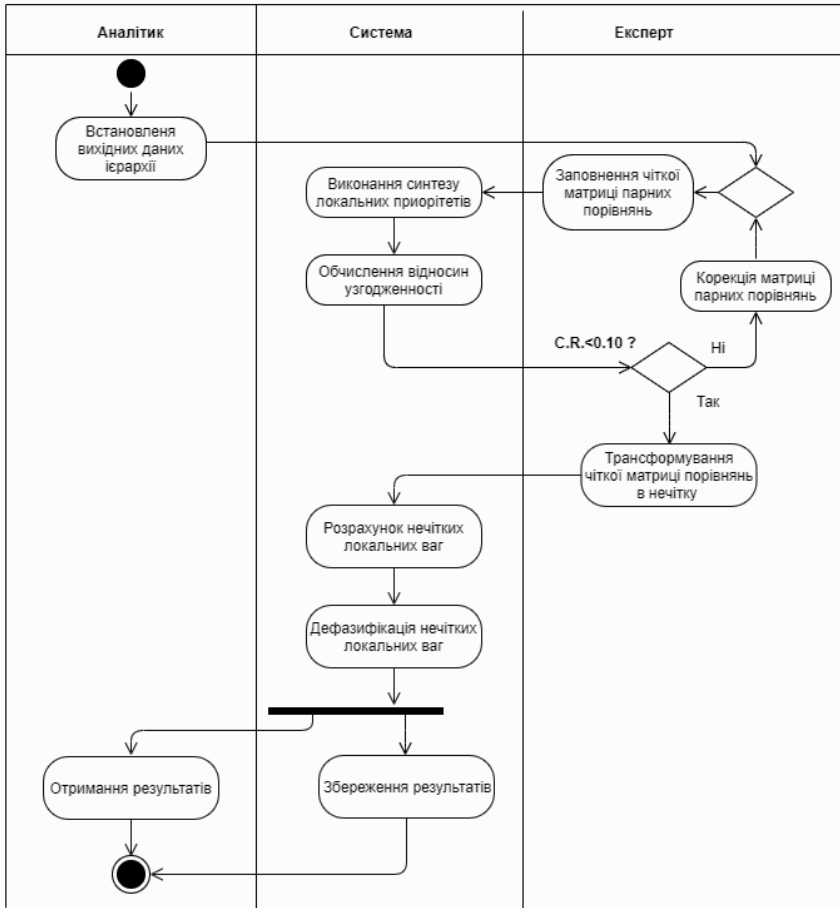


Рисунок 3.13 – Діаграма діяльності процесу розрахунку ваг критеріїв за допомогою модифікованого методу аналізу ієрархій

На рис. 3.15 наведена діаграма процесу агрегування оцінок альтернатив в єдиний показник за допомогою оператора OWA.

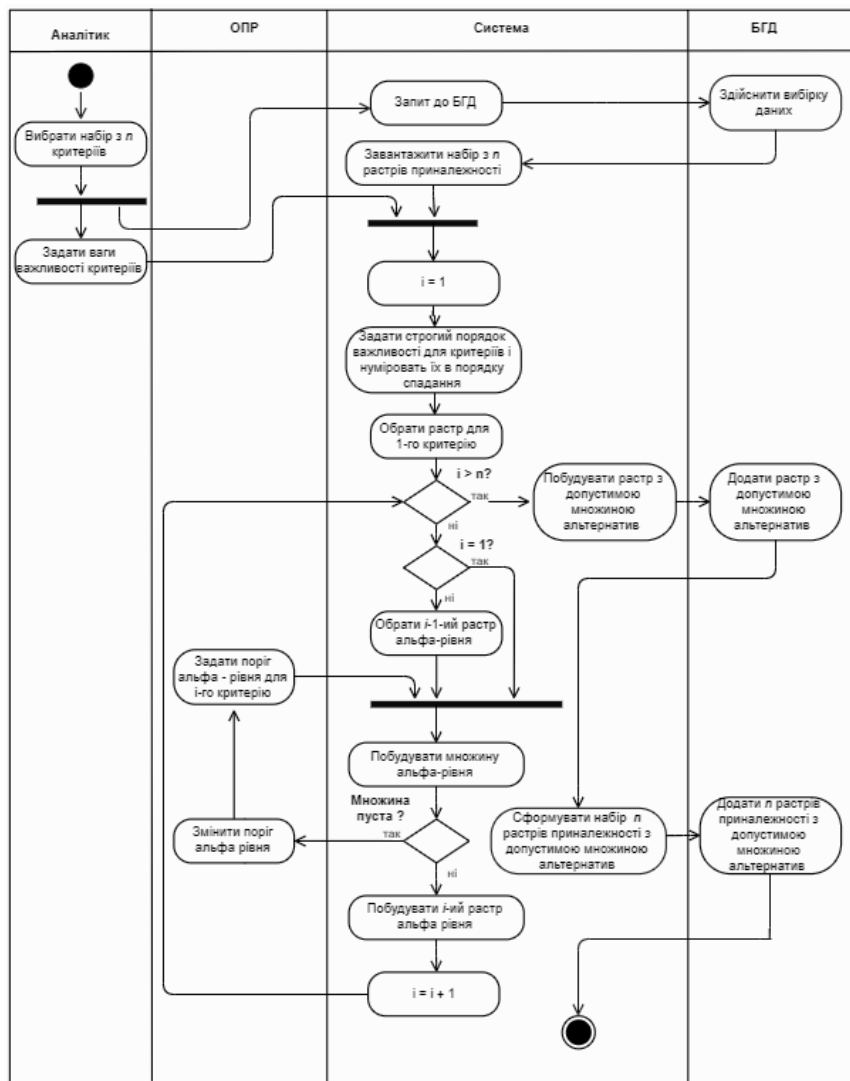


Рисунок 3.14 – Діаграма діяльності процесу скринінгу альтернатив

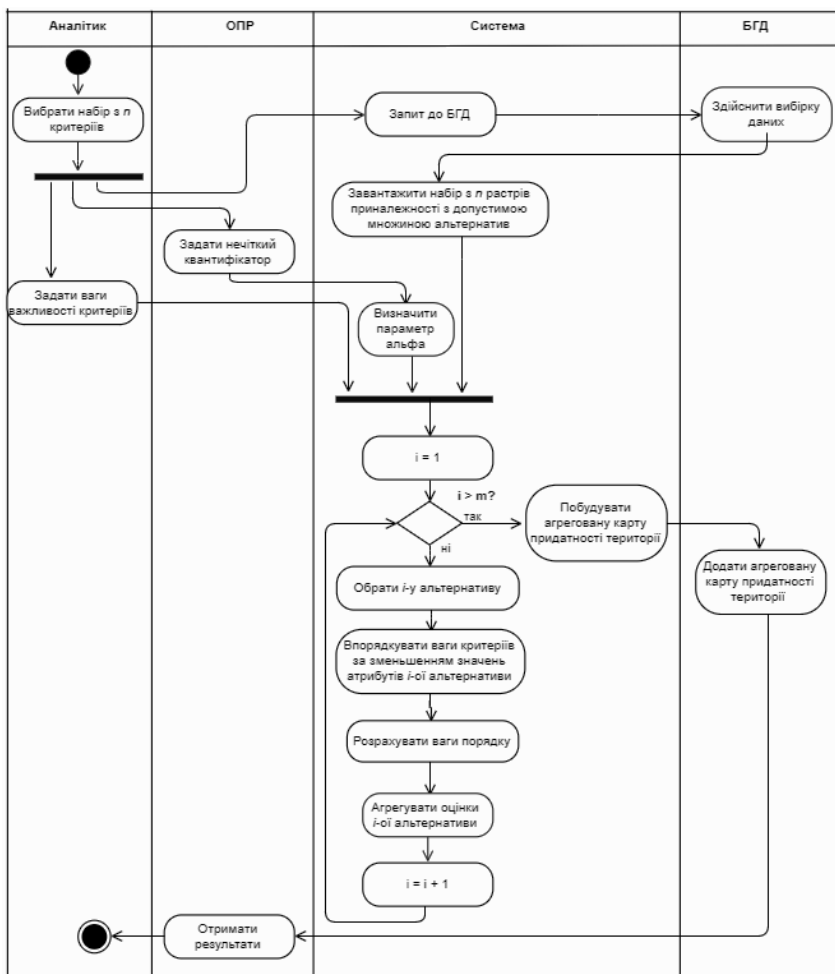


Рисунок 3.15 – Діаграма діяльності процесу агрегування оцінок альтернатив оператором OWA

На початку процесу аналітик завантажує растрові шари критеріїв та відповідні їм ваги важливості, що були розраховані за допомогою модифікації MAI. ОПР задає нечіткий квантифікатор, який визначає форму компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями, якому ставиться у відповідність певний числовий параметр α сімейства RIM

квантифікаторів (рис.2.14). Далі для кожної i -ої альтернативи впорядковуються ваги важливості критеріїв за зменшенням значень атрибутів цієї альтернативи. Після чого за рівнянням (2.62) для i -ої альтернативи розраховуються ваги порядку, а за рівнянням (2.59) – загальна оцінка i -ої альтернативи. Після агрегування оцінок для всієї множини допустимих альтернатив, буде отримана агрегована карта придатності території.

Таким чином, на основі описаних у другому розділі методів та алгоритмів обробки просторової і атрибутивної інформації, стає можливим створення програмного забезпечення для інформаційної підтримки прийняття рішення для задачі розміщення просторових об'єктів.

РОЗДІЛ 4
РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДА
ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ
РІШЕНЬ З РОЗМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ
ВІДХОДІВ (НА ПРИКЛАДІ ПІВДНЯ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

4.1 Аналіз стану в сфері поводження з відходами на державному та регіональному рівнях

Сфера поводження з твердими побутовими відходами в Україні перебуває не в найкращому стані і потребує проведення негайних заходів на державному і регіональному рівнях для вирішення низки проблем, пов'язаних з істотним збільшенням кількості ТПВ та несанкціонованих звалищ, і як цього погіршенням стану екологічної, економічної та соціальної безпеки на відповідних територіях. Динаміка утворення побутових та подібних відходів за роками (з 2014 року – без врахування даних АР Крим та м. Севастополь), яка наведена на рис. 4.1, демонструє, що не зважаючи на постійне скорочення чисельності населення обсяги утворення відходів залишаються доволі високими.

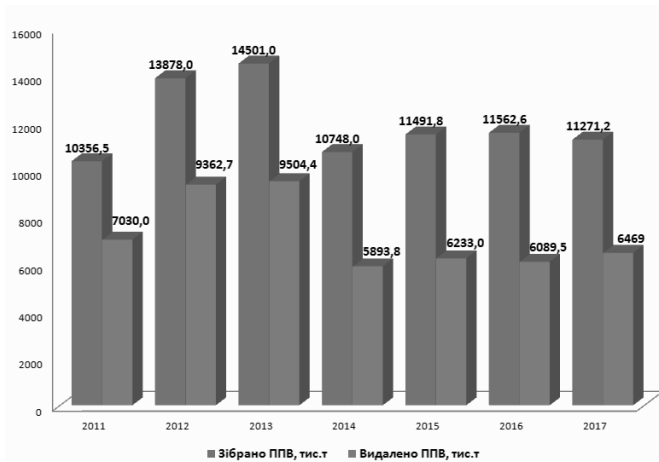


Рисунок 4.1 – Динаміка утворення побутових відходів за роками
[165]

Побутові та подібні відходи (ППВ) – це відходи, що утворюються в процесі життя і діяльності людини в житлових та нежитлових будинках і не використовуються за місцем їх накопичення [165]. Основним способом поводження з побутовими відходами в Україні є вивезення та захоронення на полігонах та сміттєзвалищах, яких станом на 2016 рік налічувалось 5470 одиниць загальною площею понад 9 тис.га, серед яких 99% не відповідають європейським вимогам. Завдяки впровадженню роздільного збирання обсяг переробки ТПВ в Україні сягає 3% та спалювання – 3%, все інше (94%) захоронюється. За офіційними даними в Україні щорічно утворюється понад 27 тис. несанкціонованих сміттєзвалищ [165].

Поки ще не виконується основне завдання в сфері поводження з ТПВ, а саме повне перероблення та утилізація відходів, і як наслідок відсутність прямого захоронення ТПВ. З урахуванням економічного становища в Україні найближчі роки це питання навряд чи зможе бути вирішено позитивно, тому що потребує великих капітальних інвестицій в цю сферу. Таким чином, можемо констатувати, що сучасна практика поводження з ТПВ орієнтована на вивезення та захоронення відходів на полігонах та сміттєзвалищах, частина з яких є стихійними, а більшість не відповідають вимогам екологічної безпеки.

У 2017 році Кабінетом Міністрів України (розпорядження КМУ № 820-р від 8.11.2017р.) була схвалена єдина комплексна національна Стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, яка пропонує концепцію поводження з ТПВ та забезпечує комплекс короткострокових і середньострокових конкретних заходів з метою її реалізації. Визначені у Стратегії заходи враховують кращий досвід країн-членів Європейського Союзу (ЄС) та відповідають положенням Угоди про асоціацію Україна-ЄС [166].

Серед основних цілей Стратегії можна виділити поступовий перехід від захоронення ТПВ до сортування і повторного використання, перероблення або утилізації з захороненням залишків відходів на «регіональних» полігонах. Передбачається також скорочення поточної кількості полігонів ТПВ та забезпечення розташування нових об'єктів на основі визначених «зон охоплення», тобто кластерного підходу, що відповідатимуть вимогам Директиви 1999/31/ЄС про захоронення відходів [168].

Питання доцільності впровадження кластерної моделі поводження з ТПВ обговорюються вітчизняними вченими (Т. Сафранов, О. Губанова, В. Приходько, Т.Шаніна, Т. Козаченко). Відзначається, що реалізація кластерної стратегії буде сприяти поліпшенню якості навколишнього середовища в результаті зменшення обсягів накопичення муніципальних відходів. Крім того, за рахунок акумулювання ресурсів в кластерному утворенні, підвищення ефективності організації збору та переробки відходів, диверсифікації виробництв, що входять в кластер, створення геоінформаційної системи (ГІС) обліку, аналізу і моніторингу ТПВ, крім екологічного, забезпечить також отримання синергетичного ефекту економічного і соціального характеру [167].

Розробники Стратегії враховують, що в сучасних умовах в Україні, з інвестиційної точки зору набагато простіше збудувати полігон для захоронення ТПВ, ніж сміттєпереробний або сміттєспалюючий завод.

В зв'язку з цим актуальним є вибір і обґрунтування місця розташування «регіональних» полігонів згідно з будівельними та санітарно-екологічними нормами. В той же час необхідно звести до мінімуму економічні та соціальні витрати. Для цього існує необхідність у створенні інформаційної моделі підтримки прийняття рішень, яка буде максимально використовувати наявну просторову інформацію і забезпечувати прийнятність результатів аналізу більшості зацікавлених сторін. Організація інформаційної підтримки повинна враховувати як правові і економічні аспекти, так і екологічні, тобто інформацію про стан всіх компонентів природи в районі зберігання відходів. Наповнення та ведення актуальних баз даних, які зберігають інформацію про обсяги та склад відходів, об'єкти їх розміщення і пункти переробки, стан навколишнього середовища та проведення на основі отриманої інформації відповідного аналізу, дає можливість виробляти адекватні рекомендації для державних виконавчих органів. Схема організації інформаційної підтримки прийняття рішень у сфері поводження ТПВ представлена на рис.4.2.

Розглядаючи сферу поводження з ТПВ в Одеській області можна констатувати, що область має ту ж саму сукупність перелічених вище проблем, що відображається у даних Держстат України та у відповідному звіті [168,169].

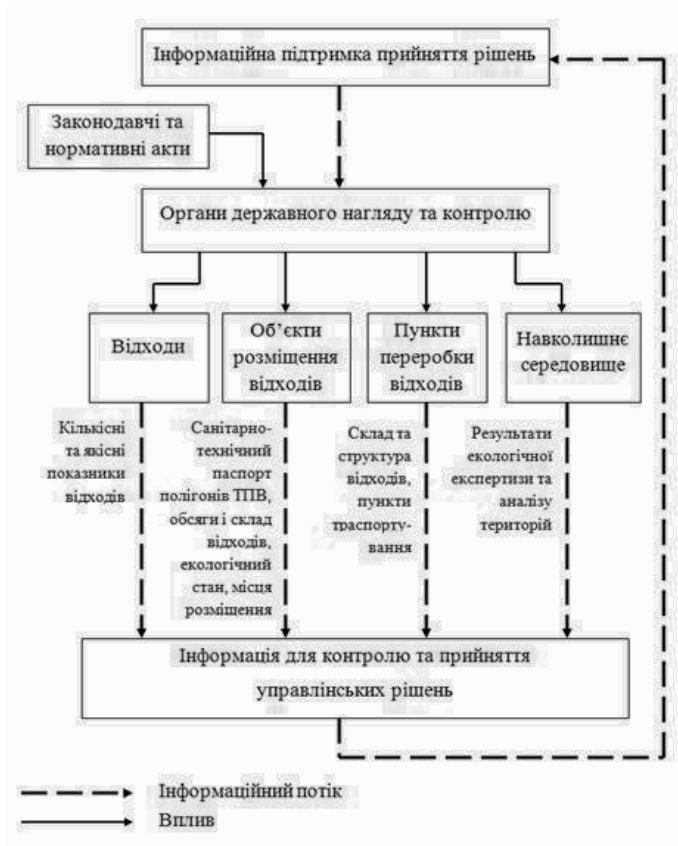


Рисунок 4.2 – Організація інформаційної підтримки прийняття рішень у сфері поводження з ТПВ

В Одеській області щорічно виробляється понад 850000 т ТПВ, з яких тільки 70% захоронюються централізовано, інші – вивозяться на стихійні звалища. Зараз в області існує близько 608 звалищ, з яких 20% потребують паспортизації, 25% полігонів і сміттєзвалищ підлягають рекультивації.

Карта розташування існуючих полігонів і звалищ ТПВ в Одеській області представлена на рис.4.3 [169]. На карті зеленими мітками показані полігони/сміттєзвалища, які мають у наявності санітарно-технічний паспорт, помаранчевим – об'єкти, що паспорти не мають.

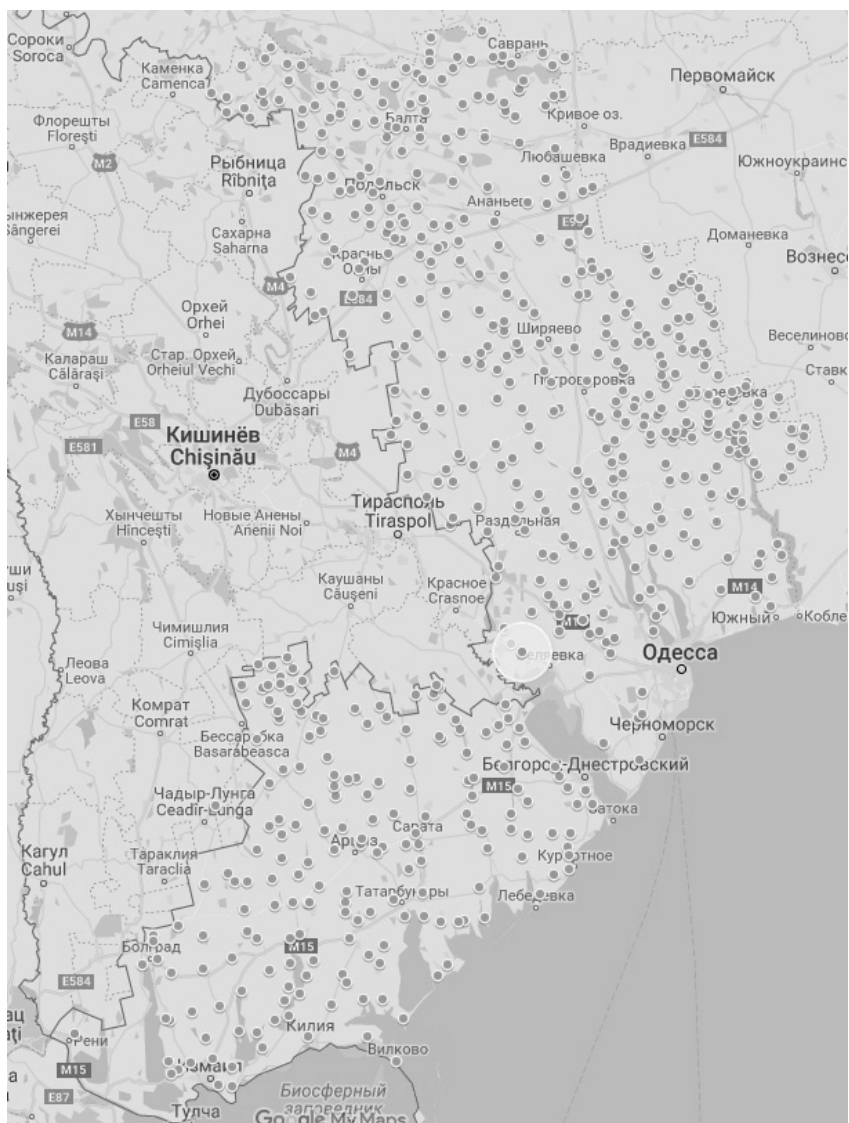


Рисунок 4.3 – Карта Одеської області з нанесеними місцями полігонів і звалищ

На сьогодні в області немає сміттепереробних заводів, на системному рівні не налагоджено роздільний збір ТПВ. На інституційному рівні інфраструктура управління і контролю поводження з ТПВ реалізована не в повній мірі, мають місце роз'єднаність політик територій і населених пунктів у вирішенні даної проблеми. Система управління, контролю і моніторингу поводження з ТПВ в Одеській області представлена на рис.4.4.



Рисунок 4.4 – Система управління, контролю і моніторингу поводження з ТПВ в Одеській області

За ініціативою Одеської обласної державної адміністрації підготовлена Програма поводження з ТПВ в Одеській області на період 2018–2022 рр., яка

передбачає зонування області на 5 кластерів поводження з ТПВ, розробку техніко-економічних обґрунтувань (ТЕО) будівництва біогазових утилізаційних заводів (всього 4 ТЕО), відведення земельних ділянок для будівництва регіональних комплексів поводження з ТПВ (всього 4 комплекси) [170].

Карта Одеської області з умовним розподілом на кластери поводження з ТПВ представлена на рис.4.5.

В кожному кластері передбачається створення комплексної регіональної системи поводження з ТПВ, що включає будівництво сучасного регіонального полігону з подальшим будівництвом поряд розташованого комплексу переробки і утилізації ТПВ, який включає в себе сортувально-переробну лінію, біогазовий завод для утилізації відходів і виробництва електричної і теплової енергії.

При зонуванні території обов'язковою умовою є територіальна близькість районів, оптимальні транспортні зв'язки між ними і достатні об'єми утворення ТПВ. Вибір ділянок повинен здійснюватися на підставі геологічних і гідрогеологічних даних, з урахуванням державних будівельних норм ДБН В.2.4-2 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування». Вважається, що один полігон з потужністю 100 тис. т/рік з терміном експлуатації 30 років матиме загальну площу 30 га.

Державний облік відходів є єдиною державною системою збирання, узагальнення, всебічного аналізу та зберігання відомостей про відходи під час їх утворення та здійснення операцій поводження з ними.

Основними джерелами інформації про об'єкти утворення, перероблення та розміщення відходів є:

- технічний паспорт відходів, який містить відомості про кожний конкретний вид відходів, їх походження, технічні, фізико-хімічні, технологічні, екологічні, санітарні, економічні та інші показники, методи їх збирання, перевезення, зберігання, оброблення, утилізації, видалення, знешкодження і захоронення. Форма паспорту та порядок його заповнення визначений ДСТУ 2195-99 [171];

- паспорт місць видалення відходів, у якому зазначені природно-геологічні, техніко-технологічні та інші характеристики об'єктів видалення відходів;

– інші відомості про технології переробки та переміщення відходів, розташування об'єктів переробки, відомості про системи спостережень (моніторингу) навколишнього середовища та ін.

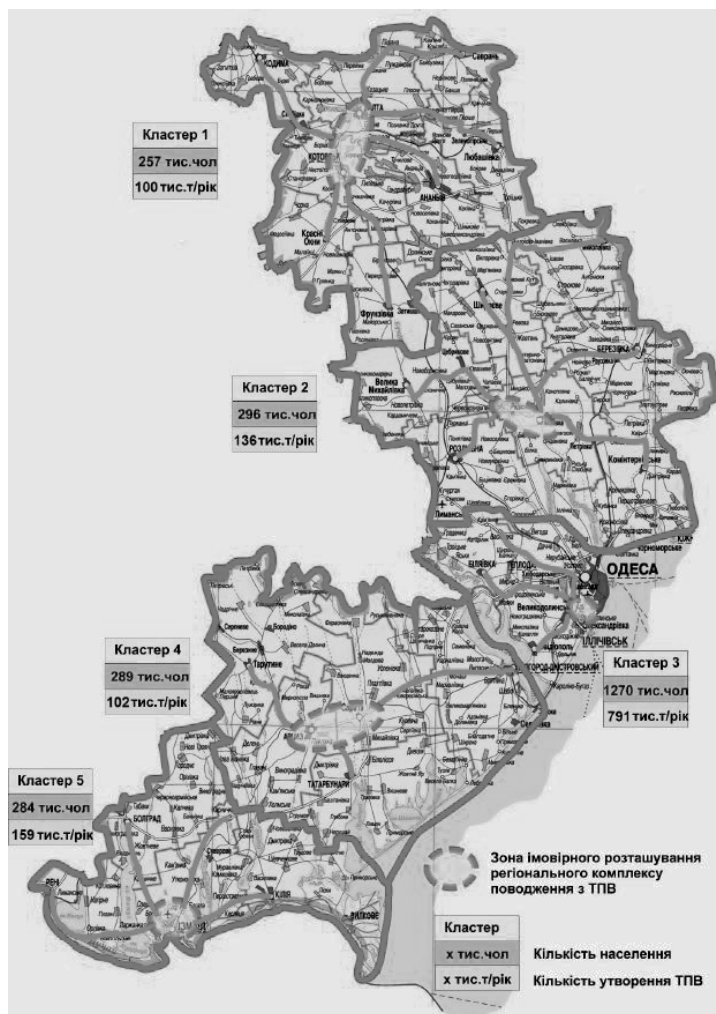


Рисунок 4.5 – Умовний розподіл Одеської області на кластери поводження з твердими побутовими відходами

Схема взаємодії об'єктів утворення, перероблення та розміщення відходів наведена на рис. 4.6. Безумовно в схемі повинні бути враховані об'єкти навколишнього середовища, на які робиться негативний вплив у процесі управління твердими побутовими відходами.

Інформаційний масив, що описує процес управління твердими побутовими відходами, можна представити наступним чином:

$$I = \{O_y, O_n, O_p, O_n\}, \quad (4.1)$$

де O_y – інформація про об'єкти утворення відходів, O_n – інформація про об'єкти переробки відходів, O_p – інформація про об'єкти розміщення відходів, O_n – інформація про об'єкти навколишнього середовища (водні об'єкти, житлові зони, природні території, що охороняються та ін.).



Рисунок 4.6 – Схема взаємодії об'єктів утворення, перероблення та розміщення ТПВ

Важливою складовою інформаційного масиву (4.1) є відомості про місцезнаходження об'єктів утворення, перероблення та розміщення ТПВ, тобто просторова інформація. Це підтверджує доцільність використання геоінформаційних технологій та подання цієї інформації в моделях даних, прийнятих в ГІС.

4.2 Використання просторової СППР з розміщення об'єктів

Для тестування запропонованої СППР та вирішення проблеми розміщення полігону ТПВ на півдні Одеської області проведено багатокритеріальний аналіз рішень для кластера, розташованого на території Кілійського, Болградського, Ізмайльського і Ренійського районів (рис.4.7). Загальна площа території, що досліджується – 4778 км² [7].

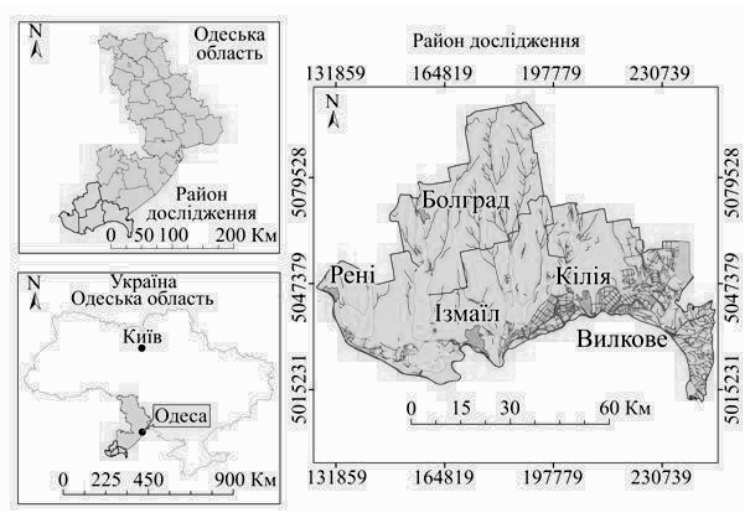


Рисунок 4.7 – Карта району дослідження

Результати виконання окремих етапів методу геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів ТПВ, реалізованого в СППР, та опис побудованих комплексних карт придатності території для різних стратегій прийняття рішень наведені далі в розділі 4.

4.2.1 Визначення критеріїв оцінки та побудова ієрархічної структури прийняття рішень

На першому етапі вирішення завдання необхідно створити методично обґрунтовану ієрархічну структуру прийняття рішень для багатокритеріальної задачі розміщення полігону ТПВ.

Процес вибору раціональних місць розміщення полігонів ТПВ потребує врахування складного набору економічних, технічних, соціальних, екологічних, політичних факторів, які можуть мати суперечливий характер. В рамках обговорення цього питання треба згадати роботи вчених Одеського державного екологічного університету Сафранова Т.А., Губанової О.Р., Шаніної Т.П. [172–174], які безпосередньо присвячені дослідженню факторів розміщення полігонів ТПВ. В рамках запропонованого рішення обмежимося лише розглядом еколого-економічних факторів.

Проектування полігонів здійснюється відповідно до державних будівельних норм [151]. Вважається, що один полігон з потужністю 100 тис. т/рік повинен мати загальну площу 30 га. Основні вимоги, до будівництва полігонів ТПВ наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вимоги до будівництва полігонів ТПВ згідно ДБН В.2.4-2

№	Фактори	Порогові значення
1	Відстань від аеропортів та аеродромів	15 км
2	Відстань від межі курортного міста, відкритих водоймищ господарського призначення, об'єктів які використовуються у культурно-оздоровчих цілях, заповідників, місць відпочинку перелітних птахів, морського узбережжя	3000 м
3	Відстань від межі міст	1000 м
4	Відстань від житлової та громадської забудови (санітарно-захисна зона)	500 м
5	Відстань від сільськогосподарських угідь, автомобільних та залізничних шляхів загальної мережі	200 м
6	Відстань від межі лісу і лісопосадок, не призначених для використання в рекреаційних цілях	50 м
7	Глибина залягання ґрунтових вод	не менше 2 м

Слід зазначити, що перераховані у табл.4.1 вимоги вказують на

мінімально допустиму відстань від місця розташування полігону ТПВ. Фактично, ділянки територій, на яких може бути забезпечена більша відстань, будуть більш бажаними для розміщення полігону, ніж ті ділянки, які відповідають мінімальним вимогам. Це обумовлено тим, що крім конкретних, чітких факторів, на вибір території впливають довгострокові перспективи експлуатації полігонів ТПВ: можливе збільшення площі полігону, зміни складу збережених відходів та ін.

Ієрархія прийняття рішень для багатокритеріальної задачі розміщення полігону ТПВ представлена на рис. 4.8. На підставі технічних вимог до розміщення полігонів ТПВ, були сформульовані критерії, які розділені на три основні групи: екологічні, фізичні та еколого-економічні. Підкритерії доступні у вигляді атрибутів шарів в базі даних ГІС. Для створення карт критеріїв були використані різні джерела даних як в растровому, так і у векторному форматах.

Цифрова модель рельєфу (ЦМР), а також похідні від неї карти ухилу і експозиції були побудовані за даними космічних знімків ASTER з розміром комірки растра – 27 м в пакеті ArcMap за допомогою інструментів Slope та Aspect бібліотеки Spatial Analyst. Растрова карта глибини залягання ґрунтових вод побудована за допомогою методу просторової інтерполяції (крігінг) за даними моніторингових спостережень, проведених Причорноморським державним регіональним геологічним підприємством.

Векторні карти землекористування, водних об'єктів, населених пунктів, залізничних і автомобільних шляхів отримані шляхом імпортування бази Open Street Map. За допомогою SQL запитів до атрибутивної таблиці карти землекористування були отримані карти сільськогосподарських угідь, заповідників, житлової забудови, лісів і лісопосадок. В якості метрики близькості комірок растра до відповідних об'єктів, був використаний метод Евклідових відстаней (2.22), який дозволив створити растрові карти відстаней від водойм, річок, сільськогосподарських угідь, житлової забудови, меж міст, залізничних і автошляхів, аеропортів, заповідників, лісів і лісопосадок.



Рисунок 4.8 – Ієрархія прийняття рішень для багатокритеріальної задачі розміщення полігону ТПВ

Обмежувальний растровий шар був побудований за допомогою моделі геобробки (рис.3.15), розробленої у розділі 3. В процесі обробки були задіяні наступні інструменти: буферизація векторних об'єктів, об'єднання та злиття векторних об'єктів, перетворення вектора на растр, перекласифікація растра. Карта побудованого обмежувального растра та

структура бази геоданих в середовищі ArcMap наведена на рис. 4.9. Вибір вихідних параметрів для побудови обмежувального шару в системі наведений на рис.4.10.

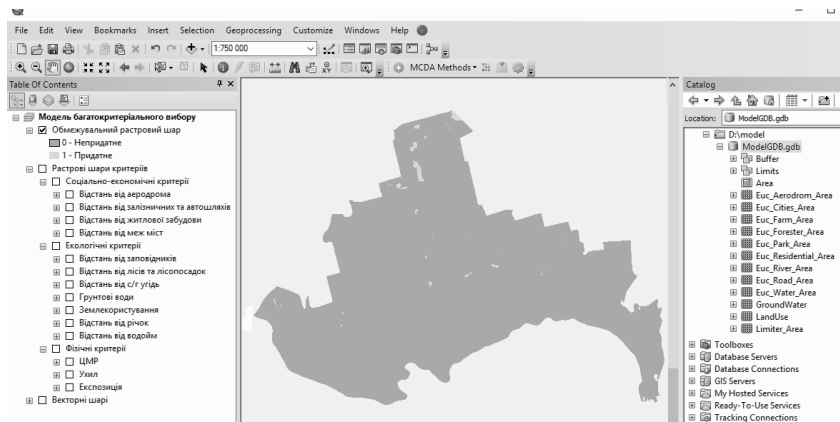


Рисунок 4.9 – Обмежувальний растровий шар та структура бази геоданих в середовищі ArcMap

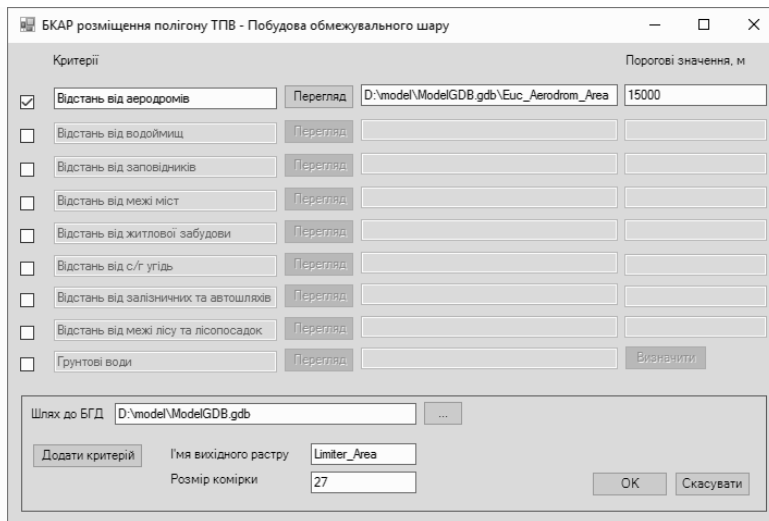


Рисунок 4.10 – Вибір параметрів для побудови обмежувального шару

4.2.2 Стандартизація критеріїв оцінки

Для стандартизації критеріїв були обрані кусково-лінійні функції приналежності, вигляд яких наведений на рис. 4.11. Нечіткі функції та множини з контрольними точками для критеріїв представлені в табл. 4.2 [7,24].

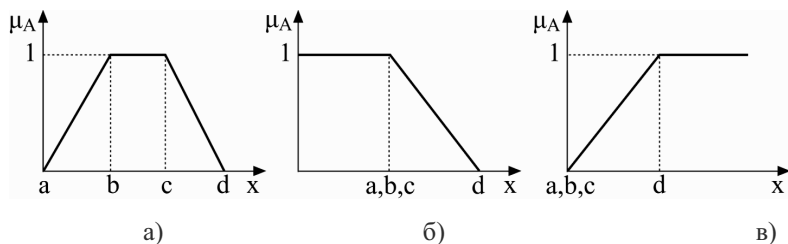


Рисунок 4.11 – Кусково-лінійних функцій належності, які використані для стандартизації критеріїв: а) – трапецевидна; б) – монотонно спадна; в) – монотонно зростаюча

Таблиця 4.2 – Нечіткі функції та множини з контрольними точками для критеріїв

№	Критерії	Контрольні точки				Функція належності
		a	b	c	d	
1	Цифрова модель рельєфу	0	–	–	5	Монотонно зростаюча
2	Ухил (%)	5	–	–	15	Монотонно спадна
3	Експозиція	N	SE	SW	NW	Трапецієподібна
4	Відстань від межі міст (км)	1	10	20	max	Трапецієподібна
5	Відстань від житлової та громадської забудови (км)	0.5	–	–	1.5	Монотонно зростаюча
6	Відстань від автомобільних та залізничних шляхів (км)	0.2	0.5	1	5	Трапецієподібна

3 загального переліку критеріїв ієрархічної структури багатокритеріального вибору місця розташування полігону ТПВ (рис. 4.8) були обрані критерії, що потребують нечіткої стандартизації, а саме [24]:

– цифрова модель рельєфу. Згідно дослідженням і судженням експертів діапазон висот від 5 до 530 м вважається кращим діапазоном для полігону ТПВ. Висоти нижчі за 5 м є небезпечними з точки зору можливості підтоплення, і не рекомендуються для будівництва. Висота місцевості, що досліджується, не перевищує 220 м, тому була обрана кусково-лінійна монотонно зростаюча функція належності з параметрами $a=b=c=0$ і $d=5$;

– ухил. Високий похил потребує великих витрат, пов'язаних з будівництвом і експлуатацією полігонів на крутих схилах, а дуже плоскі похили, несуть ризику, пов'язані з поганим дренажним стоком. Для похилу була обрана монотонно спадна функція належності до нечіткої множини з параметрами $a=b=c=15$, $d=30$;

– експозиція. Забруднення повітря, особливо метаном, потребує врахування рози вітрів. Північ (N) і північний захід (NW) є домінуючими напрямками вітру на території, що досліджується, тому обрана трапецеїдальна функція належності і цим небажаним експозиціям привласнені більш низькі значення;

– відстань від межі міст. Враховуючи, що міста є джерелом відходів, полігони ТПВ повинні розташовуватися на логічно обґрунтованій відстані від них. Відстань від 10 до 20 км вважається експертами найкращою, тому обрана трапецеїподібна функція належності з параметрами $a=1$, $b=10$, $c=20$, $d=\max$;

– відстань від житлової та громадської забудови. Для стандартизації критерію обрана кусково-лінійна монотонно зростаюча функція належності з параметрами $a=b=c=0.5$ і $d=1.5$;

– відстань від автомобільних та залізничних шляхів. Будівництво доріг до полігонів, особливо на великі відстані, вимагає величезних попередніх витрат. Тому ділянка для полігону ТПВ повинна розміщуватися недалеко від автомагістралей та основних доріг. Для стандартизації критерію була обрана трапецеїподібна функція належності з параметрами $a=0.2$, $b=0.5$, $c=1$, $d=5$;

– землекористування. Для критерію землекористування були привласнені наступні значення: луки – 0,5, чагарники – 0,9, пустище – 1,

всі інші – 0.

Приклад стандартизації критерію «Відстань від залізничних та автошляхів» в системі наведений на рис.4.12.

Карти критеріїв, що були перекласифіковані за поданими у табл. 4.2 функціями належності, наведені у додатку Б.

Фазифікація критеріїв, тобто перетворення їх значень у нечітку множину, на підставі експертної оцінки нечіткої функції належності кожної альтернативи відповідному класу придатності, дозволяє в подальшому об'єднати критерії за допомогою нечітких правил виведення. Для цього можуть бути використані операції з нечіткими множинами, наприклад, перетин або об'єднання.

БКАР розміщення полігону ТПВ - Стандартизація

Обраний критерій: Відстань від залізничних та автошляхів

Шлях до растру: D:\model\ModelGDB gdb\Euc_Road_Area

Поле растра: Value

Обмежувальний шар: Limiter_Area

Мінімальне значення = 0 Максимальне значення = 25281

Тип функції належності: Трапецевидна

a = 200 b = 500 c = 1000 d = 5000

Рівні інтервали Задати інтервали

Значення карти	Станд. значення
200	0
500	1
1000	1
5000	0

Задати

Функція належності

0 0.2 0.4 0.6 0.8 1

0 2000 4000 6000

OK Скасувати

Рисунок 4.12 – Вікно стандартизації критеріїв

4.2.3 Розрахунок ваг критеріїв

Ієрархія критеріїв та підкритеріїв для геопросторового БКАР наведені на рис. 4.13. Ваги для критеріїв були розраховані за допомогою нечіткої модифікації МАІ згідно (2.48) – (2.52) [7]. В оцінюванні приймав участь експерт, що має досвід в управлінні відходами. Результати розрахунку ваг критеріїв з використанням нечіткої модифікації методу аналізу ієрархій наведені у додатку В.



Рисунок 4.13 – Ієрархія критеріїв для багатокритеріальної задачі розміщення полігону ТПВ

Виконання етапу розрахунку ваг критеріїв в СППР передбачає побудову чіткої матриці парних порівнянь критеріїв і перевірки узгодженості оцінок, наступним кроком є переведення отриманої чіткої матриці в нечітку і розрахунок спочатку нечітких ваг, а далі їх дефазифікація у чіткі ваги критеріїв.

На рис. 4.14 представлено вікно системи з результатами розрахунку чітких ваг для критеріїв та підкритеріїв ієрархії прийняття рішень. На рис. 4.15 наведено приклад звіту системи за результатами розрахунку нечітких ваг критеріїв та їх дефазифікації.

Остаточна ієрархія прийняття рішень, представлена на рис.4.16.

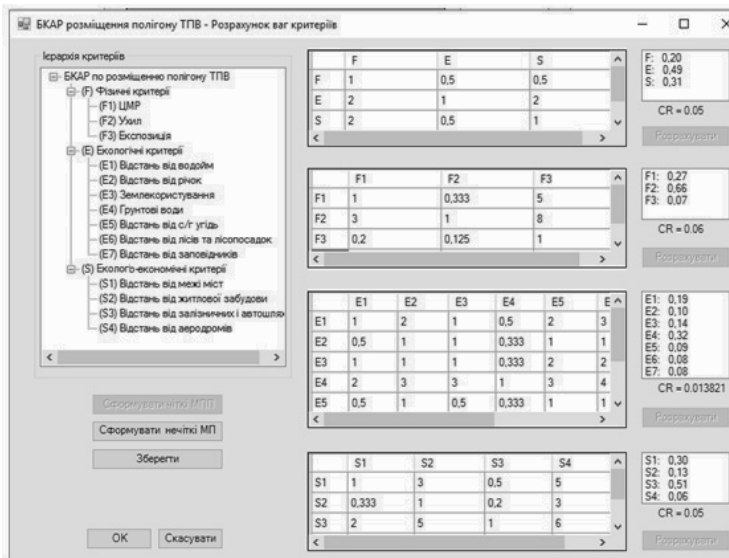


Рисунок 4.14 – Результати розрахунку чітких ваг критеріїв та підкритеріїв ієрархії прийняття рішень

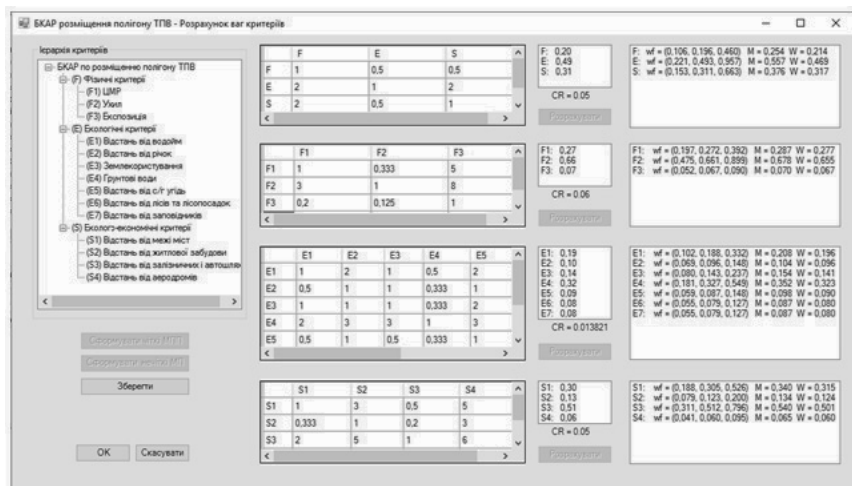


Рисунок 4.15 – Звіт за результатами розрахунку нечітких ваг критеріїв та їх дефазифікації

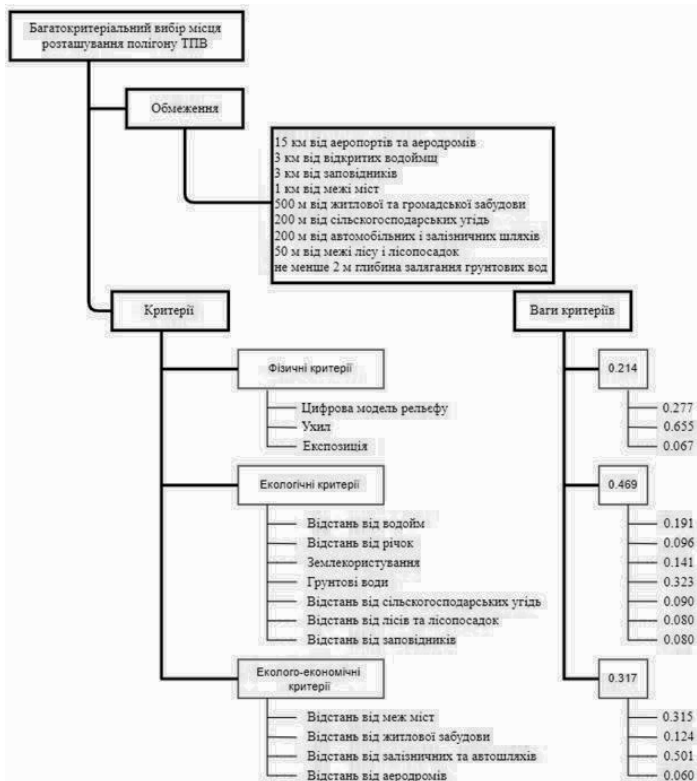


Рисунок 4.16 – Ієрархія прийняття рішень для багатокритеріальної задачі розміщення полігону ТПВ після розрахунку ваг критеріїв

4.2.4 Агрегування оцінок альтернатив

Для агрегування оцінок альтернатив в загальну оцінку придатності в системі був використаний OWA оператора Ягера з лінгвістичними квантифікаторами, розглянутий у розділі 2.

Розглянемо приклад обчислення згортки оцінок альтернативи за 5 критеріями (табл.4.3) в узагальнений комбінований показник за допомогою OWA-оператора Ягера з нечітким квантифікатором «для більшості» (рис.2.13) [147].

Таблиця 4.3 – Значення оцінок альтернатив за критеріями

C_j	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
w_i	0.22	0.1	0.35	0.23	0.1
a_i	0.8	0.2	0.3	0.4	0.1

Впорядкуємо за зменшенням значень атрибутів альтернативи ваги критеріїв: $W^b = \{0.22, 0.23, 0.35, 0.1, 0.1\}$. Розрахуємо ваги порядку $\tilde{\lambda}_j$ за формулою (2.60):

$$\tilde{\lambda}_1 = 0;$$

$$\tilde{\lambda}_2 = Q(0.22+0.23) - Q(0.22) = 0.125$$

$$\tilde{\lambda}_3 = Q(0.22+0.23+0.35) - Q(0.22+0.23) = 0.875$$

$$\tilde{\lambda}_4 = \tilde{\lambda}_5 = 0.$$

Виконаємо агрегування оцінок альтернативи в єдиний показник формулою (2.59) використовуючи отриманий вектор $\Lambda = \{0, 0.125, 0.875, 0, 0\}$:

$$V(a) = 0 \cdot 0.8 + 0.125 \cdot 0.4 + 0.875 \cdot 0.3 + 0 + 0 = 0.3125.$$

Як можна побачити, алгоритм агрегування OWA-оператором Ягера в такій інтерпретації є не дуже зручним для реалізації в середовищі ГС. Більш простий алгоритм може бути отриманий на основі кванторів RIM.

Розрахуємо ваги порядку $\tilde{\lambda}_j$ для значень, наведених в табл.4.3, за формулою (2.62):

$$\tilde{\lambda}_1 = 0.0484;$$

$$\tilde{\lambda}_2 = (0.22+0.23)^2 - (0.22)^2 = 0.1541$$

$$\tilde{\lambda}_3 = (0.22+0.23+0.35)^2 - (0.22+0.23)^2 = 0.4375$$

$$\tilde{\lambda}_4 = (0.22+0.23+0.35+0.1)^2 - (0.22+0.23+0.35)^2 = 0.17$$

$$\tilde{\lambda}_5 = (0.22+0.23+0.35+0.1+0.1)^2 - (0.22+0.23+0.35+0.1)^2 = 0.19;$$

Виконаємо агрегування оцінок альтернативи в єдиний показник за формулою (2.59), використовуючи отриманий вектор $\Lambda = \{0.0484, 0.1541, 0.4375, 0.17, 0.19\}$:

$$V(a) = 0.0484 \cdot 0.8 + 0.1541 \cdot 0.4 + 0.4375 \cdot 0.3 + 0.17 \cdot 0.2 + 0.19 \cdot 0.1 = 0.2846.$$

На рис. 4.17 представлено вікно системи для завдання вихідних параметрів агрегування атрибутів альтернатив за різними критеріями.

Агрегування

Обмежувальний шар: Limiter_Area

Лінгвістичний квантифікатор: для більшості (alfa=2,0)

Шлях до підсумкового растру: D:\model\ModelGDB.gdb\OWA_Raster

	Alfa	W
ЦМП	0,00	0,059
Ухил	0,00	0,140
Експозиція	0,00	0,014
Відстань від водойм	0,50	0,090
Відстань від річок	0,00	0,045
Землекористування	0,00	0,066
Грунтові води	0,00	0,151
Відстань від с/г угідь	0,00	0,042
Відстань від лісів та лісосадов	0,00	0,038
Відстань від заповідників	0,00	0,038
Відстань від межі міст	0,50	0,100
Відстань від житлової забудови	0,00	0,039
Відстань від залізничних і автошляхів	0,65	0,159
Відстань від аеродромів	0,00	0,019
Сума		1,000

OK Скасувати Розрахувати ваги

Рисунок 4.17 – Вікно системи для етапу агрегування

На етапі агрегування на підставі переваг ОПП можуть бути задані значення α -зрізів для шарів критеріїв та виконано метод скринінгу альтернатив. В цьому же вікні задається лінгвістичний квантифікатор, що визначає бажану для ОПП стратегію прийняття рішення та шлях до растру, який буде містити агреговані оцінки альтернатив.

Розроблена СППР була використана у багатокритеріальному аналізі рішень з розміщення полігону ТПВ на півдні Одеської області, програма якого передбачала виконання трьох сценаріїв моделювання карти придатності: з використанням булевої логіки, нечіткої логіки та комбінації методів агрегування оператором OWA і нечіткого аналізу ієрархій.

Діаграма процесу прийняття рішень за різними сценаріями наведена у додатку Г.

4.2.5 Результати геопросторового БКАР з розміщення полігону ТПВ на півдні Одеської області

В результаті виконання трьох сценаріїв дослідження були побудовані карти придатності, які представлені на рис. 4.18 [7].

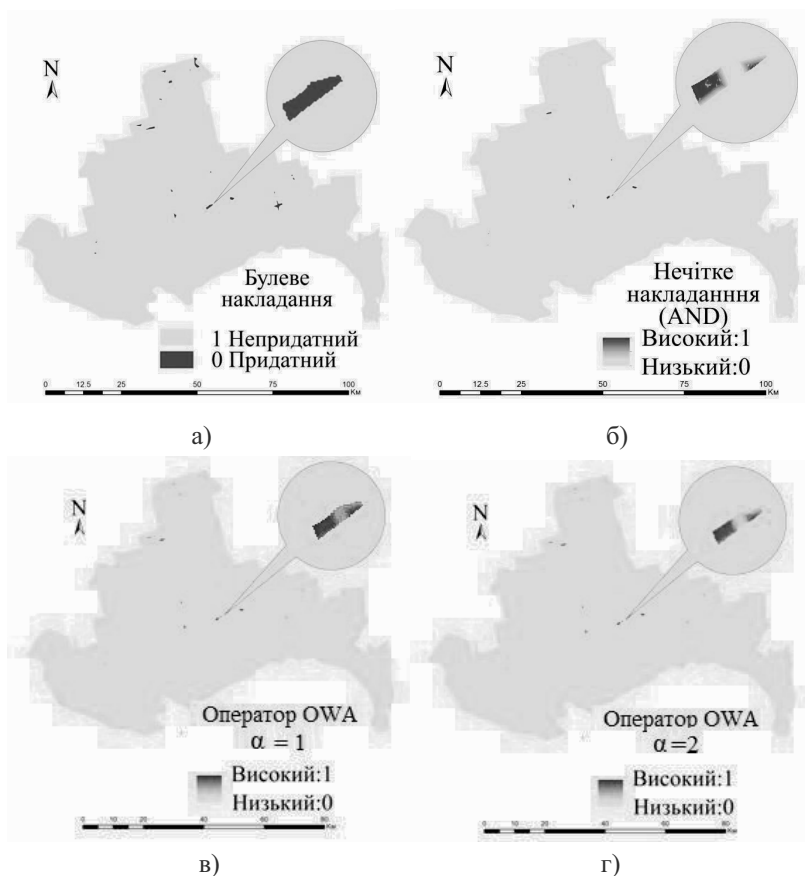


Рисунок 4.18 – Карти придатності: а) – булеве накладання; б) – нечітке накладання (AND); в) – агрегування оператором OWA ($\alpha=1.0$); г) – агрегування оператором OWA ($\alpha=2.0$)

За сценарієм 1, який передбачав використання булевої логіки, побудована карта придатності, що наведена на рис. 4.18а, розділена на два чітких класи, де значення 1 – придатні ділянки, 0 – непридатні ділянки. Сумарна площа знайдених придатних для будівництва полігону ТПВ ділянок склало 12.19 км² (або 0.25 % від загальної площі території, що досліджувалася) [7,24].

За сценарієм 2 були побудовані карти придатності з використанням операції нечіткого перетину (рис.4.18б). Використання нечіткої моделі дозволило побудувати більш точні карти за рахунок можливості ранжування комірок растру за ступеню придатності. Сумарна площа ділянок, знайдених з використанням нечіткого перетину, з індексом придатності більше 0.9, склало 0.81 км². З них тільки три ділянки мають загальну площу більше 30 га.

Для випадку, коли параметр $\alpha=2$ (рис. 4.18г), сумарна площа ділянок, індекс придатності яких має значення більше 0.9, склало 3.97 км². З них п'ять ділянок мають загальну площу більше 30 га.

Результати дослідження показали, що модель, заснована на апараті булевої алгебри, має певні недоліки, пов'язані з відсутністю можливості ранжування альтернатив, що не дозволяє порівняти дві ділянки відмічені як придатні, і оцінити яка з них є більш придатною. Це помітно при порівнянні однієї і тієї ж ділянки на різних картах придатності (рис. 4.19).

Крім того, використання операції нечіткого перетину призводить до оцінювання на основі лише найнижчого рейтингу, тобто є песимістичним підходом до прийняття рішення. Навпаки, операції нечіткого об'єднання є оптимістичним підходом, що враховує тільки кращі оцінки критеріїв. І в першому, і в другому випадках, можуть бути помилки, зв'язані з недооцінкою або переоцінкою відповідно. Компромісом між цими двома крайностями є використання оператора зважена сума чи OWA оператора Ягера (при $\alpha=1$), які дозволяють компенсувати низький рейтинг одного фактора, високим рейтингом іншого фактора і можуть бути розцінені, як операція нечіткого усереднення.

Зазначемо, що достовірність результатів аналізу, виконаного за допомогою запропонованого алгоритму, залежить від достовірності вихідного картографічного матеріалу. В даній роботі цей аспект застосування системи окремо не розглядається.

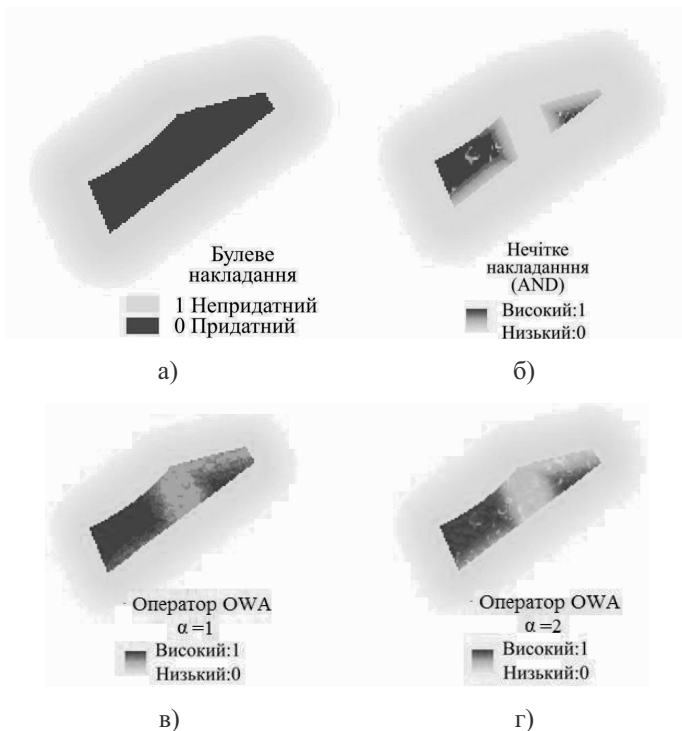


Рисунок 4.19 – Ділянка карти придатності: а) – булеве накладання; б) – нечітке накладання (AND); в) – агрегування оператором OWA ($\alpha=1.0$); г) – агрегування оператором OWA ($\alpha=2.0$)

Проведення порівняння достовірності результатів аналізу з результатами вибору місця розташування об'єктів ТПВ, виконаного фахівцями відділу екологічної безпеки, на основі традиційних аналітичних методів, теж представляється дуже важким завданням, тому що на даний час розробка техніко-економічних обґрунтувань будівництва регіональних комплексів поводження з ТПВ тільки пропонується і земельні ділянки для них ще не відведено. Більшість же існуючих на модельній території полігонів ТПВ не відповідають будівельним нормам, у багатьох відсутні правостановлюючі документи на земельні ділянки. В табл. 4.9 наводиться інформація про діючі полігони ТПВ на досліджувальній території.

Таблиця 4.9 – Інформація про діючі полігони ТПВ на півдні Одеської області

№	Райони	Площа полігонів/звалищ, га	Кількість полігонів/звалищ, од.
1	Болградський	47,5	18
2	Ізмаїльський	284,3	18
3	Кілійський	30,1	15
4	Ренійський	19,3	7
	Всього	381,2	58

Більшість полігонів має площу менше 30 га, тільки в Ізмаїльському районі існує 2 полігони площею 30 га: смт. Суворове (49.5941, 28.97781) і с. Утконосівка (45.48394, 28.9649). Відзначимо, що саме у смт. Суворово системою була знайдена одна з п'яти ділянок, що задовольняє вимогам, яка показана на рис. 4.18 та рис. 4.19.

4.3 Оцінка ефективності методу геопросторового БКАР з розміщення просторових об'єктів

Реалізація методу геопросторового БКАР у вигляді єдиного алгоритму вирішення завдання територіального планування, дозволяє забезпечити аналітика засобами оцінювання факторів впливу в умовах невизначеності та знижує ймовірність допущення помилок при проведенні аналізу. В якості переваг запропонованої СППР перед традиційним способом територіального планування слід зазначити:

- можливість врахування не тільки всіх факторів впливу, що пропонуються експертами, а ще й ступеня цього впливу через визначення рангу придатності альтернатив;
- можливість завдання вихідної ієрархії моделі прийняття рішення, її уточнення та доповнення в процесі аналізу;
- можливість перевірки узгодженості оцінок експертів;
- можливість врахування різних стратегій прийняття рішень через наявність способу завдання прийнятної для ОПР правила прийняття рішень за допомогою лінгвістичного квантифікатора;

– можливість отримання набору карт придатності для розміщення об'єктів за заданими критеріями, для подальшого детального аналізу і вибору конкретного місця розташування.

Як правило, ефективність визначається відношенням отриманих результатів до витрат і вимірюється сукупністю кількісних показників. Для запропонованого методу можемо відмітити зменшення витрат за рахунок скорочення часу виконання передпроектних робіт на етапі розроблення пропозицій щодо розміщення об'єкта будівництва на земельних ділянках (обґрунтування місця розташування) та складання завдання на інженерні вишукування в порівняннях з традиційними методами.

На зменшення витрат передпроектних робіт впливають наступні фактори:

1) Використання однієї системи для аналізу та обґрунтування місця розташування об'єкта будівництва, яка є результатом інтеграції метода геопросторового БКАР в повноцінну ГІС. Це сприяє зменшенню ймовірності помилок при перенесенні розрахунків з різних систем та проведення повторного аналізу.

2) Автоматизація розрахунку набору карт придатності для різних стратегій прийняття рішень за рахунок формалізації переваг ОПР у вигляді кількісних та лінгвістичних параметрів системи, які можна змінювати у процесі виконання аналізу. При цьому зберігаються всі попередні розрахунки і не треба починати аналіз заново, що істотно скорочує час його виконання. Візуалізація та аналіз різних стратегій прийняття рішень дозволяє сформулювати більш обґрунтовані рекомендації щодо вибору місця розміщення об'єкта.

3) Використання алгоритмів, що сприяють скороченню часу обробки геопросторової інформації. Наприклад, додавання етапу скринінгу альтернатив дозволяє зменшити час агрегування атрибутів, що при великій кількості альтернатив та критеріїв може бути істотним. Кількісні розрахунки наводяться у табл.4.10.

4) Простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс запропонованої СППР дозволяє не привертати до виконання аналізу спеціалістів високої кваліфікації, що мають спеціальні навички роботи з повноцінними ГІС.

Кількісну оцінку скорочення часу виконання багатокритеріального аналізу рішень з розміщення полігону ТПВ в порівнянні зі стандартними засобами в ГІС розглянемо на прикладі побудови обмежувального шару.

При застосуванні пакету ArcGIS for Desktop та запуску окремих інструментів ГІС для кожного шару критерія маємо 12 етапів, для яких визначені усереднені показники часу виконання кожної операції (рис. 4.20). Діаграма Ганта для даного процесу наведена на рис.4.21. Використання СППР дозволяє скоротити час побудови обмежувального шару на 65%, про що свідчить дані, наведені на рис.4.22 і рис.4.23.

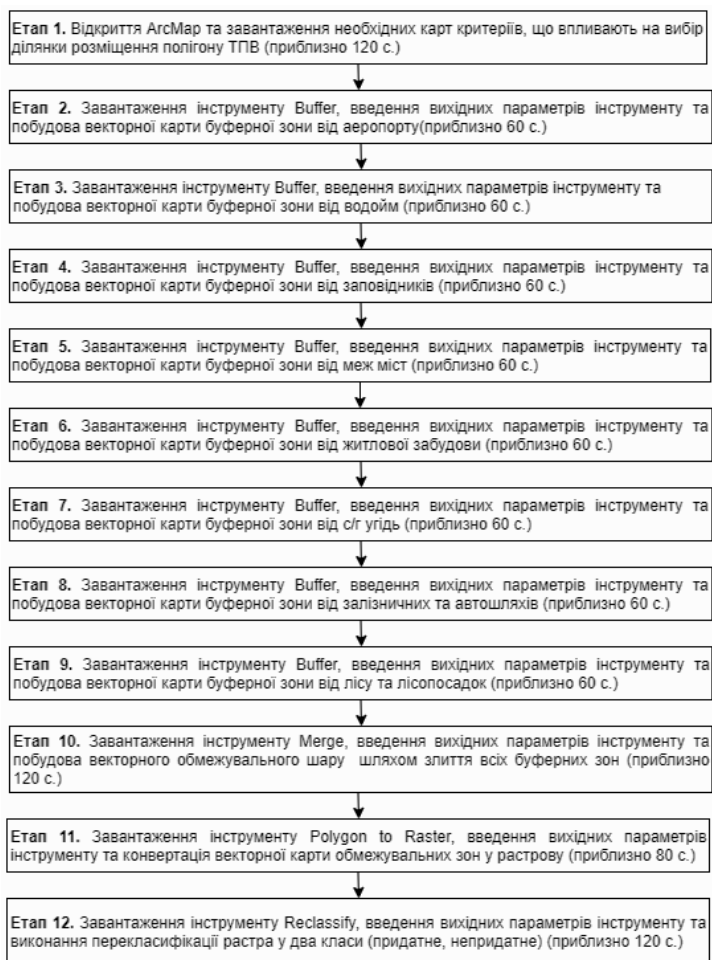


Рисунок 4.20 – Етапи побудови обмежувального шару в ГІС

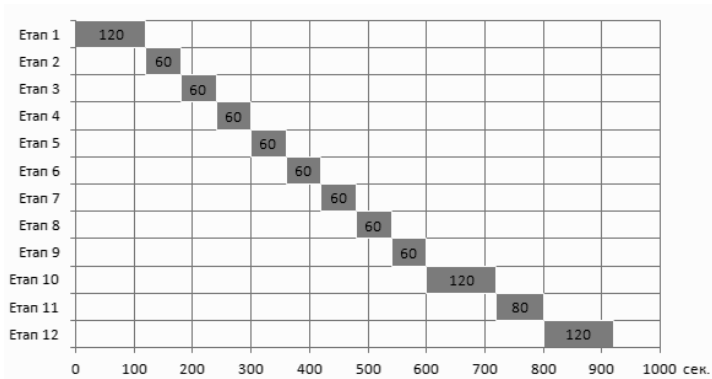


Рисунок 4.21 – Діаграма процесу побудови обмежувального шару в ГІС

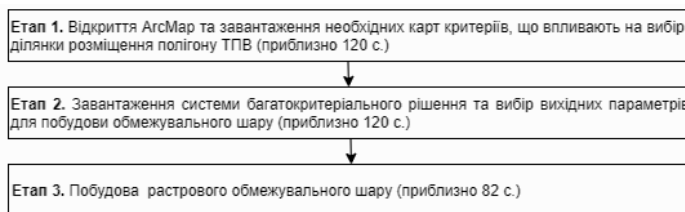


Рисунок 4.22 – Етапи побудови обмежувального шару з використанням СППР



Рисунок 4.23 – Діаграма процесу побудови обмежувального шару в СППР

Виконаємо кількісну оцінку скорочення часу агрегування атрибутів при використанні алгоритму скринінгу альтернатив для трьох критеріїв: C1 – Відстань від автомобільних та залізничних шляхів ($w_1=0.5$;); C2 – Відстань від меж міст ($w_2=0.3$); C3 – Відстань від житлової та громадської

забудови ($w_3=0.2$). В якості оператора агрегування використовується оператор зважена сума (1.8).

На рис. 4.24 наведені комбіновані карти придатності для розміщення полігону ТПВ для чотирьох різних наборів ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) значень α -порогів нечітких множин критеріїв [102,122,22,23]. Характеристики виконання моделей представлені в табл. 4.10. Чим вище значення порогів, тим менша кількість альтернатив залишається для подальшого аналізу і тим менше час виконання оператора агрегування, тобто можемо констатувати зменшення часу агрегування у випадку попереднього скринінгу альтернатив. Відмітимо, що при використанні більш складного оператора агрегування, наприклад, оператора Ягера та більшої кількості критеріїв, показники будуть значно вищі.

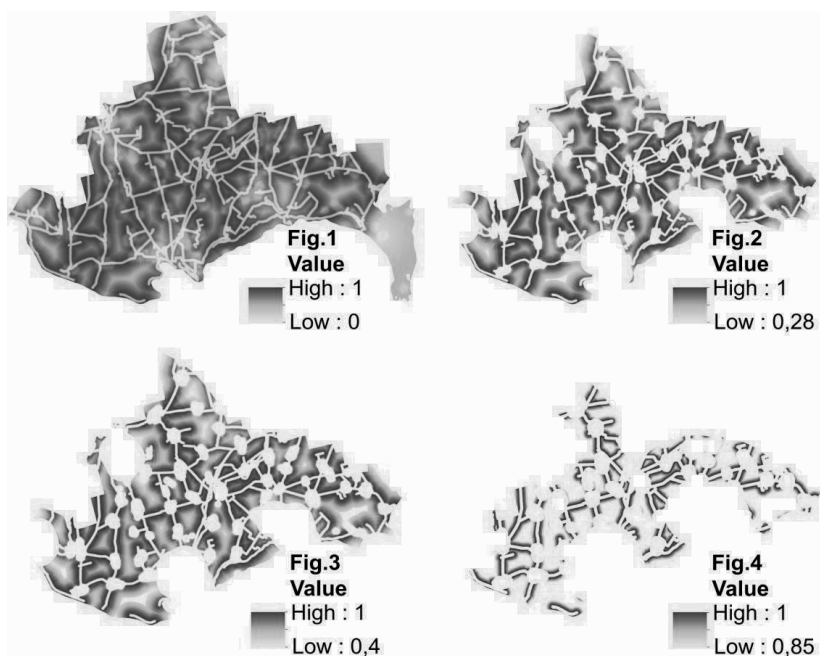


Рисунок 4.24 – Комбіновані карти придатності для розміщення полігону ТПВ для різних значень α -порогів нечітких множин

Таблиця 4.10 – Час виконання оператора агрегування зважена сума для різних значень α -порогів нечітких множин

Значення α -порогів ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)	Кількість альтернатив (комірок растру зі значеннями)	Час виконання оператору агрегування
(0, 0, 0)	6900583	4870 ms
(0.2, 0.35, 0.3)	4084035	4800 ms
(0.3, 0.5, 0.45)	3540798	4760 ms
(0.8, 0.85, 0.9)	1079139	4580 ms

На рис. 4.25 представлена діаграма Ганта для алгоритму скринінгу трьох критеріїв у випадку його реалізації стандартними засобами ГІС. Цей же процес, в СППР займає приблизно 17 сек. З врахуванням, часу введення значень α -порогів та вибору правила агрегування (рис. 4.17) приблизно 80 сек., загальний час складає приблизно 97 сек., що на 78% менше ніж без використання системи.

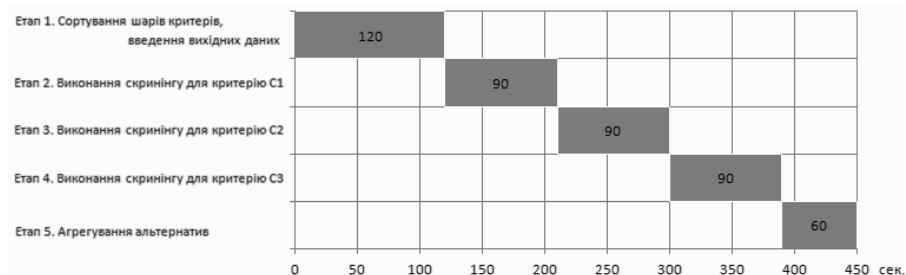


Рисунок 4.25 – Діаграма процесу скринінгу та агрегування альтернатив засобами ГІС

Таким чином, аналіз ефективності метода геопросторового БКАР з розміщення об'єктів та просторової СППР, що його реалізує, показує скорочення часу виконання передпроектних робіт, а також підвищення обґрунтованості рішень щодо розміщення об'єктів будівництва на земельних ділянках.

ВИСНОВКИ

У роботі наведено теоретичне узагальнення та вирішення актуальної задачі розробки нечітких моделей, методів та прикладної інформаційної технології геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів. Запропоновані моделі та методи дозволяють забезпечити ефективну підтримку прийняття рішень з вибору придатного місця розміщення з урахуванням еколого-економічних вимог та будівельних норм, а також підвищити адекватність, і обґрунтованість прийнятих рішень в умовах невизначеності ОПР щодо допустимої стратегії прийняття рішень.

В процесі проведення наукових досліджень отримані наступні наукові та практичні результати.

1. Проведено аналіз сучасного стану проблем та підходів до розміщення геопросторових об'єктів, що дозволило сформулювати вимоги до розробки інформаційної технології геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів, обґрунтувати етапи наукового дослідження.

2. Побудована математична модель обробки різномірної геопросторової інформації, яка за рахунок поєднання методів геоінформаційного аналізу, просторового моделювання та математичного апарату теорії нечітких множин дозволяє виконати декомпозицію різномірної геопросторової інформації на шари критеріїв, визначити множину альтернатив з урахуванням обмежень, що на них накладаються, а також виконати фазифікацію атрибутів альтернатив, що дає можливість формалізувати експертні знання та знизити суб'єктивність процесу прийняття рішень.

3. Розроблено метод геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів, який є ГІС-орієнтованим і відрізняється від існуючих тим, що формалізує нечітку інформацію про допустиму для ОПР форму компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями, що дозволяє виконати ранжування альтернатив за ступенем придатності для розміщення об'єктів з урахуванням різних стратегій прийняття рішень, а також виконати попередній скринінг альтернатив, що забезпечує скорочення часу обробки шарів критеріїв операторами агрегування.

4. Запропоновано метод агрегування атрибутів альтернатив, який за рахунок сумісного застосування методу скринінгу альтернатив та оператора Ягера з лінгвістичними квантифікаторами надає можливість враховувати різні стратегії прийняття рішень та збільшити обґрунтованість рішень, що приймаються.

5. Розроблено прикладну інформаційну технологію геопросторового багатокритеріального аналізу рішень з розміщення об'єктів, яка дозволяє врахувати різні фактори впливу, автоматизувати процес обробки вихідної геопросторової інформації та ранжування територій за ступенем придатності для розміщення об'єктів.

6. Виконано практичну реалізацію запропонованих методів і моделей у вигляді просторової системи підтримки прийняття рішень з розміщення об'єктів ТПВ, яка була протестована для вирішення задачі ранжування території півдня Одеської області за ступенем придатності для розміщення полігону ТПВ при різних стратегіях прийняття рішень. Експериментально доведено, що використання просторової СППР дозволяє отримати скорочення часу на аналіз територій в порівнянні з традиційними способами, скорочення часу передпроектних робіт, зниження ймовірності виникнення помилок за рахунок автоматизації всіх етапів аналізу, а також підвищення обґрунтованості рішень завдяки формалізації нечіткої інформації про переваги та схильності ОПР до ризику при прийнятті рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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 (2006) GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Geographical Information Science* 20(7):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, Čočkalo 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, Kovalenko L, Buchynska I, Gunchenko Y (2018) Development of a multicriteria model for making decisions on the location of solid waste landfills. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 2(3,92):21–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.129287> (Scopus)
8. Кузніченко СД, Бучинська ІВ (2017) Використання мультикритеріального аналізу прийняття рішень в ГІС. Збірник IV Міжнародної науково-практичної конференція «Інформаційні технології та взаємодії» (IT&I), м. Київ, 8–10 листопада 2017 р. с 27–28.
9. Бучинська ІВ (2019) Дослідження методів багатокритеріального прийняття рішень в ГІС. Збірник тез за матеріалами наукової конференції молодих вчених Одеського державного екологічного університету, м. Одеса, 06–10 травня 2019 р. с 217–218.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Malczewski J (2004) GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62:3–6.
14. 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.
15. Кузнiченко СД, Бучинська ІВ (2017) Проектування iнтегрованої геоiнформацiйної системи рiонального монiторингу повеней на основi IoT. Збiрник тез IV Мiжнародної науково-практичної конференцiї «Актуальнi проблеми забезпечення iнформацiйної та кiбернетичної безпеки», Киiв: ДУТ, м.Киiв, 21–21 грудня 2017 р. с 25–27.
16. Kuznichenko S, Buchynska I, Kovalenko L, Tereshchenko T (2019) Integrated Information System for Regional Flood Monitoring Using Internet of Things. Працi Мiжнародної науково-практичної конференцiї «iнтелектуальнi системи та iнформацiйнi технологiї», м. Одеса, 19–24 серпня 2019 р. с 105–109.
17. 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.
18. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965. Vol. 8 (3). P. 338–353.
19. 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.

20. Chang NB, Parvathinathan B, Breeden JB (2008) Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management* 87:139–153.
21. 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.
22. Кузнiченко СД, Бучинська ІВ (2019) Рiшення нечiткої багатокритерiальної задачі розміщення просторового об'єкта на основi геоiнформаційних технологiй. V Мiжнародна науково-практична конференцiя «Обчислювальний iнтелект (результати, проблеми, перспективи)». Матерiали конференцiї, м. Ужгород, 15–20 квітня 2019 р. с 104–105.
23. Кузнiченко СД, Бучинська ІВ, Коваленко ЛБ (2019) Пiдхiд до вирiшення нечiткої багатокритерiальної задачі вибору варiантiв розміщення територiально-розподiлених об'єктiв в ГiС. Матерiали Мiжнародної науково-практичної конференцiї «iнформаційнi технологiї та комп'ютерне моделювання», м. iвано-Франкiвськ, 20–25 травня 2019 р. с 74–77.
24. Кузнiченко СД, Гунченко ЮО, Бучинська ІВ (2018) Нечiтка модель обробки геопросторових даних в мультикритерiальному аналізі придатностi територiй. Збiрник наукових праць Вiйськового iнституту Киiвського національного унiверситету iменi Тараса Шевченка. К.: ВiКНУ, 61:90–103
25. Kuznichenko S, Buchynska I (2018) A Multicriteria industrial site selection methodology using MCDA, fuzzy set theory and GIS. Працi III Мiжнародної конференцiї «Комп'ютерна алгебра та iнформаційнi системи», м.Одеса, 20–25 серпня 2018 р. с 11–14
26. Domschke W, Drexl A (1996) *Logistik: Standorte.* Oldenbourg, München, Wien.
27. Schöler K (2005) *Raumwirtschaftstheorie.* Vahlen, München.
28. Цветков ВЯ (2000) *Геомаркетинг.* М.: Машиностроение, с 64.
29. Цветков ВЯ (2000) Задачі геомаркетинга. *Геодезия и аэрофотосъемка* 5:146–154.
30. Цветков ВЯ (2002) *Геомаркетинг.* М.: Финансы и статистика, с 240.

31. Cliquet G. (ed) (2013) Geomarketing: Methods and strategies in spatial marketing. John Wiley & Sons, p 659.
32. Schüssler F (2000) Geomarketing: Anwendungen Geographischer Informationssysteme im Einzelhandel. Tectum-Verlag.
33. Drezner Z, Hamacher H (2004) Facility location: applications and theory. Berlin: Springer-Verlag, p 460.
34. Farahani R, Hekmatfar M (eds) (2009) Facility location: Concepts, models, algorithms and case studies. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, p 549.
35. Бельц ЕА, Колоколов АА (2012) Оптимизация размещения предприятий с учетом минимально допустимых расстояний. Вестн. Ом. ун-та 4:13–16.
36. Кочетов ЮА (2007) Двухуровневые задачи размещения. Труды ИВМ и МГ. Серия Информатика. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН 7:97–104.
37. Катренко АВ, Антоняк ТІ (2011) Розв'язання задач оптимального розміщення об'єктів методом імітаційного моделювання. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Інформаційні системи та мережі, 715:150–162.
38. Preiffer B, Klamroth K (2008) A unified model for Weber problem with continuous and network distance. Computer and OR. vol 35. No 2. p 312–326.
39. Fermat P de, Ed. H.Tannery, ed. (1922) «Oeuvres» (1891), vol. 1. Paris. Supplement: Paris (1643), c 153.
40. Torricelli E, Loria G, Vassura G (1919) Opere de Evangelista Torricelli. English edition, vol I. Part 2. Faenza. p 90–97.
41. Kirszenblat D (2011) Dubins networks: Thesis. Melbourne: Department of Mathematics and Statistics of the University of Melbourne, p 56.
42. Тюнен И (1926) Изолированное государство в его отношении к сельскому хозяйству и национальной экономии. Исследование о влиянии хлебных цен, богатство почвы и накладных ресурсов на земледелие. Перевод ЕА Торнеус, под ред. проф. Рыбникова АА, М.: Изд. «Экономическая жизнь», с 220.
43. Блауг М (2005) Сто великих экономистов до Кейнса. Пер. с англ. М.Блауг. СПб: «Экономическая школа», с 299.

44. Вебер С (1926). Теория размещения промышленности. Перевод Н. Морозова, под ред. Н.Баранского. Ленинград-Москва: Изд «Книга», с 119.
45. Wesolowsky G (1993) The Weber problem: History and perspectives. *Location Science* 1:5–23
46. Drezner Z, Wesolowsky GOA (1978) Trajectory Method for the Optimization of the Multifacility Location Problem with lp Distances. *Management Science*, 24:1507–1514.
47. Osinuga IA, Bamigbola OM (2007) On the Minimum Norm Solution to Weber problem. *SAMSA Conference Proceedings, Windhoek*, p 2730.
48. Chen R (1984) Location problems with costs being sums of powers of Euclidean distances. *Comput.Oper. Res* 11:285–294.
49. Gugat M, Pfeiffer B (2007) Weber problems with mixed distances and regional demand. *Math. Meth. Oper. Res* 66:419–449
50. Сергиенко ИВ (1988) Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. К.: Наук. думка, с 471
51. Пападимитриу Х, Стайглиц К (1985) Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. Москва: Мир, с 510
52. Карманов ВГ (2004) Математическое программирование. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 264 с.
53. Ляшенко ИН, Карагодова ЕА, Черникова НВ, Шор НЗ (1975) Линейное и нелинейное программирование. К.: Вища школа, с 372.
54. Ермолев ЮМ (1976) Методы стохастического программирования. Москва: Наука, с 240.
55. Антамошкин АН, Казаковцев ЛА (2013) Алгоритм случайного поиска для обобщенной задачи Вебера в дискретных координатах. *Многопроцессорные вычислительные системы* 1:87–98.
56. Кондратьев ВД (2008) Методы решения задачи размещения объектов обслуживания. *Управление большими системами*. Москва. НИЦ ГИБДД МВД РФ, 20:46–56.
57. Guha S, Khuller S (1999) Greedy strikes back: Improved facility location algorithms. *Journal of algorithms* 31(1):228–248.
58. Li S (2013) A 1.488 approximation algorithm for the uncapacitated facility location problem. *Information and Computation*, 222:45–58.

59. Bădoiu M, Har-Peled P (2002) Indyk Approximate clustering via coresets. Proceedings of the thirty-fourth annual ACM symposium on Theory of computing. May 2002. p 250–257.
60. Kumar P, Kumar P (2010) Almost optimal solutions to k-clustering problems. International Journal of Computational Geometry & Applications, 20(4):431–447.
61. Томашевський ВМ (2005) Моделювання систем. К.: Видавнича група BHV, с 352.
62. Емельянов АА, Власова ЕА, Дума РВ (2002) Имитационное моделирование экономических процессов: уч. пособие. М.: Финансы и статистика, с 368.
63. Ситник ВФ, Орленко НС (1999) Імітаційне моделювання: навч.-метод. посібник для самост. вивч. дисц., К.: КНЕУ, с 208.
64. Петухов ВВ, Кулибаба ВВ (2013) Региональная информационно-аналитическая система мониторинга оборота твердых бытовых отходов. Тр. СПИИ-РАН 25:338–349.
65. Каргин РВ, Домницкий АА (2012) Маршрутизация движения дорожных машин для сбора и вывоза отходов. Дороги и мосты, Москва 2(28):92–104.
66. Кузьменко ЮГ, Савельева ИП Конькова ЕД (2015) Логистика торгового обслуживания: Модели и методы территориального размещения объектов рыночного хозяйства – зарубежный опыт. Вестник ЮрГУ. Серия «Экономика и менеджмент» 9(3):159–168.
67. Зацерковний ВІ, Бурачек ВГ, Железняк ОО, Терещенко АО (2014) Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, с 492.
68. Шипулін ВД (2014) Основи ГІС-аналізу: навч. Посібник. Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Х: ХНУМГ, с 330.
69. Изард У (1996) Методы регионального анализа: введение в науку о регионах. М.: Прогресс, с 312.
70. Региональная экономика: учеб. для вузов /под ред. Т.Г. Морозовой (2006) – 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, с 527.
71. Портер М (2005) Конкуренция. М.: Издательский дом «Вильямс», с 602.
72. Porter M (1998) Clusters and the new economics of competition. Harvard Business Review. November-December 1998, p 78–90.

73. Андерсон ВМ (2005) Геоменеджмент і геомаркетинг як інструменти сталого розвитку в умовах конкуренції регіонів. Науковий вісник 15(7):225–231.
74. Світличний ОО, Плотницький СВ (2006) Основи геоінформатики: Навчальний посібник. За заг. ред. Світличного ОО, Суми: ВТД «Університетська книга», с 295.
75. Білоус ВВ, Боднар СП, Курач ТМ, Молочко АМ, Патиченко ГО, Плісецька ІО (2011) Навчальний посібник упоряд. Курач ТМ, К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", с 367.
76. Розенберг ИН, Старостина ТА (2006) Решение задач размещения с нечеткими данными с использованием геоинформационных систем. М.: Научный мир, с 208.
77. Goodchild MF, Kemp KK, (eds) (2000) The NCGIA Core Curriculum in GIScience. NCGIA University of California, Santa Barbara CA. URL: <http://www.ncgia.ucsb.edu/>. Accessed 15 November 2017.
78. Трифонова ТА, Мищенко НВ, Краснощекоев АН (2005) Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях: Учебное пособие для вузов. М.: Академический Проект, с 352.
79. Чандра АМ, Гош СК (2008) Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, с 312.
80. Дорош ОС, Бутенко ЄВ, Купріяничук ІЛ (2015) Застосування даних дистанційного зондування Землі при вирішенні проблем управління землями сільськогосподарського призначення: наукова монографія. К: МВЦ «Медінформ», с 258.
81. Зацерковний ВІ (2014) Геоінформаційні системи і системи дистанційного зондування Землі в задачах ефективного землекористування. Математичне моделювання в економіці 1:40–48.
82. Офіційний сайт компанії ESRI Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.esri.com
83. Вестра Э. Разработка геоприложений на языке Python / пер. с англ. А. В. Логунова. - М: ДМК Пресс, 2017. - 446 с.: ил.
84. Laura Tateosian Python for ArcGIS. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 544 p.

85. Cowen D (1988) GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54:1551–1555.
86. Carver SJ (1991) Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 5:321–339.
87. Jankowski P (1995) Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. *International Journal of Geographical Information Systems* 9:251–273.
88. Malczewski J (1996) A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making. *International Journal of Geographical Information Systems* 10:955–971.
89. Яцало БИ, Диденко ВИ, Грицюк СВ, Мирзеабасов ОА, Пичугина ИА, Козьмин ГВ (2013) Управление землепользованием с применением многокритериальной системы поддержки принятия решений DECERNS. *Вестник Российской Академии Естественных Наук* 2:66–74.
90. Mat NA, Benjamin AM, Abdul-Rahman SA (2017) review on criteria and decision-making techniques in solving landfill site selection problems. *Journal of Advanced Review on Scientific Research* 37(1):14–32.
91. Feo GD, Gisi SD (2014) Using MCDA and GIS for hazardous waste landfill siting considering land scarcity for waste disposal. *Waste Management* 34(11):2225–2238. doi: 10.1016/j.wasman.2014.05.028.
92. Wang G, Qin L, Li G, Chen L (2009) Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management* 90(8):2414–2421. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.12.008.
93. Makan A, Malamis D, Assobhei O, Loizidou M, Mountadar M (2012) Multi-criteria decision analysis for the selection of the most suitable landfill site: case of Azemmour, Morocco. *International Journal of Management Science and Engineering Management* 7(2):96–109.
94. Shahabi H, Keihanfard S, Ahmad BB, Amiri MJT (2013) Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images. *Environmental Earth Sciences* 71(9):4221–4233. doi: 10.1007/s12665-013-2816-y.

95. Malczewski J (1999) GIS and multicriteria decision analysis. New York: Wiley, p 408.
96. Hwang CL., Yoon K (1981) Multiple attribute decision making: Methods and applications. Berlin: Springer,. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>. Accessed 25 November 2017
97. Gwo-Hshiung Tzeng, Jih-Jeng Huang (2011) Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Chapman and Hall/CRC, p 352.
98. Velasquez M, Hester PT (2013) An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. International Journal of Operations Research 10(2):56–66 .
99. Fonseca C (1995) Multiobjective Genetic Algorithms with Application to Control Engineering Problems. Ph.D. thesis, University of Sheffield.
100. Coello CC (2006) 20 years of evolutionary multiobjective optimization: What has been done and what remains to be done. Computational Intelligence: Principles and Practice: IEEE Computational Intelligence Society p 73–88.
101. Srinivas N, Deb K (1994) Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. Evolutionary Computation 2(3):221–248.
102. Kuznichenko S, Buchynska I, Kovalenko L, Gunchenko Y (2019) Suitable site selection using two-stage GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis. Advances in Intelligent Systems and Computing IV. Springer Nature Switzerland AG 2020. Shakhovska N and Medykovskyy MO (eds): CCSIT 2019, AISC, 1080:214–230. ISSN 2194-5357, https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_16 (Scopus)
103. Hwang CL, Yoon K (1981) Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer-Verlag.
104. Belton V, Stewart T (2002) Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers, p 372.
105. Zadeh L (1963) Optimality and non-scalar-valued performance criteria. IEEE Trans Automat Contr 8:59–60.
106. Malczewski J (2000). On the use of weighted liner combination method in GIS: Common and best practice approaches. Transactions in GIS 4(1):5–22.

107. Marler RT, Arora JS (2010) The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization* 41(6):853–862.
108. Saaty T (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
109. Saaty T (2002) Decision making with the analytic hierarchy process. *Scientia Iranica* 9(3):215–229.
110. Saaty T, Figueira F, Greco S, Ehrgott M (2005) The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London, p 345–408.
111. H. Ahmadi MS, Rad MN, Ibrahim O, Almaee A (2013) Ranking the micro level critical factors of electronic medical records adoption using TOPSIS method. *Health Informatics. An International Journal* 2(4):19–32.
112. Serafim Opricovic (1998) "Multicriteria Optimization in Civil Engineering" (in Serbian), Faculty of Civil Engineering, Belgrade, p 302. ISBN 86-80049-82-4.
113. Opricovic S, Tzeng G-H (2004) "The Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS". *European Journal of Operational Research* 156(2):445–455.
114. Bernard R (1968) "Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)". *La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)* 8:57–75.
115. Brans JP, Mareschal B, Vincke Ph. (1984) PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Operational Research*, North-Holland, Amsterdam, p 477–490.
116. Brans JP, Mareschal B, Vincke Ph (1986) How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research* 24(2):228–238.
117. Brans J, Mareschal B (2005) Promethee methods. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, p 163–195.
118. Eppe S, De Smet Y (2014) Approximating PROMETHEE II's net ow scores by piecewise linear value functions. *European journal of operational research* 233(3):651–659.

119. Ishizaka, A., Nemery, P., and Lidouh, K. (2013). Location selection for the construction of a casino in the greater london region: A triple multi criteria approach. *Tourism Management*, 34(0):pp. 211– 220.
120. Moffett, A. and Sarkar, S. (2006). Incorporating multiple criteria into the design of conservation area networks: a minireview with recommendations. *Diversity and Distributions*, 12(2):pp 125–137.
121. Sullivan, T., Yatsalo, B., Grebekov, A., and Linkov, I. (2009). Decision evaluation for complex risk network systems (decerns) software tool. *Decision Support Systems for Risk-Based Management of Contaminated Sites*, pages 257–274.
122. Buchynska I (2019) A GIS-based fuzzy multi-criteria analysis approach to industrial site selection. *Econtechmod. University of Engineering and Economics in Rzeszow, Rzeszów, Poland*, 8(3):17–22. ISSN 2084-5715.
123. Кузнiченко СД, Бучинська ІВ (2018) Використання нечіткої моделі обробки геопросторових даних в системі управління твердими побутовими відходами. *Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційні системи та технології"*, присвяченій 55-річчю кафедри Прикладної математики ХНУРЕ, 55-річчю кафедри Програмної інженерії ХНУРЕ та 40-річчю кафедри Прикладної математики та інформаційних технологій ХНУМГ імені О.М. Бекетова, Коблеве-Харків, 10–15 вересня 2018 р. с 174–178.
124. Ким Дж-О, Мьюллер, ЧУ Клекка УР (др.) (1989) *Факторный, дискриминантный и кластерный анализы* (пер. с англ. под. ред. Енюкова ИС). М, с 215
125. Заде ЛА (1976) *Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений*. М.: Мир, с 165
126. Заде ЛА (1980) *Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе*. Сб.: Классификация и кластер. М.: Мир, с 208–247.
127. Zadeh LA (1975) *Fuzzy logic and approximate reasoning*. *Synthese*, 30:407–428.
128. Zadeh LA (1973) *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes*. *IEEE Trans.Syst, Man, Cybern*, SMC-3:28–44.

129. Zadeh LA (1975) The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I, II, III.-Inf.Sci 8:199–257, P. 301–357.
130. Беллман Р, Заде ЛА (1976) Вопросы принятия решений в расплывчатых условиях. Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, с 172–215.
131. Shahabi H, Keihanfard S, Ahmad B, Amiri M. (2014) Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images, Journal of Environmental Earth Science 71(9):4241–4233.
132. Khorram A, Yousefi M, Alavi SA, Farsi J (2015) Convenient Landfill Site Selection by Using Fuzzy Logic and Geographic Information Systems: A Case Study in Bardaskan, East of Iran, Health Scope 4(1):1–9 doi: 10.17795/jhealthscope-19383.
133. Давлетбакова ЗЛ, Павлов СВ, Абдуллин АХ (2013) Информационная система поддержки принятия решений по управлению отходами на территории Республики Башкортостан на основе базы нечетких знаний. Электротехнические и информационные комплексы и системы 4(9):113–120.
134. Чернов ВГ (2005) Основы теории нечетких множеств. Решение задач многокритериального выбора альтернатив: уч. пособие. Владим. гос. ун-т. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, с 100.
135. Субботін СО (2008) Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: Навч. посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, с 341.
136. Кандель А, Байатт УД (1978) Нечеткие множества, нечеткая алгебра, нечеткая статистика. Труды американского общества инженеров-радиоэлектроников 66(12):37–61.
137. Борисов АН, Алексеев АВ, Меркурьева ГВ (др) (1989) Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.:Радио и связь, с 304.
138. Павлов АН, Соколов БВ (2006) Принятие решений в условиях нечеткой информации: уч. пособие. ГУАП – СПб, с 72. ISBN 5-8088-0162-1.

139. Алексеев АВ (1979) Интерпретация и определение функций принадлежности нечетких множеств. Методы и системы принятия решений. Рига, с 42–50.
140. Buchynska I (2018) A GIS-based decision support system for placing solid waste landfill. Monograph. Processing, Transmission and Security of Information, vol 2. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Poland. p 33–40
141. Kuznichenko S, Buchynska I (2018) Using the GIS technologies and fuzzy logic methods to support decision-making on placing landfills for solid waste. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук», м. Одеса, 6–8 червня 2018 р. с 9–13.
142. Shannon, C. E., & Weaver, W. (1947). The mathematical theory of communication. Urbana: The University of Illinois Press.
143. Yager R (1988) “On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making”, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics 18:183–190.
144. Аверченков ВИ Лагереv АВ, Подвесовский АГ (2012) Представление и обработка нечеткой информации в многокритериальных моделях принятия решений для задач управления социально-экономическими системами. Вестн. Брян. гос. техн. ун-та 2(34):97–104.
145. Yager, R. R. (1996). Quantifier guided aggregation using OWA
146. Кузнiченко СД, Бучинська ІВ (2019) Вибір операторів агрегування для багатокритеріальної оцінки придатності територій. Кiбербезпека: освіта, наука, техніка, 2019. – Том 2 № 6. – С.46–56.
147. Кузнiченко СД, Бучинська ІВ, Коваленко ЛБ (2019) Використання OWA-оператора Ягера з нечіткими квантифікаторами в ГiС-орієнтованих багатокритеріальних моделях прийняття рішень. Матеріали 8-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційні системи та технології", Коблеве-Харків, 9–14 вересня 2019 р. с 113–116.
148. Карпенко МЮ, Манакова НО, Гавриленко Ю (2017) Технології створення програмних продуктів та інформаційних систем: навч.

- посібник; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, с 93.
149. Томашевський ОМ, Цегелик ГГ, Вітер МБ, Дудук ВІ (2012) Інформаційні технології та моделювання бізнес-процесів: навч. посіб. К.: Центр учбової літератури, с 296.
 150. Данченко ОБ (2017) Практичні аспекти реінжинірингу бізнес-процесів. К.: Університет економіки та права «КРОК», с 238.
 151. ДБН В.2.4-2 (2005) України. Проектування. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. URL:<http://profidom.com.ua/v-2/v-2-4/1703-dbn-v-2-4-2-2005-poligoni-tverdih-robutovih-vidkhodivosnovni-polozhenna-projektuvanna>. Доступ 05 червня 2018.
 152. Шипулин ВД (2005) Введение в использование ArcGIS. Учебно-методическое пособие. Харьков: ХНАГХ, с 258.
 153. Learn ArcGIS (2018) URL: <https://learn.arcgis.com/en/>. Доступ 10 травня 2018.
 154. OpenStreetMap Україна (2016) URL: <https://openstreetmap.org.ua/>. Доступ 15 травня 2018.
 155. OpenStreetMap Вікіпедія (2018) URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap>. Доступ 15 травня 2018
 156. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement (2012) URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov>. Доступ 18 травня 2018
 157. Павленко ЛА (2013) Геоінформаційні системи: навчальний посібник. Х.: Вид. ХНЕУ, с 260.
 158. Amirian P (2013) Beginning ArcGIS for Desktop development using .NET. John Wiley & Sons, Ltd, p 532.
 159. Petry FE (1996) Fuzzy Databases: Principles and Applications. Kluwer Academic Publishers Norwell, Boston, MA. USA, p 240.
 160. Robinson V, Bordogna G, Pasi G (2000) On Fuzzy Sets and the Management of Uncertainty in an Intelligent Geographic Information System. Physica-Verlag, Heidelberg, GR, p109–128.
 161. Zandbergen PA (2015) Python Scripting for ArcGIS. Redlands. US:Esri Press, p 343.
 162. Буч Г, Рамбо Д, Джекобсон А (2001) Язык UML. Руководство пользователя. М.: ДМК Пресс, с 432.

163. Фаулер М, Скотт К (2002) UML. Основы. СПб.: Символ–Плюс, с 192.
164. Quatrani T (2002) Visual Modeling with Rational Rose and UML. Addison–Wesley Professional, 3 edn, 19October, p 288.
165. Державна служба статистики України. Поводження з побутовими та подібними відходами в Україні (2011–2017). (2018) URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2013/ns_rik/ns_u/pzppv_2013_u.html. Доступ 20 жовтня 2018.
166. Екологія та екологічна економіка: нормативні акти і інформаційні матеріали (2017). Інформаційний бюлетень К.: Державна наукова установа «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації», вип4. с 78.
167. Сафранов ТА, Губанова ЕР, Шанина ТП (2016) Реализация кластерной стратегии в сфере обращения с твердыми бытовыми отходами. Глобальні та національні проблеми економіки. МНУ ім. В.О.Сухомлинського 10:648–652.
168. Козаченко ТП (2010) Запровадження геоінформаційної системи як інструменту для прийняття ефективних державно-управлінських рішень у сфері поводження з ТПВ в Україні. Актуальні проблеми державного управління: зб. наук. праць ОРІДУ. Одеса: ОРІДУ НАДУ 1(41):77–80.
169. Проект USAID “Муніципальна енергетична реформа в Україні”. Звіт з аналізу існуючого стану системи поводження з ТПВ в Одеській області за 2013-2017 р. URL: <http://oblrada.odessa.gov.ua/wp-content/uploads/03-21-VII.pdf>. Доступ 25 жовтня 2017.
170. Програма поводження з твердими побутовими відходами в Одеській області на 2018-2022. URL: <http://oblrada.odessa.gov.ua/wp-content/uploads/03-21-VII.pdf>. Доступ 18 грудня 2017.
171. ДСТУ 2195-99 (ГОСТ 17.9.0.2-99). Охорона природи. Поводження з відходами. Технічний паспорт відходу. Склад, вміст, викладення і правила внесення змін. На заміну ДСТУ 2195-93 (ГОСТ 17.0.0.05-93)
172. Сафранов ТА, Черкез ЄА, Шаталін СМ (2018) Оцінка сприятливості територій Одеської області для розміщення полігонів

твердих побутових відходів. Український гідрометеорологічний журнал 21:98–109.

173. Сафранов ТА, Приходько ВЮ, Шаніна ТП (2016) Проблема розміщення відходів на звалищах та полігонах Одеської області. Вісник Харківського національного університету імені Каразіна ВН. Серія: Екологія 14:83–90.
174. Шаніна ТП, Губанова ОР, Клименко МО, Сафранов ТА, Коріневська ВЮ, Бедункова ОО, Волков АІ (2012) Управління та поводження з відходами. Одеськ. Держ. Екологічний університет. Одеса. ТЕС, с 272.

ДОДАТОК А

ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГЕОПРОСТОРОВОГО БКАР З РОЗМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ТПВ

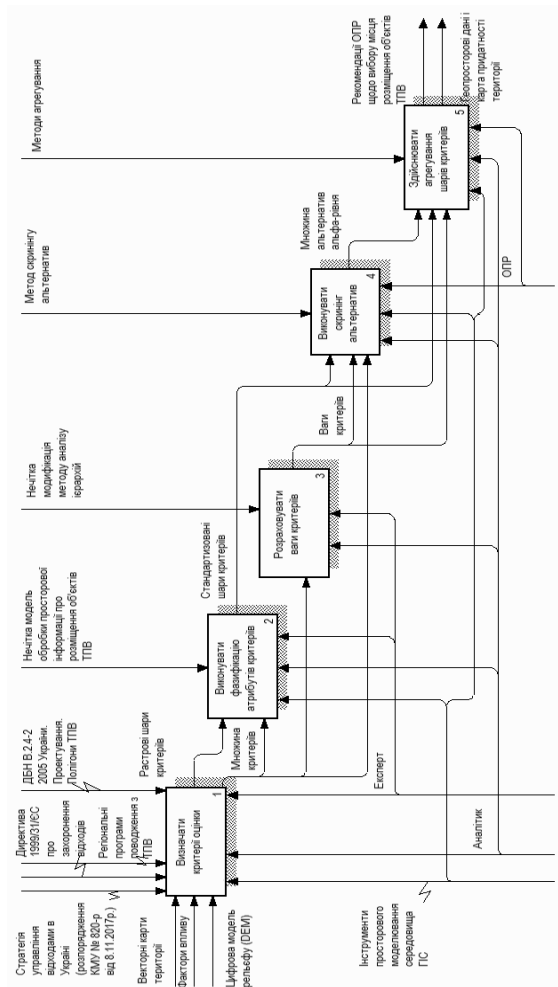


Рисунок А.1 – Декомпозиція контекстної діаграми процесу БКАР по розміщенню об'єктів ТПВ

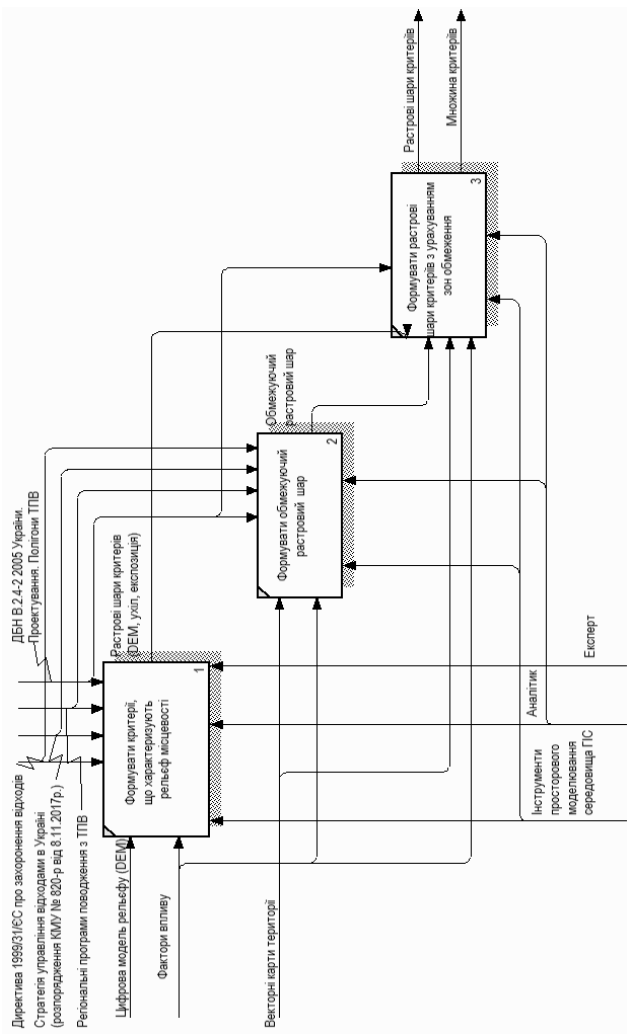


Рисунок А.2 – Декомпозиція процесу «Визначати критерії оцінки»

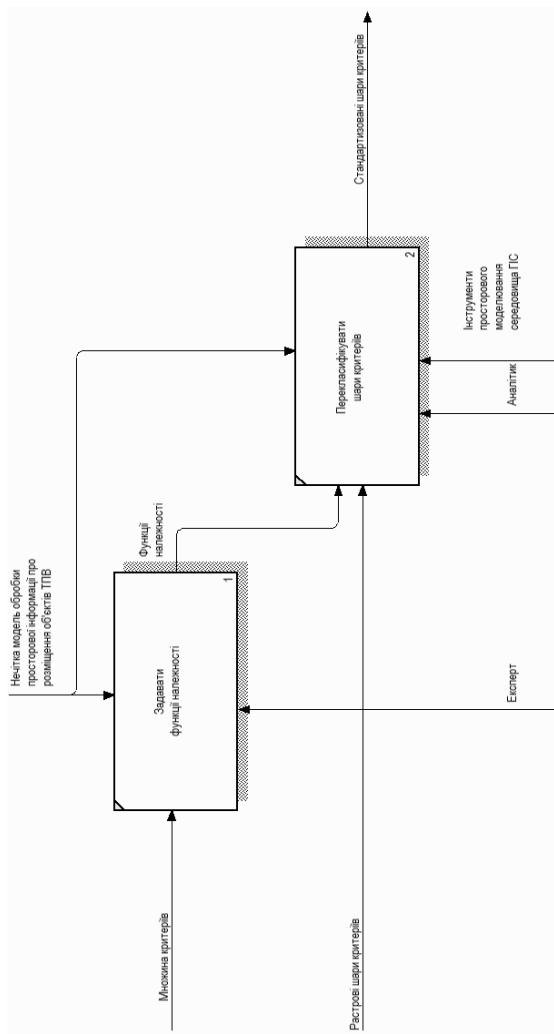


Рисунок А.3 – Декомпозиція процесу «Виконувати фазифікацію атрибутів критеріїв»

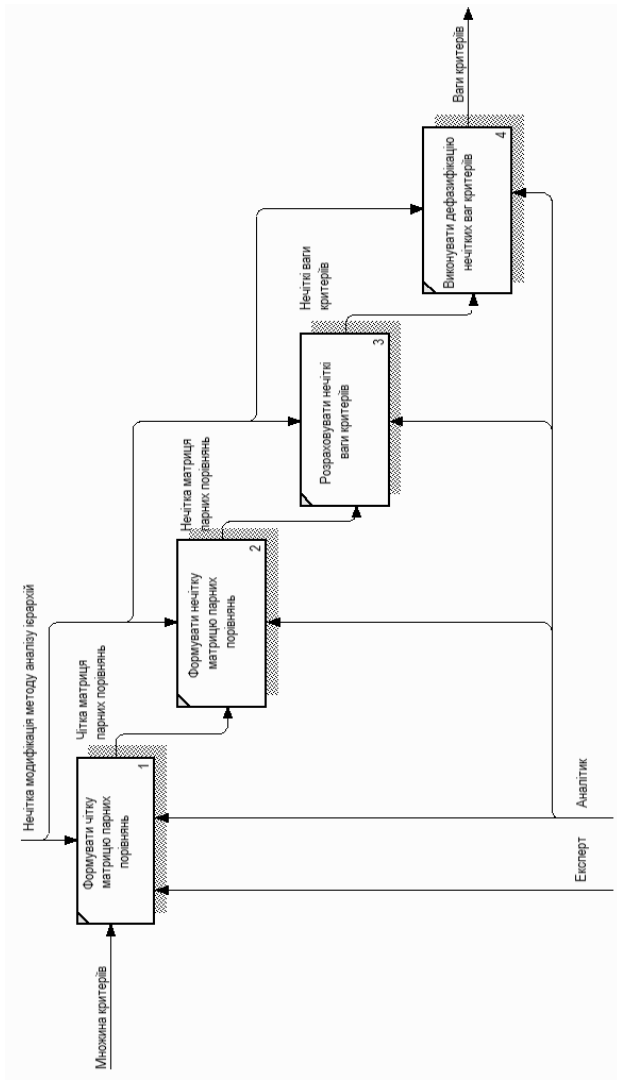


Рисунок А.4 – Декомпозиція процесу «Розрахувати ваги критеріїв»

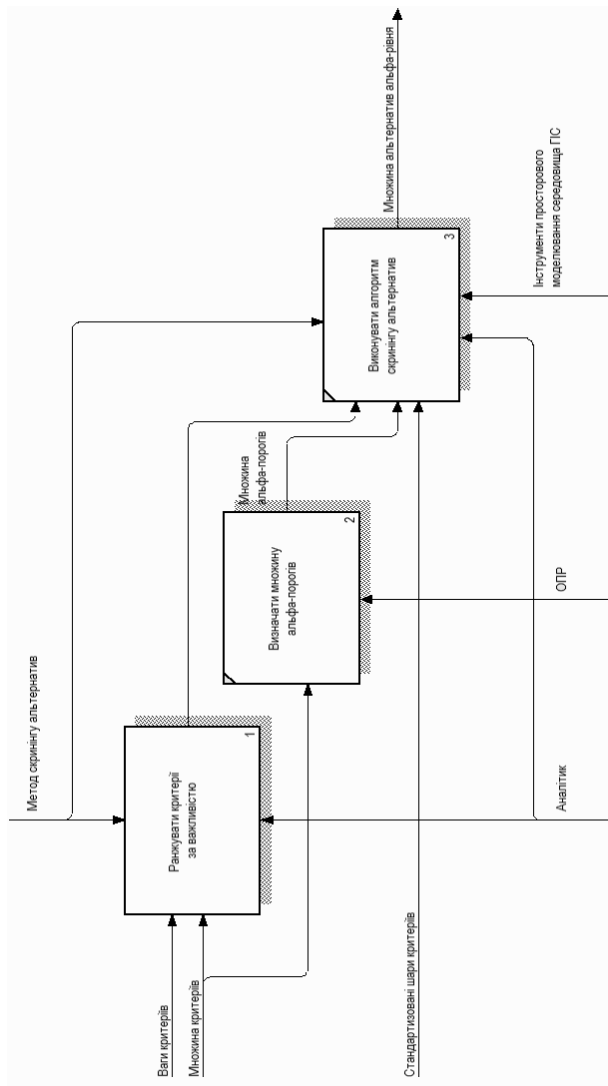
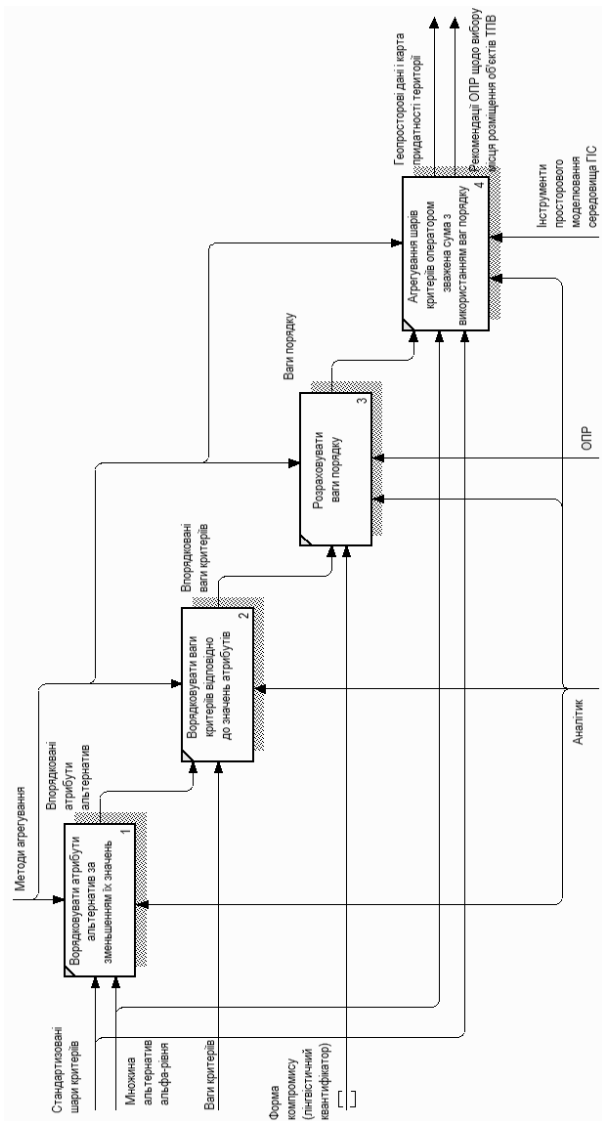
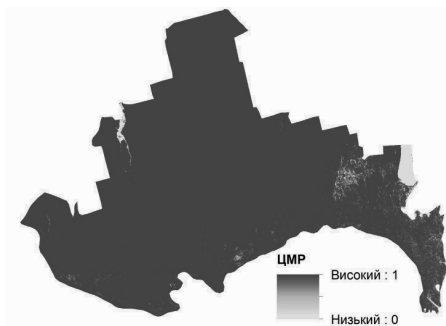


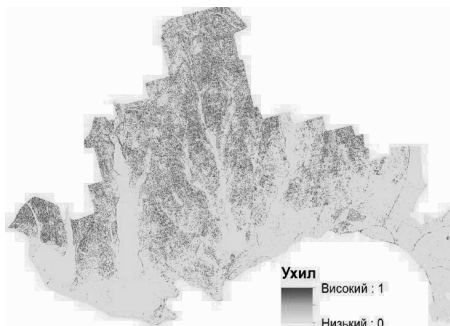
Рисунок А.5 – Декомпозиція процесу «Виконувати скрінгінг альтернатив»



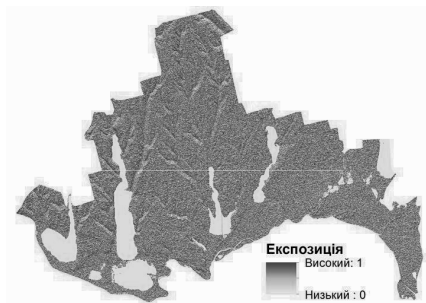
ДОДАТОК Б
РАСТРИ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЇ



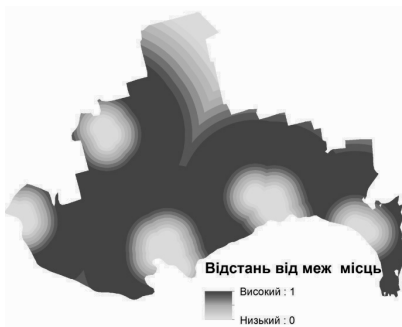
(а)



(б)



(в)

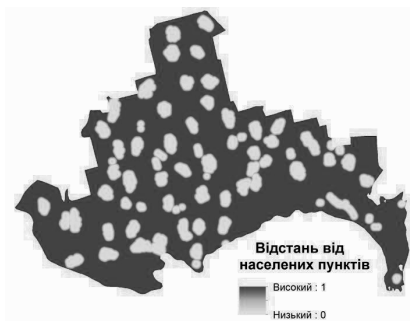


(г)

Рисунок Б.1 – Растри функцій належності, отримані при розрахунку придатності територій для розміщення полігонів ТПВ на півдні Одеської області:
цифрова модель рельєфу (а), ухил (б), експозиція (в),
відстань від меж великих міст (г)



(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок Б.2 – Растри функцій належності, отримані при розрахунку придатності територій для розміщення полігонів ТПВ на півдні Одеської області: відстань від дорожньої мережі (а), відстань від населених пунктів (б), землекористування (в), глибина залягання ґрунтових вод (г)

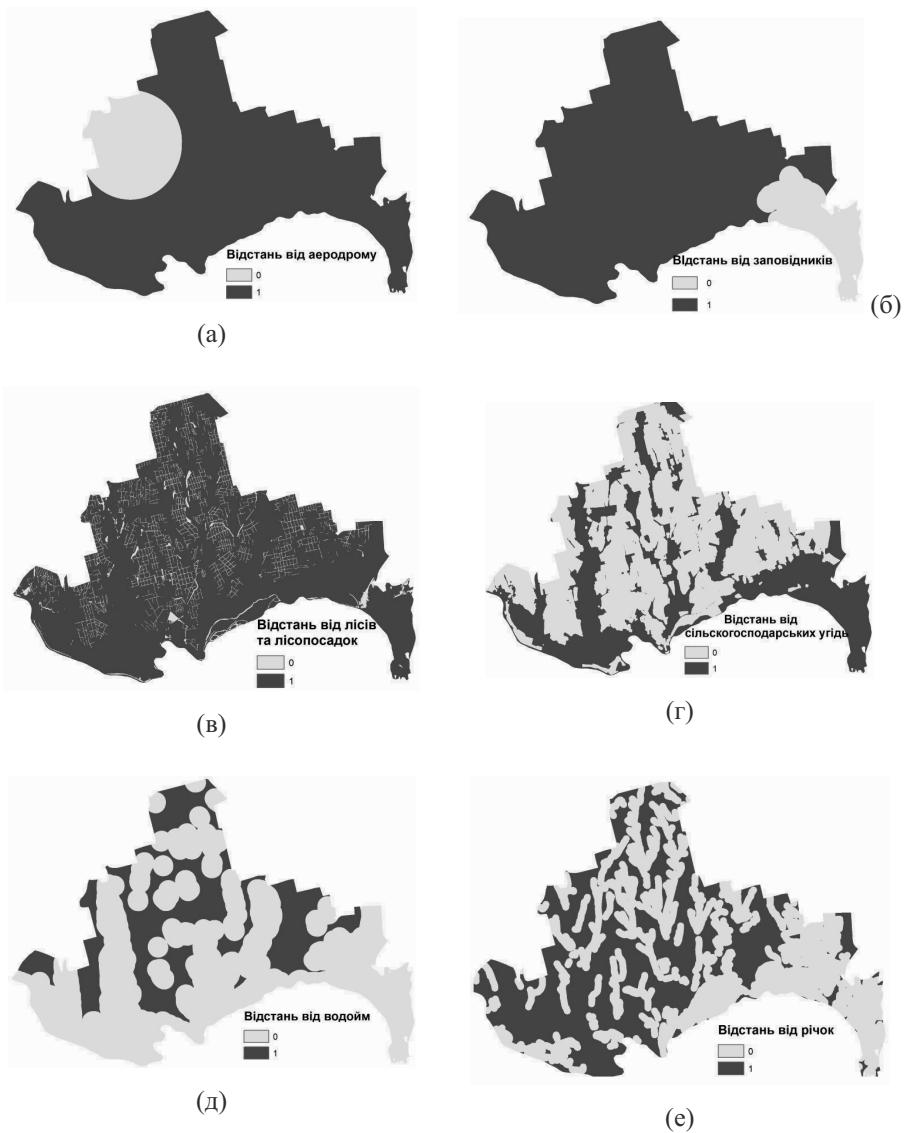


Рисунок Б.3 – Растри обмежувальних зон:
від аеродрому (а), від заповідників (б), від лісів та лісосадов (в), від
сільськогосподарських угідь (г), від водойм (д), від річок (е)

ДОДАТОК В

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНОКУ ВАГ КРИТЕРІЇВ

В табл. В.1 представлена нечітка матриця попарних порівнянь для трьох критеріїв (фізичні, екологічні, еколого-економічні) першого рівня ієрархічної структури (рис. 4.13).

Таблиця В.1– Матриця парних порівнянь для критеріїв

Критерії	F	E	S
F: Фізичні	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1)	(1/3, 1/2, 1)
E: Екологічні	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)
S: Еколого-економічні	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)	(1, 1, 1)

Відносні нечіткі ваги кожного критерію (2.50), а також чітка вага кожного критерію M_i (2.51) і нормовані ваги w_i (2.52) наведені у табл. В.2.

Таблиця В.2 – Відносні нечіткі ваги і нормовані відносні ваги кожного критерію

Критерії	\tilde{w}_i			M_i	w_i
F: Фізичні	0.106	0.196	0.460	0.254	0.214
E: Екологічні	0.221	0.493	0.957	0.557	0.469
S: Еколого-економічні	0.153	0.311	0.663	0.376	0.317

Нижче наведені матриці парних порівнянь: \tilde{A}_F – для групи фізичних критеріїв (табл. В.3), \tilde{A}_E – для групи екологічних критеріїв (табл. В.4), \tilde{A}_S – для групи еколого-економічних критеріїв (табл. В.5).

Таблиця В.3 – Матриця парних порівнянь для підкритеріїв групи фізичних критеріїв

Критерії	F1	F2	F3
F1	(1, 1, 1)	(1/4, 1/3, 1/2)	(4, 5, 6)
F2	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)	(7, 8, 9)
F3	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/9, 1/8, 1/7)	(1, 1, 1)

Таблиця В.4 – Матриця парних порівнянь \tilde{A}_E для підкритеріїв групи екологічних критеріїв

Критерії	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
E1	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)
E2	(1/3, 1/2, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
E3	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 2, 3)	(1, 2, 1)	(1, 2, 3)
E4	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(3, 4, 5)
E5	(1/3, 1/2, 1)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
E6	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1)	(1/5, 1/4, 1/3)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
E7	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1)	(1/5, 1/4, 1/3)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)

Таблиця В.5 – Матриця парних порівнянь \tilde{a}_s для підкритеріїв групи еколого-економічних критеріїв

Критерії	S1	S2	S3	S4
S1	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(1/3 1/2, 1)	(4, 5, 6)
S2	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/6, 1/5, 1/4)	(2, 3, 4)
S3	(1, 2, 3)	(4, 5, 6)	(1, 1, 1)	(5, 6, 7)
S4	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1/7, 1/6, 1/5)	(1, 1, 1)

Відносні нечіткі ваги, а також чітка вага M_i і нормовані ваги w_i , що були розраховані для кожного підкритерію наведені у табл. В.6.

Таблиця В.6 – Нормовані ваги підкритеріїв

Критерії	\tilde{w}_i	M_i	w_i
F1	(0.197, 0.272, 0.392)	0.287	0.277
F2	(0.475, 0.661, 0.899)	0.678	0.655
F3	(0.052, 0.067, 0.090)	0.070	0.067
E1	(0.102, 0.188, 0.332)	0.208	0.191
E2	(0.069, 0.096, 0.148)	0.104	0.096
E3	(0.080, 0.143, 0.237)	0.154	0.141
E4	(0.181, 0.327, 0.549)	0.352	0.323
E5	(0.059, 0.087, 0.148)	0.098	0.090
E6	(0.055, 0.079, 0.127)	0.087	0.080
E7	(0.055, 0.079, 0.127)	0.087	0.080
S1	(0.188, 0.305, 0.526)	0.340	0.315
S2	(0.079, 0.123, 0.200)	0.134	0.124
S3	(0.311, 0.512, 0.796)	0.540	0.501
S4	(0.041, 0.060, 0.095)	0.065	0.060

ДОДАТОК Г
ДІАГРАМА СЦЕНАРІЇВ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ
РІШЕНЬ З РОЗМІЩЕННЯ ПОЛІГОНУ ТПВ



Рисунок Г.1 – Діаграма сценаріїв багатокритеріального аналізу рішень з розміщення полігону ТПВ

ДОДАТОК Г

ПРОГРАМНИЙ КОД НАБОРУ ІНСТРУМЕНТІВ PYTHON

```
#Importing Libraries
import arcpy, os
import numpy as np
import numpy
from array import array
import math

class Toolbox(object):
    def __init__(self):
        """Define the toolbox (the name of the toolbox is the
        name of the
        .pyt file)."""
        self.label = "Toolbox"
        self.alias = ""
        # List of tool classes associated with this toolbox
        self.tools = [LimitsRaster, EucDistance, MatrixCreator,
                      FuzzyAHP, FuzzyReclassy, Screening]

#Інструмент розрахунку обмежувального растру
class LimitsRaster(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of
        the class)."""
        self.label = " LimitsRaster"
        self.description = ""
        self.canRunInBackground = False

    def getParameterInfo(self):
        param2 = arcpy.Parameter(
            displayName='Output Merge',
            name='out_mergefc',
            datatype="DEFeatureClass",
            parameterType='Required',
            direction='Output')
        param3 = arcpy.Parameter(
            displayName='Output Raster',
            name='out_raster',
            datatype="GPRasterLayer",
            parameterType='Required',
            direction='Output')
        param4 = arcpy.Parameter(
            displayName='Output ReclassRaster',
            name='out_reclassraster',
            datatype="GPRasterLayer",
            parameterType='Required',
```

```

        direction = 'Output')
param5 = arcpy.Parameter(
    displayName = 'Mask',
    name = 'in_mask',
    datatype = "DEFeatureClass",
    parameterType = 'Required',
    direction = 'Input')
param0 = arcpy.Parameter(
    displayName = 'Input Workspase',
    name = 'in_workspace',
    datatype = "DEFeatureDataset",
    parameterType = 'Required',
    direction = 'Input')
param1 = arcpy.Parameter(
    displayName='Feature Class(es)',
    name='in_fc',
    datatype='GPValueTable',
    parameterType='Required',
    direction='Input')
param1.parameterDependencies = [param0.name]
param1.columns = [['DEFeatureClass', 'Input'],
                  ['GPLong', 'Distance']]
param1.filters[1].type = 'ValueList'
#param1.values = [['NAME', 'SUM']]
param1.filters[1].list =
    [50,100,200,500,1000,1500,2000,3000]
return [param0, param1, param2, param3, param4, param5]
def isLicensed(self):
    """Set whether tool is licensed to execute."""
    return True
def updateParameters(self, parameters):
    """Modify the values and properties of parameters before
    internal validation is performed. This method is called
    whenever a parameter has been changed."""
    return
def updateMessages(self, parameters):
    """Modify the messages created by internal validation for
    each
    tool parameter. This method is called after internal
    validation."""
    return
def execute(self, parameters, messages):
    """The source code of the tool."""
    rows = parameters[1].valueAsText.split(";")
    buf = []
    # Execute Buffer

```

```

for row in rows:
    val = row.split(" ")
    arcpy.Buffer_analysis(val[0], os.path.join(val[0] +
                                                "_Buffer"), val[1] + " Meters")
    buf.append(os.path.join(val[0] + "_Buffer"))
# Execute Merge
arcpy.Merge_management(buf,parameters[2].valueAsText)
#arcpy.AddMessage(buf)
tempEnvironment0 = arcpy.env.mask
arcpy.env.mask = parameters[5].valueAsText
# Set local variables
inFeatures = parameters[2].valueAsText
outRaster = parameters[3].valueAsText
valField = "OBJECTID"
assignmentType = "MAXIMUM_AREA"
priorityField = "NONE"
cellSize = 27
# Execute PolygonToRaster
arcpy.PolygonToRaster_conversion(inFeatures, valField,
                                outRaster, assignmentType, priorityField, cellSize)
arcpy.env.mask = tempEnvironment0
# Process: Get Raster Properties
max = arcpy.GetRasterProperties_management(outRaster,
                                           "MAXIMUM", "")
min = arcpy.GetRasterProperties_management(outRaster,
                                           "MINIMUM", "")
arcpy.gp.Reclassify_sa(outRaster, "Value", str(min) + " " +
str(max) + " NODATA;NODATA 1", parameters[4].valueAsText,
                       "DATA")
# Process: Extract by Mask
arcpy.gp.ExtractByMask_sa(parameters[4].valueAsText,
parameters[5].valueAsText, parameters[4].valueAsText +
                           "_MASK")

return

```

#Інструмент розрахунку растрів евклідової відстані

```

class EucDistance(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of the class)."""
        self.label = " EucDistance "
        self.description = ""
        self.canRunInBackground = False
    def getParameterInfo(self):
        param2 = arcpy.Parameter(
            displayName='Mask',
            name='in_mask',
            datatype="DEFeatureClass",

```

```

        parameterType ='Required',
        direction ='Input')
param0 = arcpy.Parameter(
    displayName ='Input Workspase',
    name ='in_workspace',
    datatype ="DEFeatureDataset",
    parameterType ='Required',
    direction ='Input')
param1 = arcpy.Parameter(
    displayName='Feature Class(es)',
    name='in_fc',
    datatype='GPValueTable',
    parameterType='Required',
    direction='Input')
param1.parameterDependencies = [param0.name]
param1.columns = [['DEFeatureClass', 'Input']]
return [param0, param1, param2]
def isLicensed(self):
    """Set whether tool is licensed to execute."""
    return True
def updateParameters(self, parameters):
    """Modify the values and properties of parameters before
    Internal validation is performed. This method is called
    whenever a parameter has been changed."""
    return
def updateMessages(self, parameters):
    """Modify the messages created by internal validation for
each
    tool parameter. This method is called after internal
    validation."""
    return
def execute(self, parameters, messages):
    # Process: Euclidean Distance
    Output_direction_raster = ""
    Output_back_direction_raster = ""
    rows = parameters[1].valueAsText.split(";")
    for row in rows:
        val = row.split(" ")
        EucDist = arcpy.sa.EucDistance(val[0], 6000, 27,
            os.path.join(val[0] + "_EucDirect"))
        EucDist.save(os.path.join(val[0] + "_EucD"))
    # Process: Extract by Mask
    arcpy.gp.ExtractByMask_sa(os.path.join(val[0] + "_EucD"),
    parameters[2].valueAsText, os.path.join(val[0] +
        "_EucDist"))
Return

```

#Інструмент створення матриці парних порівнянь для методу аналізу ієрархій

```
class MatrixCreator(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of the class)."""
        self.label = "MatrixCreator"
        self.description = ""
        self.canRunInBackground = False
    def getParameterInfo(self):
        param0 = arcpy.Parameter(
            displayName='Input Criteria',
            name='in_criteria',
            datatype='GPValueTable',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param1 = arcpy.Parameter(
            displayName='GeoDatabase',
            name='in_geodatabase',
            datatype='DEWorkspace',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param2 = arcpy.Parameter(
            displayName='Table Name',
            name='in_tablename',
            datatype='GPString',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param0.columns = [['GPString', 'Input']]
        param0.filters[0].type = 'ValueList'
        param0.filters[0].list =
            ['ЦМР', 'Ухил', 'Експозиція', 'Відстань від
            водойм', 'Відстань від річок', 'Землекористування',
            'Грунтові води', 'Відстань від с/г угідь', 'Відстань від
            лісів', 'Відстань від заповідників', 'Відстань від меж
            міст', 'Відстань від житлової забудови', 'Відстань від
            залізничних та авто шляхів', 'Відстань від аеродромів']
        return [param0, param1, param2]
    def isLicensed(self):
        """Set whether tool is licensed to execute."""
        return True
    def updateParameters(self, parameters):
        """Modify the values and properties of parameters before
        Internal validation is performed. This method is called
        whenever a parameter has been changed."""
        return
    def updateMessages(self, parameters):
```



```

        """Modify the messages created by internal validation for
each
        Tool parameter. This method is called after internal
        validation."""
        return
def execute(self, parameters, messages):
    geodatabase = parameters[1].valueAsText
    tablename = parameters[2].valueAsText
    #Creating a new table
    arcpy.CreateTable_management (geodatabase, tablename)
    tablepath=os.path.join(geodatabase + "\\\" + tablename)
    #Adding the first column
    arcpy.AddField_management (tablepath,"layername","TEXT")
    rows = parameters[0].valueAsText.split(";")
    for row in rows:
        arcpy.AddField_management (tablepath,row,"DOUBLE")
    cursor = arcpy.da.InsertCursor(tablepath, ["layername"])
    for row in rows:
        cursor.insertRow([row])
    del cursor
    return
#Інструмент розрахунку ваг критеріїв нечітким методом аналізу ієрархій
class FuzzyAHP(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of the class)."""
        self.label = " FuzzyAHP"
        self.description = ""
        self.canRunInBackground = False
    def getParameterInfo(self):
        param0 = arcpy.Parameter(
            displayName='Table Path',
            name='in_tablepath',
            datatype='DETable',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        return [param0]
    def isLicensed(self):
        """Set whether tool is licensed to execute."""
        return True
    def updateParameters(self, parameters):
        """Modify the values and properties of parameters before
        Internal validation is performed. This method is called
        whenever a parameter has been changed."""
        return
    def updateMessages(self, parameters):

```

```

each      """Modify the messages created by internal validation for
          tool parameter. This method is called after internal
          validation."""
          return
def execute(self, parameters, messages):
    tablepathC=parameters[0].valueAsText
    arcpy.Copy_management(tablepathC,tablepathC + 'CI')
    tablepath=str(tablepathC)+'CI'
    arr = arcpy.da.TableToNumPyArray(tablepath,"*")
    Cursor=arcpy.da.SearchCursor(tablepath,"*")
    l=0
    for row in Cursor:
        l=l+1
        j = list(row[2:30])
        if l==1:
            u=np.array(j)
        else:
            u = numpy.vstack([u, j])
    del Cursor
    arcpy.AddMessage(u)
    d=u.sum(axis=0)
    arcpy.AddMessage(d)
    Matsize=math.sqrt(u.size)
    #Error Trap1
    if Matsize<2:
        arcpy.AddError("The Min. number of raster layers is 2.
            You cannot continue")
    g=u*(1/d)
    k=(1/Matsize)*(g.sum(axis=1))
    ws=numpy.dot(u,k.T)
    hh=ws*(1/k)
    lamda=hh.mean()
    Matsize=math.sqrt(u.size)
    #Error Trap2
    if Matsize<2:
        arcpy.AddError("The Min. number of raster layers is 2.
            You cannot continue")
    ci=(lamda-Matsize)/(Matsize-1)
    #adding fields
    arcpy.AddField_management(tablepath,"weight","DOUBLE")
    arcpy.AddField_management(tablepath,"CI","DOUBLE")
    arcpy.AddField_management(tablepath,"RI","DOUBLE")
    arcpy.AddField_management(tablepath,"CR","DOUBLE")
    arcpy.AddField_management(tablepath,"Notes","TEXT")
    # filling the "weight" column

```

```

cursor2 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["weight"])
n=0
for row2 in cursor2:
    cursor2.updateRow([k[n]])
    n=n+1
del cursor2
# filling the "CI" column
cursor3 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["CI"])
n=0
for row3 in cursor3:
    cursor3.updateRow([ci])
    n=n+1
del cursor3
# filling the "RI" column
cursor4 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["RI"])
n=0
RItable = {'1.0': 0, '2.0': 0, '3.0': 0.52, '4.0': .89,
           '5.0':
1.12, '6.0': 1.26, '7.0': 1.36, '8.0': 1.41, '9.0':1.46
           , '10.0':
1.49, '11.0': 1.52, '12.0':1.54 , '13.0':1.56, '14.0':1.58 ,
           '15.0': 1.59}
CISRTING=str(Matsize)
for row4 in cursor4:
    cursor4.updateRow([RItable[CISRTING]])
    n=n+1
del cursor4
CR=ci/RItable[CISRTING]
# filling the "CR" column
cursor5 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["CR"])
n=0
for row5 in cursor5:
    cursor5.updateRow([CR])
    n=n+1
del cursor5
# filling the "Notes" column
cursor6 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["Notes"])
n=0
for row6 in cursor6:
    if CR<=1:
        cursor6.updateRow(["The matrix is considered to
                           be consistent enough."])
    else:
        cursor6.updateRow(["The comparison matrix
                           should be improved."])
    n=n+1

```

```

del cursor6
if CR<=1:
    a = [0.111, 0.125, 0.143, 0.167, 0.200, 0.250, 0.333,
          0.500, 1]
    matrix = [[0 for y in range(int(Matsize)*3)] for x in
range(int(Matsize))]
    for x in range(int(Matsize)):
        y=0
        for c in range(int(Matsize)):
            if u[x][c]==1:
                for j in range(3):
                    matrix[x][y] = 1
                    y = y+1
            else:
                if u[x][c]>1:
                    matrix[x][y] = u[x][c]-1
                    y = y+1
                    matrix[x][y] = u[x][c]
                    y = y+1
                    matrix[x][y] = u[x][c]+1
                    y = y+1
                else:
                    matrix[x][y] =
a[a.index(round(u[x][c],3))- 1]
                    y = y+1
                    matrix[x][y] = round(u[x][c],3)
                    y = y+1
                    matrix[x][y] =

a[a.index(round(u[x][c],3))+1]
                    y = y+1
r = [[0 for y in range(3)] for x in range(int(Matsize))]
for x in range(int(Matsize)):
    for y in range(3):
        p = 1
        c = y
        for i in range(int(Matsize)):
            p = p*matrix[x][c]
            c = c + 3
        r[x][y] = math.pow(p,0.333333)
m = [0 for i in range(int(Matsize))]
for i in range(3):
    m[i] = 0
    for x in range(int(Matsize)):
        m[i] = m[i] + r[x][i]

```

```

    m[i] = 1/m[i]
m.sort()
for x in range(int(Matsize)):
    for y in range(3):
        r[x][y] = r[x][y]*m[y]
for x in range(int(Matsize)):
    m[x] = 0
    for y in range(3):
        m[x] = m[x] + r[x][y]
    m[x] = m[x]/3.0
sum = 0
for x in range(int(Matsize)):
    sum = sum + m[x]
w = [0 for i in range(int(Matsize))]
for x in range(int(Matsize)):
    w[x] = m[x]/sum
#adding fields
arcpy.AddField_management(tablepath,"w1","TEXT")
arcpy.AddField_management(tablepath,"w2","DOUBLE")
arcpy.AddField_management(tablepath,"w3","DOUBLE")
arcpy.AddField_management(tablepath,"M","DOUBLE")
arcpy.AddField_management(tablepath,"W","DOUBLE")
# filling the "w1" column
cursor7 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["w1"])
n=0
for row7 in cursor7:
    cursor7.updateRow([(r[n][0])])
    n=n+1
del cursor7
# filling the "w2" column
cursor8 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["w2"])
n=0
for row8 in cursor8:
    cursor8.updateRow([(r[n][1])])
    n=n+1
del cursor8
# filling the "w3" column
cursor9 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["w3"])
n=0
for row9 in cursor9:
    cursor9.updateRow([(r[n][2])])
    n=n+1
del cursor9
# filling the "M" column
cursor10 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["M"])
n=0

```

```

        for row10 in cursor10:
            cursor10.updateRow([(m[n])])
            n=n+1
        del cursor10
        # filling the "W" column
        cursor11 = arcpy.da.UpdateCursor(tablepath, ["W"])
        n=0
        for row11 in cursor11:
            cursor11.updateRow([(w[n])])
            n=n+1
        del cursor11
    else:
        arcpy.AddMessage("The comparison matrix should be
                                                                    improved.")

    return

#Інструмент фазифікації шарів критеріїв
class FuzzyReclassy(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of the class)."""
        self.label = "FuzzyReclassy"
        self.description = ""
        self.canRunInBackground = False
    def getParameterInfo(self):
        param0 = arcpy.Parameter(
            displayName='Input Raster',
            name='in_raster',
            datatype='GPRasterLayer',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param1 = arcpy.Parameter(
            displayName='Fuzzy Membership',
            name='in_fm',
            datatype='GPString',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param1.filter.type = 'ValueList'
        param1.filter.list = ['Трапецевидна ФН', 'Монотонно спадна
        ФН', 'Монотонно зростаюча ФН']
        param2 = arcpy.Parameter(
            displayName='a',
            name='in_a',
            datatype='GPLong',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param3 = arcpy.Parameter(
            displayName='b',

```

```

        name='in_b',
        datatype='GPLong',
        parameterType='Required',
        direction='Input')
param4 = arcpy.Parameter(
    displayName='c',
    name='in_c',
    datatype='GPLong',
    parameterType='Required',
    direction='Input')
param5 = arcpy.Parameter(
    displayName='d',
    name='in_d',
    datatype='GPLong',
    parameterType='Required',
    direction='Input')
return [param0, param1, param2, param3, param4, param5]
def isLicensed(self):
    """Set whether tool is licensed to execute."""
    return True
def updateParameters(self, parameters):
    """Modify the values and properties of parameters before
    internal validation is performed. This method is called whenever a
    parameter has been changed."""
    return
def updateMessages(self, parameters):
    """Modify the messages created by internal validation for
    each tool parameter. This method is called after internal
    validation."""
    return

def execute(self, parameters, messages):
    outRaster = parameters[0].valueAsText
    max = arcpy.GetRasterProperties_management(outRaster,
                                                "MAXIMUM", "")
    min = arcpy.GetRasterProperties_management(outRaster,
                                                "MINIMUM", "")

    a = parameters[2].valueAsText
    b = parameters[3].valueAsText
    c = parameters[4].valueAsText
    d = parameters[5].valueAsText
    type = parameters[1].valueAsText
    if type == 'Трапецевидна ФН':
        step = (int(b) - int(a))/10.0
        z1 = [0 for i in range(10)]
        z1[0] = round(int(a),2)

```

```

st = str(z1[0])
st1 = ""
for i in range(9):
    z1[i+1] = round((int(a) + (i+1)*step),2)
    st1 = st1 + " " + st + " " + str(z1[i+1]) + " "
        +str(i+1)+"; "
    st = str(z1[i+1])
st1 = str(min) + " " + str(z1[0]) + " 0; " + st1
arcpy.AddMessage(st1)
z2 = [0 for i in range(10)]
step = (int(d) - int(c))/9.0
z2[0] = round(int(c),2)
st = str(z2[0])
st2 = ""
for i in range(9):
    z2[i+1] = round((int(c) + (i+1)*step),2)
    st2 = st2 + " " + st + " " + str(z2[i+1]) + " "
        +str(9 - i)+"; "
    st = str(z2[i+1])
st2 = st2 + " " + str(z2[9]) + " " + str(max) + " 0; "
st3 = str(b) + " " + str(c) + " 10; "
arcpy.AddMessage(st1+st3+st2)
arcpy.gp.Reclassify_sa(outRaster, "Value", st1 + st3 +
    st2, outRaster + "_F", "NODATA")
inRaster = outRaster + "_F"
outRaster = outRaster + "_Fuzzy"
out = arcpy.Raster(inRaster) / 10.0
out.save (outRaster)
elif type == 'Монотонно спадна ФН':
    z2 = [0 for i in range(10)]
    step = (int(d) - int(c))/9.0
    z2[0] = round(int(c),2)
    st = str(z2[0])
    st2 = ""
    for i in range(9):
        z2[i+1] = round((int(c) + (i+1)*step),2)
        st2 = st2 + " " + st + " " + str(z2[i+1]) + " "
            +str(9 - i)+"; "
        st = str(z2[i+1])
    st2 = st2 + " " + str(z2[9]) + " " + str(max) + " 0; "
    st1 = str(min) + " " + str(c) + " 10; "
    arcpy.AddMessage(st1+st2)
    arcpy.gp.Reclassify_sa(outRaster, "Value", st1 + st2,
        outRaster + "_F", "NODATA")
    inRaster = outRaster + "_F"
    outRaster = outRaster + "_Fuzzy"

```



```

        out = arcpy.Raster(inRaster) / 10.0
        out.save (outRaster)
elif type == 'Моногонно зростаюча ФН':
    step = (int(d) - int(a))/10.0
    z1 = [0 for i in range(10)]
    z1[0] = round(int(a),2)
    st = str(z1[0])
    st1 = ""
    for i in range(9):
        z1[i+1] = round((int(a) + (i+1)*step),2)
        st1 = st1 + " " + st + " " + str(z1[i+1]) + " "
            +str(i+1)+"; "

    st = str(z1[i+1])
    st1 = str(min) + " " + str(z1[0]) + " 0; " + st1
    st2 = str(d) + " " + str(max) + " 10; "
    arcpy.AddMessage(st1+st2)
    arcpy.gp.Reclassify_sa(outRaster, "Value", st1 + st2,
        outRaster + "_F", "NODATA")

    inRaster = outRaster + "_F"
    outRaster = outRaster + "_Fuzzy"
    out = arcpy.Raster(inRaster) / 10.0
    out.save (outRaster)

return

```

#Інструмент, що виконує метод скринінгу альтернатив

```

class Screening(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of the class)."""
        self.label = "Screening"
        self.description = ""
        self.canRunInBackground = False
    def getParameterInfo(self):
        param0 = arcpy.Parameter(
            displayName='GeoDatabase',
            name='in_geodatabase',
            datatype='DEWorkspace',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param1 = arcpy.Parameter(
            displayName='Fuzzy Raster Layer(s)',
            name='in_frl',
            datatype='GPValueTable',
            parameterType='Required',
            direction='Input')
        param1.parameterDependencies = [param0.name]
        param1.columns = [['GPRasterLayer', 'Input'], ['GPString',
            'Weight'], ['GPString', 'Alpha-cut']]

```

```

        return [param0, param1]
def isLicensed(self):
    """Set whether tool is licensed to execute."""
    return True
def updateParameters(self, parameters):
    """Modify the values and properties of parameters before
internal validation is performed. This method is called whenever a
parameter has been changed."""
    return
def updateMessages(self, parameters):
    """Modify the messages created by internal validation for
each tool parameter. This method is called after internal
validation."""
    return
def execute(self, parameters, messages):
    rows = parameters[1].valueAsText.split(";")
    rasters = []
    weights = []
    alpha = []
    for row in rows:
        val = row.split(" ")
        rasters.append(val[0])
        weights.append(val[1])
        alpha.append(val[2])
    count = int(len(weights))
    w = [0 for i in range(count)]
    a = [0 for i in range(count)]
    for i in range(count):
        w[i] = float(weights[i])
        a[i] = float(alpha[i])
    sumw=0
    exeption = True
    for i in range(count):
        sumw = sumw + w[i]
        if w[i] > 1:
            arcpy.AddMessage("Caution:Enter the weight criterion
                is greater than 1")
            exeption = False
            break
        if a[i] > 1:
            arcpy.AddMessage("Caution:Enter the alpha value is
                greater than 1")
            exeption = False
            break
    if sumw != 1.0:
        arcpy.AddMessage("Caution: The sum of the criteria

```

```

weights is equal to 1")
    exeption = False
if exeption:
    #Sort criteria layers
    i = 0
    while i < count - 1:
        m = i
        j = i + 1
        while j < count:
            if w[j] > w[m]:
                m = j
            j += 1
        w[i], w[m] = w[m], w[i]
        a[i], a[m] = a[m], a[i]
        rasters[i], rasters[m] = rasters[m], rasters[i]
        i += 1
    rs = arcpy.sa.Con(arcpy.Raster(rasters[0])>= a[0],
                      arcpy.Raster(rasters[0]))
    rs.save(rasters[0] + "_Alpha")
    for i in range(count-1):
        rs = arcpy.sa.Con(((arcpy.Raster(rasters[i])>= 0) &
                           (arcpy.Raster(rasters[i+1])>= a[i+1])),
                          arcpy.Raster(rasters[i+1]))
        rs.save(rasters[i+1] + "_Alpha")
return

```

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

A
Aksoy E., 8

F
Feo G., 8

S
Sener B., 8

W
Wang G., 8

A
Андерсон В.М., 19
Армстронг Г., 19

Б
Берлянт О.М., 21
Бос Х., 18
Бренс Дж.П., 38
Бугаевський Л.М., 21

В
Вебер А., 14, 19
Вонг В., 19

Г
Грицюк С.В., 8, 25
Губанова О.Р., 110, 118

Д
Данджермонд Дж., 21
ДеМерс М., 21

Джонс К., 19
Друккер П., 19

Е
Епллбом У., 19
Епстейн Б., 19

З
Заде Л., 28, 62
Зацерковний В.І., 21

I
Ізард У., 18
Іщук О.О., 21

К
Кавальєрі Б., 12
Калкінз Х., 21
Капралов С.Г., 21
Карвер С., 9, 25
Карпінський Ю.О., 21
Козаченко Т., 110
Конверс Р.Д., 18
Котлер Ф., 19
Кошкаръов А.В., 21
Кристаллер В., 19
Кругман П., 19

Л
Лаунхардт В., 19
Леонтьев В., 18
Леш А., 19
Лур'є І.К., 21

М

Малчевський Я., 9,25
Маршалл Б.,34
Маршалл А., 19
Мере М.Д., 21
Мітчел Е.,21
Мокін В.Б., 21

О

Оприкович С., 34

П

Портер М., 19
Приходько В., 110

Р

Розенберг І.Н., 21
Рой Б., 34

С

Сааті Т., 29, 31, 74,103
Сандерс Д., 19
Сафранов Т.А., 110, 118
Світличний О.О., 21
Сіммонс Дж.,19
Сімпсон Ф., 12

Т

Тікунов В.С., 21
Томплінсон З.Ф., 21

Торрічеллі Е., 12
Тюнен Й., 12, 13, 14,19

Ф

Ферма П., 12
Фурсов В.А., 19

Х

Хаггет П., 18
Хайнен Т., 12
Харріс Ч., 19
Хафф Д., 18
Хванг Ц., 31

Ц

Цветков В.Я., 19,21

Ш

Шаніна Т.П., 110, 118
Шеннон К., 73
Шефлен А., 18
Шипулін В.Д., 21

Ю

Юн К., 31

Я

Ягер Р., 82, 83
Янковський П., 9, 25
Яцало Б.І., 9, 25

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

A

ArcCatalog, 22
ArcGIS, 22, 41, 44, 59, 69, 91, 92, 135
ArcGlobe, 22
ArcMap, 22
ArcScene, 22
ASTER, 91, 119

D

DECERNS SDSS, 42, 43

I

IDRISI, 40, 41

M

ModelBuilder, 91, 98

P

Python, 95

U

UML-нотація, 100

A

Агрегування, 71, 72, 82, 127, 129
Алгоритм

- апроксимаційний, 17
- генетичний, 25
- евристичний, 16
- задачі комівояжера, 18
- повного перебору, 18
- скринінгу альтернатив, 77

Аналіз

- геомаркетинговий, 19
- близькості, 7
- накладення, 7
- поверхні, 7
- атрибутивних даних, 26, 27
- багатоатрибутивний, 38
- багатоцільовий, 38

- близькості, 26, 27
- геопросторовий, 26
- накладення, 26
- оверлейний, 26, 27
- поверхні, 26, 27
- чутливості, 49

Атрибут, 97

Б

База даних, 93
– нечітких знань, 92
– геоданих, 90
– реляційна, 92
Булева логіка, 131
Булеве накладення, 132
Буфер, 27

В

Ваги критеріїв, 72, 125
Ваги порядку, 83, 128
Відношення узгодженості, 30
Відстань
– Евклідова, 56, 57, 58, 68
– манхеттенська, 56
– Чебишева, 57

Г

Геоінформаційні технології, 2, 19
Геомаркетинг, 19
ГІС-застосунок, 91, 95, 99

Г

Грунтові води, 119

Д

Декомпозиція, 51
Державні будівельні норми, 118
Дефазифікація, 75
Дискретизація, 58
Дистанційне зондування Землі, 20, 21
Діаграма

- Ганта, 135, 138
- діяльності, 100, 102, 103, 106

Е

- Евклідова відстань, 27
- Експозиція, 27, 123
- Ентропія інформації, 73

З

- Задача Вебера, 14, 15, 16
 - з бар'єрами, 17
- Задача Ферма, 12
- Землекористування, 123

І

- Ієрархія прийняття рішень, 119, 125
- Ізодапани, 14
- Індекс узгодженості, 30
- Інструмент геообробки, 22, 94
- Інформаційна технологія, 86

К

- Карта придатності територій, 130, 131
- Картографічні веб-сервіси, 21
- Квантифікатори RIM, 83, 85
- Кільця Тьонена, 13, 14
- Кластер, 114
- Контекстна діаграма, 88
- Критерії
 - екологічні, 119
 - еколого-економічні, 119
 - фізичні, 119

Л

- Лінгвістична змінна, 79

М

- Макроаналіз, 25, 26, 47, 50
- Метод
 - АНР, 25, 42
 - ELECTRE, 25, 36
 - MAUT, 25, 42
 - MAVT, 25, 42

- PROMETHEE, 25, 34, 36, 42
- TOPSIS, 25, 31, 32, 33, 42
- аналізу ієрархії, 29, 71
- нечітка модифікація, 74, 125
 - багатоатрибутивний, 38
 - багатоцільової оптимізації, 38
 - вектора спаду, 16
 - випадкового пошуку, 17
 - гілок та меж, 16
 - Евклідових відстаней, 119
 - зваженої лінійної комбінації, 28, 71
 - зваженої суми, 28
 - ідеальної точки, 31
- локаційного трикутника, 14
 - оцінки діапазону, 61
 - попарного порівняння, 74
 - розрахунку ваг важливості критеріїв, 71
 - скринінгу альтернатив, 76
 - скринінгу альтернатив, 72
- Метрика близькості
 - Евклідова, 56
 - манхеттенська, 56
 - Чебишева, 56
- Мікроаналіз, 25, 26, 49, 50, 71
- Множина α -рівня, 76, 77
- Модель
 - векторна, 52
 - растрова, 54
 - функціональна, 86, 88
- Моделювання
 - імітаційне, 17

Н

- Наземна навігація, 21
- Невизначеність переваг, 79
- Нечітка
 - логіка, 20, 72, 79
 - метамоделі, 92
 - множина, 20, 62
- Нечітке
 - накладення, 132
 - об'єднання, 69, 124

Нечіткий

- квантифікатор, 811
- перетин, 68, 124, 131

О

Об'єкт

- лінійний, 52, 53
- полігональний, 53, 54
- точковий, 52, 53

Оператор впорядкованого зваженого усереднення, 82

Оператор зважена сума, 131

Оператор Ягера, 82, 85, 127, 131, 137

П

Паспорт місць видалення відходів, 114

Перекласифікація растру, 69, 79, 100, 103

Побутові відходи, 109

Полігон

- твердих побутових відходів, 109, 111, 117

– Тиссена, 18

Поріг α -зрізу, 76, 129

Правила прийняття рішення, 7

Прийняття рішень

- групове, 38
- індивідуальне, 38

Програмування

- динамічне, 16, 17
- лінійне, 17
- нелінійне, 17
- стохастичне, 17
- мережеве, 17

Р

Ранжування, 72, 76

Растр приналежності, 100

С

Система підтримки прийняття рішень, 90, 117, 129, 133

Скринінг альтернатив, 71

Скрипт, 22

Стандартизація, 61, 71, 122

Т

Тверді побутові відходи, 108

Теорія

– нечітких множин, 63, 71

– промислових кластерів, 19

– центральних місць, 18

– штандорта, 11

Техніко-економічне обґрунтування, 114

Технічний паспорт відходів, 114

У

Ухил, 27, 123

Ф

Фазифікація, 63, 92, 124

Функція

– Гауса, 64

– належності, 63, 64, 80, 81

– S-образна, 65, 66, 67

– Z-образна, 65, 67

– кусково-лінійна, 122

– лінійна, 64, 72

– П-подібна, 68

– сигмоїдальна, 64, 72

– трапецієподібна, 64, 65

– трикутна, 64

– переваги, 35

Ц

Цифрова модель рельєфу, 91, 119, 123

Ш

Штандорт, 14

ГЛОСАРІЙ

А

Адитивність: змінні (критерії) мають властивість адитивності, якщо вони не мають ніякого взаємного впливу або взаємодії один з одним.

Алгоритм: набір правил для вирішення проблеми.

Альтернативи прийняття рішень: сукупність напрямів дій, серед яких особа, що приймає рішення, повинна вибрати; альтернатива задається повністю, шляхом визначення значення пов'язаних змінних рішень.

Аналіз поширення помилок: сукупність процедур, пов'язаних із тим, як відомі помилки (невизначеності) в наборі вхідних даних впливають на помилку в кінцевому результаті; на відміну від аналізу чутливості, він вимагає апріорного знання помилки, пов'язаної з вхідними даними.

Аналіз рішень: набір систематичних процедур аналізу складних проблем рішення; основна стратегія полягає в тому, щоб розділити проблему рішення на невеликі, зрозумілі частини, проаналізувати кожен частину та об'єднати частини в логічний спосіб, щоб отримати змістовне рішення.

Аналіз чутливості: процедура для визначення впливу внесених невеликих змін у вхідні дані (географічні дані та переваги особи, що приймає рішення) на вихідні дані (ранжування альтернатив);

Атрибут: (1) вимірювана кількість або якість, пов'язані з об'єктом (точка, лінія, полігон, растр) в ГІС; (2) джерело інформації, доступне особі, що приймає рішення, для формулювання і досягнення цілей.

Б

Багатокритеріально-просторова СППР: система підтримки просторових рішень, яка інтегрує можливості ГІС та аналіз багатокритерійних рішень.

Багатокритерійний аналіз рішень: сукупність процедур аналізу складних проблем прийняття рішень, що включають несумірні, суперечливі критерії, на основі яких оцінюються альтернативні рішення.

База даних: сукупність взаємопов'язаних наборів даних, які зберігаються в інформаційній системі для обслуговування одного або декількох застосунків.

Бінарна змінна: змінна, яка приймає значення 0 або 1.

Бінарна карта: карта атрибутів, яка містить тільки два можливих значення атрибуту: наявність (1) або відсутність (0).

Булеві операції: логічна комбінаторна система, заснована на булевій алгебрі; операції включають в себе AND, OR, XOR (виключне АБО), IMP (імплікація), EQV (еквівалентність) і NOT; Операції, що найбільш часто використовуються в географічному аналізі – це І (перетин) і АБО (об'єднання).

Буфер: зона заданої відстані навколо об'єкта (точка, лінія або полігон).

В

Вага порядку: присвоюється позиції рангових значень атрибутів для заданої альтернативи; застосування ваг порядку впливає на зважування атрибутів на основі їх рангу від мінімального до максимального значення для кожної альтернативи.

Вага: значення, присвоєне критерію оцінювання, що вказує на його важливість щодо інших розглянутих критеріїв.

Вектор: графічна структура для зберігання просторових даних, яка включає призначення координат для кожного об'єкта.

Вибір: фаза прийняття рішень, на якій робиться вибір серед альтернатив.

Г

Географічна інформаційна система (ГИС): комп'ютерна система, що містить набір засобів, що полегшують введення, зберігання, маніпулювання, аналіз та виведення даних як для географічних, так і для атрибутивних даних.

Географічна інформація: дані з географічною прив'язкою, які були перетворені в форму, яка має сенс для одержувача і представляє реальну або передбачувану цінність в процесі прийняття рішень.

Географічні дані: будь-які дані, зібрані для певного місця розташування.

Геокодування: процес, в якому функції цифрової карти присвоюється локальний атрибут (географічні координати), який служить унікальним ідентифікатором.

Графічний інтерфейс користувача (GUI): графічний метод управління тим, як користувач спілкується з комп'ютером для виконання різних завдань, які відображаються на екрані комп'ютера у вигляді меню, діалогових вікон, кнопок, вікон редагування, списків перемикачів, перемикачів, радіо кнопок, введення команд та перегляде екранів.

Д

Детермінована модель: модель, побудована для умови передбачуваної визначеності; моделі припускають, що існує лише один можливий результат (який відомий) для кожного альтернативного курсу чи дії.

Диз'юнктивний скринінг: некомпенсаційний метод скринінгу, який вибирає альтернативи, які задовольняють заданим граничним значенням щонайменше за одним критерієм оцінки.

Дистанційне зондування: процес збору даних про поверхню Землі та навколишнього середовища з відстані, як правило, літаками або космічними датчиками.

Домінування: якщо альтернатива А є хоча б такою ж бажаною, як альтернатива В за всіма критеріями, і більш бажаною принаймні за одним критерієм, альтернатива В домінує А; шляхом визначення набору домінуючих альтернатив, набір всіх можливих альтернатив можна розділити на домінуючі та недомінуючі альтернативи; недомінуючі альтернативи також називають ефективними або непіддатними.

З

Зв'язність: топологічна властивість ліній та вузлів, бути зв'язаними або приєднаними один до одного, як правило, стосується інфраструктурних мереж, таких як комунальні та транспортні системи.

Змінна рішення: змінна що знаходиться під безпосереднім контролем особи, що приймає рішення; вимірює виконання альтернативних рішень; залежно від проблемної ситуації змінні рішення можуть бути детермінованими, випадковими або лінгвістичними; набір змінних рішень визначає простір прийняття рішення.

І

Ідеальна точка: являє собою гіпотетичну альтернативу (результат рішення), яка складається з найбільш бажаних зважених стандартизованих рівнів кожного критерію для всіх розглянутих альтернатив.

Інтерполяція: процедура визначення значень атрибута в місцях, де ці значення невідомі, на основі відомих значень сусідніх "контрольних" точок.

К

Карта критеріїв: шар карти в базі даних ГІС, що представляє просторовий розподіл – атрибут, який вимірює ступінь, в якому досягається пов'язана з ним мета; карти критеріїв класифікуються на детерміновані, імовірнісні та нечіткі.

Карта обмежень: шар карти в базі даних ГІС, що представляє набір можливих альтернатив.

Картографічне моделювання: процедура, яка об'єднує окремі операції ГІС, для побудови складних моделей просторового аналізу.

Комірка: (1) базовий елемент просторової інформації в сітковому (растровому) наборі даних; (2) одне значення в базі даних (або електронній таблиці), яке визначається шляхом перетину рядка або запису з полем або стовпцем.

Компроміс: гранична норма заміщення; кількість одного атрибута, від якого особа, яка приймає рішення, готова відмовитися, щоб отримати певну кількість будь-якого іншого атрибута.

Компромісне програмування: мультиоб'єктивний метод прийняття рішень, заснований на ідеї зміщеного ідеалу; він передбачає, що вибір серед альтернатив залежить від точки відліку, яка використовується (наприклад, ідеальна точка) та спроб мінімізувати "відстань" між альтернативами та опорною точкою.

Кон'юнктивний скринінг: некомпенсаційний метод скринінгу, який вибирає альтернативи, які відповідають заданим значенням порогів для всіх критеріїв оцінки.

Кореляція: метод встановлення сили статистичного зв'язку між залежною змінною та однією або декількома незалежними змінними.

Корисність: міра переваги для результату рішення.

Критерій: стандарт суджень або правила, на основі яких оцінюються альтернативні рішення відповідно до їх доцільності; загальний термін, що включає поняття атрибута і цілі.

Л

Лінгвістична змінна: змінна, яка може приймати значення слів чи фраз з природної мови; значення лінгвістичних змінних потім присвоюються відповідним нечітким множинам.

Лінійне програмування: математична модель з лінійною цільовою функцією та набором лінійних обмежень і невід'ємних змінних.

Лінія: одновимірний лінійний об'єкт на карті, що має початкову і кінцеву точку.

М

Матриця прийняття рішень: зручний спосіб представлення елементів прийняття рішень; матриця містить результати рішення для набору альтернатив та набору критеріїв оцінки.

Мережа: система ліній, що з'єднують заданий набір точок.

Мета: апріорна цінність або рівень прагнення.

Метадані: дані про дані в інформаційній системі.

Метод аналізу ієрархій (МАІ): підхід до прийняття рішень з декількома атрибутами, заснований на концепції парних порівнянь.

Метод ідеальної точки: метод багатоатрибутивного прийняття рішень, який упорядковує набір альтернатив на основі їх відділення від ідеальної точки.

Методи інтерактивного програмування: клас багатоцільових методів рішення, які неявно припускають існування функції корисності/ цінності, що оптимізується за допомогою формального механізму, який передбачає інтерактивний обмін інформацією між предметною моделлю ситуації рішення (комп'ютерна система) і особою, що приймає рішення.

Методи узгодження: клас методів прийняття рішень з кількома розподілами на основі попарного порівняння альтернатив; основними елементами методів узгодження є заходи узгодження та невідповідності; доступно широке різноманіття формул для обчислення загальної оцінки за кожну альтернативу на основі двох мір; найпростіший підхід – обчислити загальну оцінку за кожну альтернативу як суму індексів узгодження.

Моделювання: методологія проведення експериментів за допомогою моделі системи реального світу.

Можливе рішення: рішення (альтернатива), яке задовольняє всім обмеженням.

Н

Набір узгодженості: сукупність усіх критеріїв, для яких альтернатива не гірша конкуруючої альтернативи.

Накладення (Overlay): ГІС-процедури для генерації нового шару (вихідного шару) як функції двох або більше вхідних шарів; значення атрибута, що присвоєно кожному місцю розташуванню на вихідному шарі, є функцією незалежних значень, зв'язаних з цим місцем розташуванням на вхідних шарах.

Напівструктуроване рішення: рішення, в якому деякі аспекти проблеми структуровані, а інші неструктуровані.

Невизначеність: можливість більш ніж одного результату внаслідок певного ходу дій, коли шанс чи ймовірність одного конкретного результату невідомі; стан, що характеризується відсутністю будь-якої інформації, що стосується бажаного результату.

Некомпенсаційне правило прийняття рішень: багатокритеріальна процедура прийняття рішень, яка не дозволяє здійснювати компроміси між критеріями; погані показники за одним критерієм оцінки не компенсуються гарними показниками за іншими критеріями.

Нечітка множина: сукупність елементів або предметів без чітко визначеної межі.

О

Об'єкт: географічна сутність, яка існує і відрізняється в реальному світі (наприклад, будівля, земельна ділянка, вулиця, дерево, річка тощо)

Обмеження: обмеження, яке виключає певні комбінації змінних рішень в якості можливих рішень; обмеження використовуються для усунення з точки зору розгляду, ліній, полігонів та/або растрів, які характеризуються певними атрибутами та/або певними значеннями атрибутів.

Обмін даними: процес перетворення існуючих цифрових даних у структуру даних та формат файлу, що використовується всередині ГІС.

Обробка зображень: комп'ютерний метод, що використовується для інтерпретації та маніпулювання растровими даними.

Оптимальне рішення: можливе рішення, яке мінімізує або максимізує значення цільової функції.

Оптимізація: нормативний підхід для визначення найкращого рішення заданої проблеми рішення.

П

Параметр: постійне значення в діапазоні альтернатив рішення.

(Пере)класифікація: операції ГІС, які перетворюють дані атрибутів, що пов'язані з одним шаром карти; вони передбачають групування об'єктів у класи відповідно до нових значень, присвоєних об'єктам вхідних даних відповідно до певних значень локальних та нелокальних атрибутів.

Полігон: двовимірний об'єкт на карті, що має форму.

Помилка: відхилення даних від деякого значення, що вважається "вірним".

Правило компенсаційного рішення: багатокритеріальне прийняття рішень, що дозволяє здійснювати компроміси між критеріями.

Правило прийняття рішення: процедура, яка впорядковує простір прийняття рішення через співвідношення "один до одного" або "один до багатьох" результатів з альтернативами рішення; він диктує, як краще ранжувати альтернативи або вирішити, яка альтернатива переважніше за іншу.

Прийняття рішень: процес визначення проблеми та її оточення, визначення альтернатив, оцінка альтернатив, вибір альтернатив та реалізація рішення.

Проектування: фаза прийняття рішень, яка включає розробку можливих рішень проблеми.

Простір прийняття рішення: набір змінних рішень, пов'язаних з альтернативами рішення.

Простір результатів рішення: сукупність наслідків рішення, пов'язаних з альтернативами рішення.

Просторова експертна система: комп'ютерна система, яка використовує методологію міркувань з певної просторової проблеми для передачі досвіду та надання порад чи рекомендацій, подібно до людини експерта.

Просторова система підтримки прийняття рішень (ПССПР): інтерактивна комп'ютерна система, призначена для підтримки користувача або групи користувачів у досягненні більш високої ефективності прийняття рішень під час вирішення напівструктурованої просторової проблеми рішення.

Просторове багатокритеріальне прийняття рішень: процес, що включає набір географічно визначених альтернатив (подій), з яких робиться вибір однієї або декількох альтернатив (їх впорядкування виконано) відповідно до заданого набору критеріїв оцінки.

Р

Ранжування: упорядкування за деяким критерієм.

Растрова структура: структура даних для представлення об'єктів на карті, яка складається з невеликих, внутрішньо однакових комірок (пікселів), розташованих у сітці.

Реляційна база даних: тип логічної структури бази даних, яка обробляє дані так, ніби вони зберігаються в двовимірних таблицях; вона може співвідносити будь-яку частину інформації, що зберігається в одній таблиці, до будь-якої частини в іншій, доки дві таблиці мають спільний елемент даних.

Ризик: можливість цілого ряду наслідків, що є результатом рішення чи ходу дій.

Рішення: вибір серед альтернатив.

С

Середньозважений порядок (Order weighted average, OWA): багатоатрибутивний нечіткий метод, який присвоює кожній альтернативі зважену суму із упорядкованими атрибутами; додатково до ваг критеріїв використовуються ваги порядку; метод забезпечує безперервні операції нечіткої агрегації між нечітким перетином і об'єднанням, а середньозважена комбінація знаходиться посередині між ними.

Система керування базами даних (СКБД): сукупність програмних засобів, що дозволяють організувати та використовувати дані, які зберігаються в базі даних.

Система підтримки прийняття рішень (СППР): інтерактивна комп'ютерна система, яка може допомогти особам, які приймають рішення, використовувати дані та моделі для вирішення неструктурованих або напівструктурованих проблем.

Слабий зв'язок: стратегія розробки просторових СППР, яка полегшує інтеграцію методів ГІС та БКАР за допомогою механізму обміну файлами.

Спеціалізована СППР: система, яка призначена для аналізу певного набору проблем (наприклад, екологічних проблем, маркетингу, транспорту).

Стан природи (навколишнього середовища): неконтрольований фактор в ситуації прийняття рішення (наприклад, стан економіки: спад, інфляція) або погодні умови (дощ, посуха, мороз)).

Стандартизація: процедура отримання порівнянних шкал.

Т

Тісний зв'язок: стратегія проектування просторової СППР, що базується на єдиній моделі керування даними та спільному інтерфейсі користувача.

Топологія: правила, що визначають взаємозв'язки між просторовими ознаками, у тому числі: такі властивості, як безперервність, близькість та інше.

Точка: об'єкт нульової розмірності на карті, що представляє одне (x, y) (необов'язково, z) розташування на земній поверхні.

Транзитивність: структура уподобань (переваг), що має таку властивість: якщо альтернатива А краще В, а В – С, то А є кращою до С.

Ф

Функції вимірювання: функції ГІС, що дозволяють розрахувати відстань, площу та об'єм.

Функції сусідства: аналітичні функції ГІС, що передбачають присвоєння значень місцевості відповідно до характеристик навколишньої території; значення, присвоєне кожному місцю розташування на вихідному шарі, є функцією незалежних значень в околицях цього місця розташування на вхідному шарі; приклади функцій сусідства включають операції пошуку та інтерполяцію.

Функціональна сумісність: безперебійний доступ до кількох структур даних і обмін ними між різними апаратними платформами, операційними системами і прикладним програмним забезпеченням.

Функція корисності: представляє ставлення особи, що приймає рішення, до ризику, в математичній формі, пов'язуючи задоволення ОПР з результатом (або "корисністю", пов'язаною з результатом), з цінністю самого результату.

Функція належності: функція, яка представляє будь-який елемент x з X , що частково належить до підмножини A з X , або ступінь належності x в A .

Ц

Цілі: твердження про бажаний стан розглянутої системи; вказує напрямки поліпшення одного або декількох атрибутів; цілі функціонально пов'язані з набором атрибутів або отримані з нього.

Цільова функція: математичне відношення, що представляє атрибути, за якими приймаються рішення.

Цільове програмування: форма лінійного програмування на основі підходу до багатоцілового прийняття рішень; кожна ціль визначається як мета з заданим рівнем досягнення (прагнення), змодельована як обмеження; цільова функція – це вираз, що мінімізує відхилення від цілей.

Ш

Шар карти даних: логічний набір тематичних даних, що описуються та зберігаються в базі даних ГІС.

Наукове видання

**Кузніченко Світлана Дмитрівна
Бучинська Ірина Вікторівна**

**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ
В ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Монографія

Одеський державний екологічний університет
65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15

Віддруковано з готового оригінал-макета

Підписано до друку 06.04.2021 Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умовно друк. арк. 11,74. Тираж 60. Зам. № 526.

Видавець ТОВ «505»
м. Житомир, вул. М. Бердичівська, 17А
тел.: 063 101 22 33

Свідоцтво серія ДК №5609 від 21.09.2017 р.

Друк та палітурні роботи ТОВ «505»
м. Житомир, вул. М. Бердичівська, 17А
тел.: 063 101 22 33, e-mail: printinz@gmail.com