

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Магістерської підготовки

Кафедра Інформаційних технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Розробка програмних засобів багатокритеріального аналізу рішень
для ГІС-паketу ArcGIS»

Виконав студент 2 курсу групи
МІС- 18 спеціальності 122
Комп'ютерні науки

Папазов Валерій Валерійович

Керівник к.геог.н., доц.
Кузніченко Світлана Дмитрівна

Консультант

Рецензент к.т.н., доц.
Гнатовська Ганна Арнольдівна

Одеса 2019

АНОТАЦІЯ

на магістерську роботу «Розробка програмних засобів багатокритеріального аналізу рішень для ГІС-паketу ArcGIS», студента Папазова Валерія Валерійовича

Актуальність дослідження полягає в необхідності розробки та інтеграції в ГІС програмного забезпечення для проведення багатокритеріального аналізу рішень.

Мета дослідження – розробка програмного забезпечення для проведення багатокритеріального аналізу рішень в середовищі ГІС.

Задачі дослідження: провести дослідження можливостей вбудованих засобів ГІС для багатокритеріального прийняття рішень; провести аналіз методів багатокритеріального прийняття рішень; виконати вибір програмних засобів розробки; розробити інструмент розрахунку методом парного порівняння вагових коефіцієнтів критеріїв, представлених растровими шарами в ГІС; здійснити тестування створеного програмного інструменту в ГІС для операції зваженого накладання набору растрових даних.

Об'єкт дослідження – процес багатокритеріального аналізу рішень в ГІС.

Предмет дослідження – методи та алгоритми багатокритеріального аналізу рішень в ГІС.

Методи дослідження: геоінформаційне та просторове моделювання, методи збору та обробки геоданих, метод аналізу ієрархій, методом зважена сума, об'єктно-орієнтоване програмування.

Результати, їх новизна, теоретичне та практичне значення: розроблено програмне забезпечення для розрахунку методом парного порівняння вагових коефіцієнтів критеріїв, представлених растровими шарами в ГІС, з метою виконання процесу багатокритеріального аналізу рішень за допомогою агрегування оцінок альтернатив за різними критеріями оператором накладання зважена сума.

Структура магістерської роботи складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань на 18 найменування, додатку. Повний обсяг роботи становить 76 сторінок, містить 27 рисунків і 3 таблиці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: геоінформаційна система, багатокритеріальний аналіз рішень, метод зважена сума, скрипт.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	9
ВСТУП.....	10
1 МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В БКАР	12
1.1 Мета і завдання БКАР.....	12
1.2 Класифікація методів БКАР	15
1.3 Огляд методів БКАР для вирішення просторових завдань	16
1.3.1 Американська наукова школа.....	16
1.3.1.1 Зважена сума (Weighted Sum).....	17
1.3.1.2 Метод аналізу ієрархій.....	18
1.3.1.3 Метод TOPSIS	21
1.3.1.4 Інструменти графічної підтримки	23
1.3.2 Європейська наукова школа	26
1.3.2.1 Методи ELECTRE	26
1.3.2.2 Методи PROMETHEE	27
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІС ТА ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ ПРОСТОРОВИХ РІШЕНЬ	30
2.1 Географічні інформаційні системи.....	30
2.2 Моделі даних	31
2.3 Приклади просторового аналізу	32
2.4 Аналітичні обмеження ГІС	37
2.5 Інтеграція БКАР і ГІС	38
3 БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ГІС.....	40
3.1 Класифікація проблем GIS-MCDA.....	40
3.2 Елементарні функції БКАР	42
3.3 Типи інтеграції моделі GIS-MCDA	44
3.4 Існуюче програмне забезпечення GIS-MCDA.....	47

3.5	Процес прийняття рішень в GIS-MCDA	50
4	РОЗРОБКА ГІС-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТУ БКАР	53
4.1	Створення інструментів за допомогою Python	55
4.2	Перекласифікація растрів за заданими діапазонами значень	58
4.3	Розрахунок вагових коефіцієнтів критеріїв	60
4.4	Агрегування критеріїв оператором зважена сума	62
4.5	Побудова моделі геообробки	65
4.6	Тестування програмного інструменту.....	67
	ВИСНОВКИ	71
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	72
	ДОДАТОК А Програмний код скриптів Python	Ошибка! Закладка не определена.

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БКАР	– Багатокритеріальний аналіз рішень
ГІС	– Географічні інформаційні системи
МАІ	– Метод аналізу ієрархій
МГК	– Метод головних компонент
ОПР	– Особа, яка приймає рішення
ППР	– Підтримка прийняття рішень
РСКБД	– Реляційна система керування базами даних
ПСКБД	– Просторова система керування базами даних
СППР	– Система підтримки прийняття рішень
АНР	– Analytic Hierarchy Process
ESRI	– Environmental Systems Research Institute
GIS	–Geographic Information System
MADA	–Multi-Attribute Decision Analysis
MCDA	–Multi-Criteria Decision Analysis
MCDM	–Multi-Criteria Decision Making
MCA	– Multi-Criteria Analysis
MCE	–Multi Criteria Evaluation
MCEA	–Multi Criteria Evaluation Analysis
MC-SDSS	–Multi-Criteria Spatial Decision Support System
MADM	–Multi-Attribute Decision Making
MODA	–Multi-Objective Decision Analysis
NaN	–Not a Number
PROMETHEE	– Preference Ranking Optimization Method for Enrichment

ВСТУП

Сьогодні існує велика кількість проблем, управлінських завдань, які потребують використання сучасних методів підтримки прийняття рішень (ППР), частина яких носить просторових характер. До таких проблем відносяться, наприклад, пошук найкращого місця розташування чи ранжування територій за ступенем придатності. Зрозуміло, що вирішення подібного завдання не можливо без використання географічних інформаційних систем (ГІС), які призначені для введення, збереження, аналізу і візуалізації просторової інформації. Однак, вирішення подібних просторових завдань часто повинно враховувати декілька факторів, що впливають на рішення, тобто ці завдання мають багатокритеріальний характер.

На початку 1990-х років значний інтерес вчених викликали методи, що є поєднанням багатокритеріальної оцінки (Multi Criteria Evaluation Analysis, MCEA) та ГІС-технологій. Тому в останній час в ГІС активно інтегрують різні методи багатокритеріального аналізу рішень (БКАР; Multiple-criteria decision analysis, MCDA), які надають інструменти для структурування багатокритеріальних проблем.

Модель GIS-MCDA застосовується у багатьох сферах, таких як екологічне планування та управління, планування та управління транспортом, міське та регіональне планування, управління відходами, гідрологія та водні ресурси, сільське та лісове господарство, геологія та природна небезпека, а також управління нерухомістю та виробничими об'єктами. Тому створення програмних рішень в цієї області діяльності є дуже актуальним.

Метою даного дослідження є розробка програмного забезпечення для проведення багатокритеріального аналізу рішень в середовищі ГІС.

Для досягнення поставленої мети дослідження, треба вирішити наступні завдання:

- провести дослідження можливостей вбудованих засобів ГІС для багатокритеріального прийняття рішень;

- провести аналіз методів багатокритеріального прийняття рішень;
- виконати вибір програмних засобів розробки;
- розробити інструмент розрахунку методом парного порівняння вагових коефіцієнтів критеріїв, представлених растровими шарами в ГІС;
- здійснити тестування створеного програмного інструменту в ГІС для операції зваженого накладання набору растрових даних.

1 МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В БКАР

Підходи до вирішення широкого кола управлінських завдань неможливі без використання сучасних методів підтримки прийняття рішень (ППР) і систем ППР (СППР). Багатокритеріальне прийняття рішень – це набір моделей, які можуть бути формалізовані для підтримки прийняття реального рішення. У світовій науковій літературі відомі під декількома назвами, такими як Multiple-criteria decision analysis (MCDA), Multiple-criteria decision-making (MCDM), Multi-Criteria Evaluation (MCE) або Multi-Criteria Analysis (MCA). В даній роботі будемо використовувати визначення багатокритеріальний аналіз рішень (БКАР) чи MCDA. Особливість методів БКАР в порівнянні з іншими методами надання допомоги у вирішенні просторових завдань, полягає в тому, що вони намагаються врахувати декілька факторів.

Хоча ГІС забезпечує інструменти для аналізу вирішення просторових проблем, БКАР надає інструменти для структурування проблеми [1]¹⁾. Модель GIS-MCDA застосовується у багатьох сферах, таких як екологічне планування та управління, планування та управління транспортом, міське та регіональне планування, управління відходами, гідрологія та водні ресурси, сільське та лісове господарство, геологія та природна небезпека, а також управління нерухомістю та виробничими об'єктами [2]²⁾.

1.1 Мета і завдання БКАР

Метою БКАР в широкому сенсі є сприяння особі, яка приймає рішення (ОПР), у вивченні і розумінні даної проблеми, включаючи питання структу-

¹⁾ [1] Malczewski J. A GIS-based multi-criteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science* Vol. 20, No. 7, 2006, pp. 703–726

²⁾ [2] Malczewski J. Multiple Criteria Decision Analysis and Geographic Information Systems. *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis, International Series in Operations Research and Management Science*, 2010, VOL: 142, 2010, pp. 369-395

рування множини цілей/критеріїв і альтернатив; послідовна реалізація процесу БКАР сприяє конкретизації цілей, цінностей і переваг ОПР, експертів та інших зацікавлених осіб або сторін [3]³⁾.

Методи БКАР представляють собою систематизовану процедуру аналізу множини альтернатив з використанням декількох критеріїв з метою подолання обмежень неструктурованого індивідуального або групового прийняття рішень. БКАР спрямований на процес ППР, цілями якого є інтеграція об'єктивних показників з суб'єктивними оцінками і процесами управління, де активно використовують суб'єктивні судження і об'єктивні показники.

Таким чином, в рамках сучасного трактування БКАР являє собою методологію, в якій дослідження проблеми з вже сформованою множиною альтернатив і критеріїв є тільки складовою частиною процесу багатокритеріального прийняття рішення. На рис.1.1 дана узагальнена схема процесу БКАР.

Необхідно підкреслити важливість врахування невизначеностей в процесі розв'язання багатокритеріальних задач. При цьому використовуються як методи аналізу чутливості результатів оцінок до зміни параметрів обраної моделі (або групи моделей) конкретної багатокритеріальної задачі, так і комплексний аналіз невизначеностей об'єктивних і суб'єктивних значень критеріїв і переваг (в рамках певної моделі БКАР) із застосуванням методів теорії ймовірностей і нечітких множин [4]⁴⁾.

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

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

³⁾ [3] Belton V., Steward T. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers. 2002, 372 p.

⁴⁾ [4] Kahraman C. (Ed). Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Theory and Applications with Recent Developments. Series: Springer, Optimization and its Applications, 2008, vol. 16, 600 p.

- 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.).

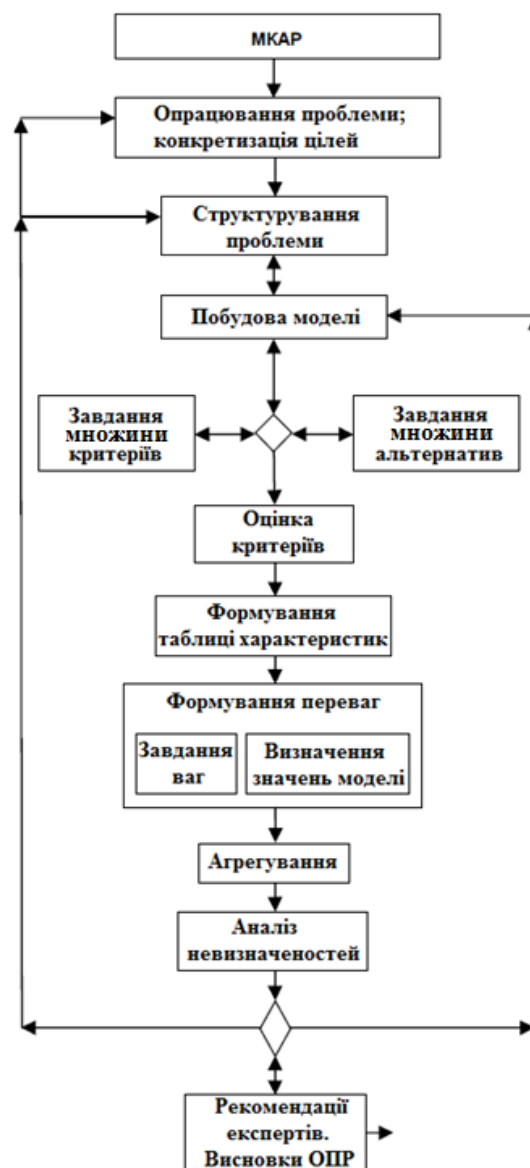


Рисунок 1.1 – Загальна діаграма процесу багатокритеріального аналізу рішень

В ряді робіт розглядаються також і інші види багатокритеріальних задач, в тому числі проектування або пошук нових альтернатив, вивчення проблеми з метою більш глибокого розуміння допустимих або досяжних рішень, а також формування портфеля альтернатив (portfolio problems) з урахуванням їх взаємозв'язків [3]⁵⁾.

1.2 Класифікація методів БКАР

В літературі з аналізу рішень було запропоновано низку підходів до структурування проблем БКАР, які включають такі компоненти [5]⁶⁾:

- 1) Мета або набір цілей, які намагається досягти ОПР (група інтересів).
- 2) ОПР, або група ОПР, які беруть участь в процесі прийняття рішень а також їх переваги щодо критеріїв оцінки.
- 3) Набір критеріїв оцінки (цілей і/або атрибутів), на основі яких ОПР оцінюють альтернативний курс дій.
- 4) Набір альтернативних рішень, тобто змінні рішення або дії.
- 5) Набір неконтрольованих змінних або середовище прийняття рішень.
- 6) Набір результатів або наслідків, пов'язаних з кожною альтернативною парою атрибутів.

Існує велика кількість методів БКАР, так в роботі [2]⁷⁾ перераховано 23 методи. Різні методи МКАР підходять для різних ситуацій прийняття рішень, наприклад, метод аналізу ієрархій (MAI) рекомендується в тих випадках, коли ОПР не можуть кількісно оцінити переваги за різними критеріями і альтер-

⁵⁾ [3] Belton V., Steward T. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers. 2002, 372 p.

⁶⁾ [5] Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1999. ISBN: 0-471-32944-4.

⁷⁾ [2] Malczewski J. Multiple Criteria Decision Analysis and Geographic Information Systems. Trends in Multiple Criteria Decision Analysis, International Series in Operations Research and Management Science, 2010, VOL: 142, 2010, pp. 369-395

рнативам. У роботі [5]⁸⁾ надана цікава довідка про різні методи ГІС-БКАР, такі як зважена сума/накладання, ідеальна точка та метод аналізу ієрархії (з англ. Analytic hierarchy process, АНР). Згідно [1]⁹⁾, метод зваженої суми був на початку 2000-х років основним методом БКАР (39,3% та 9,4% опублікованих наукових робіт для методів зваженої суми проти МАІ відповідно). Основна причина цього поширення полягає в тому, що методи зваженої суми реалізуються з використанням простих операцій алгебри карт (таких як множення та підсумовування растрів), які легко зрозуміти ОПР, що є основними учасниками у вирішенні проблем БКАР.

В даній роботі розглянемо більш докладно та виконаємо розробку програмного інструменту для реалізації в ГІС методу аналізу ієрархій. МАІ використовується для розрахунку ваги критеріїв, які неможливо порівняти кількісно.

1.3 Огляд методів БКАР для вирішення просторових завдань

1.3.1 Американська наукова школа

Перший підхід БКАР, що був отриманий з лінійного програмування, в значній мірі спирається на точні знання та судження і спрямований на досягнення оптимального рішення за допомогою використання функцій корисності/цінності та багатоцільової оптимізації і відносять до американської наукової школи.

Ця технологія є однією з перших, яка була реалізована в географічному контексті. Підставою для цього є її простота та відносно низька обчислювальна вартість. У наступному розділі представлена модель зваженої суми, а

⁸⁾[5] Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1999. ISBN: 0-471-32944-4.

⁹⁾[1] Malczewski J. A GIS-based multi-criteria decision analysis: A survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science Vol. 20, No. 7, 2006, pp. 703–726

далі MAI, який може використовуватися для визначення ваги критеріїв, та метод TOPSIS, який використовує інший підхід, що базується на ідеальних точках.

1.3.1.1 Зважена сума (Weighted Sum)

Метод зваженої суми (Weighted Sum) є найбільш популярним методом БКАР завдяки його простоті. Як зазначено в назві, це просто сума зважених оцінок:

$$p_a = \sum_{i=1}^n x_{ai} w_i \quad (1.1)$$

де p_a – пріоритетна оцінка альтернативи a , x_{ai} – оцінка альтернативи a за критерієм i , w_i – вага критерію i , n – кількість критеріїв. Припускаємо, що метою є максимізація усіх критеріїв.

Завдяки своїй простій і дуже зрозумілій методології, зважене сума підходить для вирішення таких проблем, в яких особа, яка приймає рішення, більшою мірою бере участь у етапі моделювання. Дійсно, підхід передбачає можливість візуалізації проміжних результатів, які можуть допомогти підтримати та покращити переговори між зацікавленими сторонами. Багато програмних засобів реалізують такий підхід і пропанують додаткові інструменти, такі як аналіз чутливості та можливості візуалізації [6, 7]¹⁰⁾.

Однак зважена сума має деякі недоліки [8]¹¹⁾. Наприклад, кілька припущень, які потрібно зробити перед її використанням:

¹⁰⁾ [6] Belton V. and Stewart T. (2002). Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers.

[7] Janssen, R. (2001). On the use of multi-criteria analysis in environmental impact assessment in the netherlands. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 10(2), pp.101–109.

¹¹⁾ [8] Marler R. T. and Arora J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. Structural and multidisciplinary optimization, 41(6), pp. 853–862

1) Компенсація між критеріями: всі критерії виражаються в одних і тих же одиницях (часто через функції корисності). Це означає, що погана продуктивність за одним критерієм (наприклад, високий вплив на навколишнє середовище) може бути компенсована хорошою продуктивністю за іншим (наприклад, високий дохід).

2) Адитивність атрибутів: зважене підсумовування може застосовуватися тільки в тому випадку, якщо атрибути є адитивними. Це припущення означає, що не повинно бути ніякої взаємодії між атрибутами, тобто 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;
- призначення ваги – складне завдання, особливо якщо кількість критеріїв велике і критерії дуже різні за своїм характером. Для підтримки осіб, які приймають рішення, були розроблені різні методи оцінки відносної важливості критеріїв.

1.3.1.2 Метод аналізу ієрархій

Метод аналізу ієрархій (АНР), розроблений Томасом Л. Саати, є відомим інструментом для надання мультикритеріальної допомоги щодо прийняття рішень [9-11]¹²⁾. Він широко використовується в різних галузях: машинобудування, виробництва, промисловості, логістики, охорони здоров'я та ін. Однією з відмінних особливостей АНР є створення матриці парних порівнянь

¹²⁾ [9] Saaty, T. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York

[10] Saaty T. (2002). Decision making with the analytic hierarchy process. Scientia Iranica, 9(3), pp. 215–229

[11] Saaty T. (2005). The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In Figueira, F., Greco, S., and Ehrgott, M., editors, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, pp. 345–408. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London

критеріїв з використанням вербальної шкали. У стандартній версії методу нормалізований власний вектор цієї матриці дозволяє обчислювати оцінку, пов'язану з кожною альтернативою, і вагу, пов'язану з кожним критерієм. Далі розглянемо, як АНР може бути використаний для встановлення розподілу ваги за критеріями. Відразу зазначимо, що аналогічний підхід використовується для визначення оцінок альтернатив. Ця методика широко застосовується в задачах просторового аналізу і навіть існує в деяких комерційних ГІС або як скрипт, або як модуль МКАР.

Одним з найважливіших кроків методу АНР 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, особа, що приймає рішення, може скористатися словесним масштабом. Останній потім перетворюється в фундаментальну шкалу абсолютних чисел, що приймає цілі значення від 1 до 9. Повне пояснення цієї шкали можна знайти в [11]¹³⁾. Крім того, елементи цієї матриці повинні дотримуватися наступної властивості узгодженості:

$$A_{ij} = \frac{1}{A_{ji}}, \quad \forall i, j \quad (1.2)$$

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

В ідеальному випадку матриця є послідовною, тобто вона, природно, має таку властивість:

$$A_{ij} = A_{ik} \times A_{kj} \quad \forall i, j, k \quad (1.3)$$

¹³⁾ [11] Saaty T. (2005). The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In Figueira, F., Greco, S., and Ehrgott, M., editors, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, pp. 345–408. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London

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

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

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

$$A_w = nw \quad (1.5)$$

де вектор w – власний вектор A .

Для контролю узгодженості експертних оцінок вводяться дві пов'язані характеристики – індекс узгодженості (Consistency Index, C.I.) і відношення узгодженості (Consistency Ratio, C.R.) [11]¹⁴⁾:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}, \quad (1.6)$$

де λ_{max} – найбільше власне значення.

Томас Саати також встановив набір контрольних значень R.I., середніх відношень узгодженості, які залежать від кількості альтернатив [10]¹⁵⁾. Коли C.I. менша або рівна 10% від R.I., рівень узгодженості вважається прийнятним для застосування методу власного вектора.

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}, \quad (1.7)$$

¹⁴⁾ [11] Saaty T. (2005). The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In Figueira, F., Greco, S., and Ehrgott, M., editors, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, pp. 345–408. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London

¹⁵⁾ [10] Saaty T. (2002). Decision making with the analytic hierarchy process. Scientia Iranica, 9(3), pp. 215–229

де $R.I.$ – середнє відношення узгодженості, яке залежить від розміру вибірки. Розумний рівень узгодженості в парних порівняннях передбачається на рівні $C.R. < 0.10$, якщо $C.R. \geq 0.10$, це показує суперечливі судження.

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

1.3.1.3 Метод TOPSIS

Одним з багатокритеріальних методів, який досить широко використовується, є метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution). Основна концепція методу заключається в тому, що з порівнювальних варіантів найкращим буде признаний об'єкт, що має найменшу відстань від найкращого варіанту та найбільшу відстань від найгіршого. Основними етапами метода є [12]¹⁶⁾:

- 1) нормалізація оцінок за критеріями

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad (1.8)$$

де x_{ij} – оцінка альтернативи i за критерієм j ; m – кількість альтернатив.

- 2) визначення зваженої матриці нормованих рішень з урахуванням ваг критеріїв, елементи якої визначаються як:

$$u_{ij} = w_j n_{ij} \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n, \quad (1.9)$$

¹⁶⁾ [12] H. Ahmadi, M. S. Rad, M. Nilashi, O. Ibrahim, A. Almaee. Ranking the micro level critical factors of electronic medical records adoption using TOPSIS method // Health Informatics – An International Journal. 2013. Vol. 2. №4, November. p. 19–32

де w_j – вага i -го критерію; n_{ij} – нормоване значення оцінки альтернативи i за критерієм j ; n – кількість критеріїв.

3) визначається ідеальне позитивне (ІПР) та негативне (ІНР) рішення:

$$A^+ = \left(\left(\max_i u_{ij} / j \in I \right), \left(\min_i u_{ij} / j \in J \right) \right) \quad (1.10)$$

$$A^- = \left(\left(\min_i u_{ij} / j \in I \right), \left(\max_i u_{ij} / j \in J \right) \right) \quad (1.11)$$

де I відповідає критеріям вигоди, J – критеріям витрат.

4) обчислюється відстань альтернатив до ІПР та ІНР:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - A_j^+)^2} \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (1.12)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - A_j^-)^2} \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (1.13)$$

5) визначається інтегральний показник (коефіцієнт близькості) для кожної порівнювальної альтернативи:

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (1.14)$$

Коефіцієнт близькості знаходиться між 0 і 1, де 1 є кращою альтернативою.

1.3.1.4 Інструменти графічної підтримки

Існує кілька методів, які можуть допомогти аналітику коригувати параметри методу або надати певну інформацію про отримані результати. Перш за все, більша частина програмного забезпечення, що існує для застосування методів БКАР, має графічні подання даних, або результатів, які вони генерують у вигляді діаграм або діаграм павуків (spider charts). Загальноприйнятий інструмент для представлення профілю – це паралельні шкали (рис.1.3). Вони складаються з набору осей, які показують оцінку альтернатив за кожним критерієм. Оскільки оцінювання об'єднуються для кожної альтернативи, легко визначити та порівняти їх [13]¹⁷.

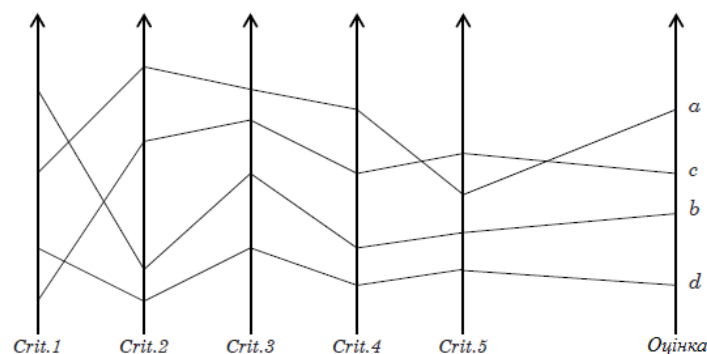


Рисунок 1.3 – Паралельні шкали

Деякі програми додають графічні інструменти, наприклад, програми, що реалізують МАІ, дають можливість ввести ієрархію критеріїв та альтернатив у графічному вигляді. Також деякі програми надають графічні інструменти, які дозволяють користувачу провести аналіз чутливості отриманих результатів.

Деякі з найпоширеніших інструментів, які роблять це, є:

¹⁷[13] Triantaphyllou E. and Sanchez A. (1997). A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods. *Decision Sciences*, 28(1), pp. 151–194

Лінії ваг (Line weights): цей інструмент дозволяє користувачеві вибрати певний критерій і побачити, що станеться з кінцевим результатом, якщо його вага зміниться (при цьому всі інші ваги будуть пропорційними). Кінцева оцінка кожної альтернативи представляється у вигляді лінії, що є функцією ваги. Це означає, що є лінія для кожної альтернативи, перетини якої вказують значення ваг, де відбувається зміна у відношенні переваги.

На рис. 1.4 видно, що для вибраного вагового значення 25% альтернатива *a* є найкращою, *d* – найгіршою, а *b* та *c* мають однакову оцінку. Якщо вага повинна бути збільшена до 50%, тоді альтернатива *c* стане кращою, а альтернативі *a* більше не буде кращою за *b*.

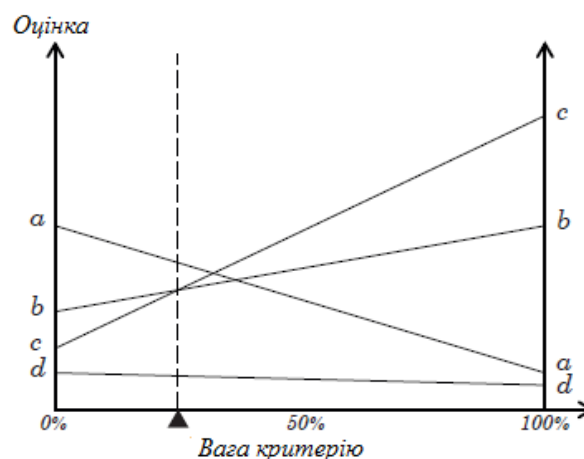


Рисунок 1.4 – Представлення лінії ваг для 4-х альтернатив

Блукаючі ваги (Walking weights): це динамічна версія лінійних ваг, які дозволяють користувачеві експериментувати вручну зі змінами ваг і спостерігати результати на серії графіків. Цей інструмент також використовується з іншими методологіями, такими як методи PROMETHEE.

Expert Choice [14]¹⁸⁾, один з пакетів програмного забезпечення, який реалізує АНР і зважену суму, дозволяє використовувати кілька аналізів чутли-

¹⁸⁾ [14] Система Expert Choice. URL: <http://expertchoice.com> (Дата звернення 10.11.2019)

вості з використанням графічних інструментів (рис 1.5). Інша система, яка використовує інструменти аналізу чутливості – DECERNS SDSS [15]¹⁹⁾. Вона реалізує кілька методів MCDA і дозволяє користувачеві використовувати інструменти line weights або walking weights з більшістю з них (рис. 1.6).

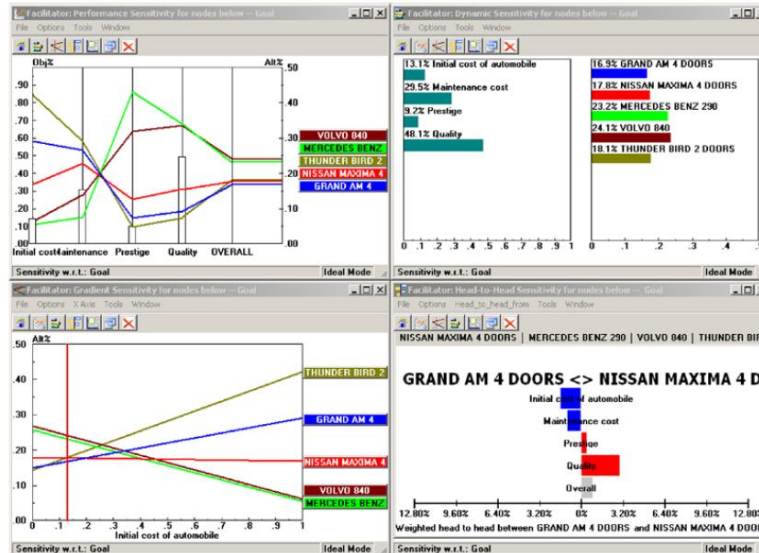


Рисунок 1.5 – Візуальні інструменти, розроблені для Expert Choice

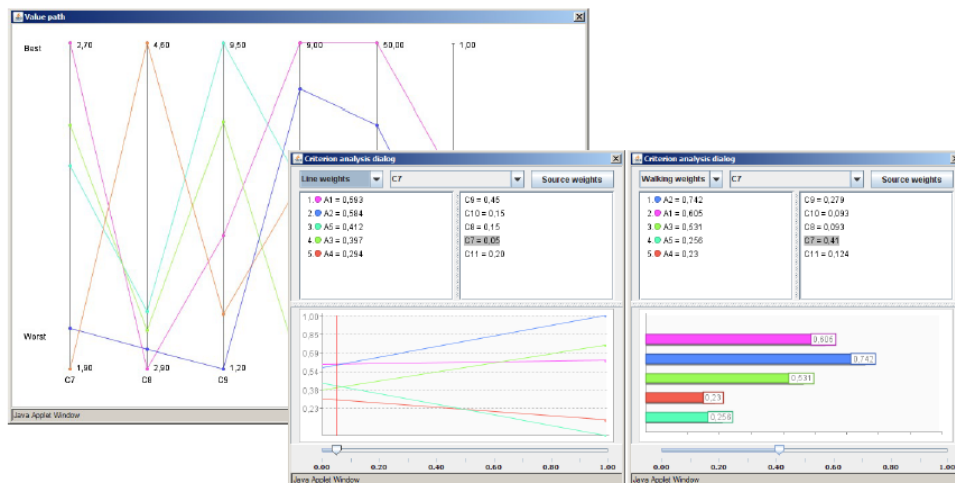


Рисунок 1.6 – Інструменти аналізу чутливості в DECERNS SDSS

¹⁹⁾ [15] Система DECERNS SDSS. URL: <http://www.decerns.com> (Дата звернення 10.11.2019)

1.3.2 Європейська наукова школа

Другий основний підхід в БКАР був отриманий з аналізу зисків та витрат [10]²⁰). Він розглядає можливість неточності в оцінці критеріїв і що оптимальне рішення не завжди досяжне. Цей підхід породив методи переваги (outranking methods), які відрізняються від зваженої суми. Відношення переваги (outranking relation) будується за допомогою серії парних порівнянь альтернатив.

1.3.2.1 Методи ELECTRE

Дані методи відносяться до outranking методів. Простішим з цієї групи методів є метод ELECTRE I. Це сімейство методів засновано на використанні двох індексів: узгодженості та розбіжності (concordance и discordance). Для розрахунку цих індексів також використовується матриця прийняття рішень та передбачається, що ваги критеріїв нормовані на одиницю. Індекс узгодженості (concordance) альтернатив (A_j, A_k) визначається так:

$$C_{jk} = \sum_{i: a_{ij} \geq a_{ik}} w_i, \quad j, k = 1, \dots, n, \quad j \neq k \quad (1.15)$$

Зрозуміло, що індекс узгодженості лежить у межах [0,1].

Індекс розбіжності (discordance) альтернатив (A_j, A_k) визначається так:

$$d_{jk} = \max_{i=1, \dots, m} \frac{a_{ik} - a_{ij}}{a_{ij} - \min_{j=1, \dots, n} a_{ij}}, \quad j, k = 1, \dots, n, \quad j \neq k \quad (1.16)$$

²⁰) [10] Saaty T. (2002). Decision making with the analytic hierarchy process. Scientia Iranica, 9(3), pp. 215–229

Вводяться допустимі рівні узгодженості c^* та розбіжності d^* так, що виконується $0 < d^* < c^* < 1$. Вважаємо, що $A_j \succ A_k$, якщо $c_{jk} > c^*$ та $d_{jk} < d^*$, тобто індекс узгодженості вище заздалегідь обраного рівня, в рівень розбіжності – нижче

1.3.2.2 Методи PROMETHEE

Таблиця прийняття рішень також є основою для цього метода. Також накладаються обмеження на нормалізацію ваги на одиницю. Однак на відміну від ELECTRE-методів, дана група методів враховує особливості кожного критерію окремо [16]. Вводяться функції переваги $P_i(A_j, A_k)$, яка показує рівень переваги альтернативи A_j щодо альтернативи A_k при порівнянні за критерієм C_i . Ми розглядаємо тільки нормалізовані на одиницю функції, таким чином, виконується $0 \leq P_i(A_j, A_k) \leq 1$ і вірно:

$P_i(A_j, A_k) = 0$ означає відсутність переваг,

$P_i(A_j, A_k) \approx 0$ означає слабку перевагу,

$P_i(A_j, A_k) \approx 1$ означає сильну перевагу,

$P_i(A_j, A_k) = 1$ означає сувору перевагу.

В більшості випадків функція $P_i(A_j, A_k)$ є функцією різниці $d = a_{ij} - a_{ik}$, тобто $P_i(A_j, A_k) = p_i(a_{ij} - a_{ik})$, де p_i – неспадна функція, $p_i(d) = 0$, $d < 0$ $0 \leq p_i(d) \leq 1$, $d > 0$.

Далі вводиться багатокритеріальна функція переваг $\pi(A_j, A_k)$:

$$\pi(A_j, A_k) = \sum_{i=1}^m w_i P_i(A_j, A_k) \quad (1.17)$$

Ця функція теж приймає значення від 0 до 1 та представляє глобальну перевагу альтернатив A_j і A_k за всіма критеріями.

Для того, щоб виявити яка з альтернатив переважніше вводяться наступні функції:

Positive outranking flow:

$$\phi^+(A_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \pi(A_j, A_k) \quad (1.18)$$

Negative outranking flow:

$$\phi^-(A_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \pi(A_k, A_j) \quad (1.19)$$

Перша функція відображає силу даної альтернативи, тобто на скільки дана альтернатива вигідно відрізняється від інших (переважніше за всі інші). Чим більше значення цієї функції, тим краще альтернатива.

Друга функція відображає слабкість даної альтернативи, тобто скільки альтернатив краще, ніж ця. Чим менше значення цієї функції, тим краще альтернатива.

PROMETHEE I – метод

$$A_j \succ A_k \text{ якщо } \phi^+(A_j) \geq \phi^+(A_k) \text{ і } \phi^-(A_j) \geq \phi^-(A_k)$$

$$A_j \text{ і } A_k \text{ не розрізнявальні, якщо } \phi^+(A_j) = \phi^+(A_k) \text{ і } \phi^-(A_j) = \phi^-(A_k)$$

Інакше A_j і A_k непорівнянні.

PROMETHEE II – метод

Якщо потрібно завжди мати порівняння альтернатив (виключити випадки, коли альтернативи непорівнянні), то розглядається наступна функція:

$$\phi(A_j) = \phi^+(A_j) - \phi^-(A_j) \quad (1.20)$$

Таким чином, альтернативи:

$$A_j \succ A_k \text{ якщо } \phi(A_j) > \phi(A_k)$$

$$A_j \text{ і } A_k \text{ не розрізнявальні, якщо } \phi(A_j) = \phi(A_k)$$

Тепер все альтернативи можна порівняти і альтернатива з найбільшим $\phi(A_j)$ може вважатися найкращою.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІС ТА ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ ПРОСТОРОВИХ РІШЕНЬ

У цьому розділі наведено огляд геоінформаційних систем та їх вдосконалення з використанням інструментів багатокритеріального аналізу рішень MCDA, а також програмних інструментів, які допомагають краще представити результати аналізу.

2.1 Географічні інформаційні системи

Геоінформаційні системи (ГІС) можуть розглядатися як системи, які дозволяють користувачу вводити, зберігати, керувати, аналізувати та представляти дані про просторові дані. Вони не обмежуються комп'ютерними інструментами та можуть включати ручні процедури.

Наведемо одне з безлічі визначень ГІС, що зустрічаються в літературі. Географічна інформаційна система являє собою комп'ютерну інформаційну систему, яка дозволяє здійснювати введення, моделювання, зберігання, вилучення, обмін, маніпулювання, аналіз та представлення географічно прив'язаних даних.

Для досягнення цих функцій ГІС об'єднує технологію бази даних, картографію та статистичний аналіз. Для введення даних в систему, функціональні можливості ГІС включають збір, переформатування, геоприв'язку та накопичення вказаних даних. Керування цими даними включає функції, які зазвичай доступні в системах керування базами даних (СКБД) для зберігання та вилучення інформації. Дійсно, більшість ГІС є орієнтованими на базу даних та мають можливість здійснювати інтегрований аналіз як просторових, так і атрибутивних даних. Нарешті, ГІС дає змогу побачити дані у вигляді карт, таблиць, графіків, діаграм, тощо.

Існують протиріччя в судженнях різних авторів щодо функціональних можливостей ГІС, та належності її до конкретного типу систем. Деякі вва-

жають, що ГІС є окремим випадком інформаційних систем або систем підтримки прийняття рішень, які були розширені для обробки географічних даних, тоді як інші вважають їх системами, розробленими з метою маніпулювання як просторовими, так і непросторовими даними. Оскільки ГІС використовується в безлічі дисциплін і предметів.

2.2 Моделі даних

ГІС використовують два типи даних: просторові дані та дані атрибутів. Перший тип описує розташування просторових одиниць (наприклад, земельні ділянки, будинки, вулиці, річки, озера, муніципалітети, провінції, країни, тощо). Дані атрибутів відносяться до властивостей цих просторових сутностей і називаються табличними даними. Вони є кількісною та/або якісною інформацією, яку можна знайти в звичайних системах управління базами даних.

Просторові об'єкти можуть належати до однієї з трьох груп: точок, ліній та полігонів (або областей). Точки – це координати на карті, які можуть бути використані для представлення простих місць, таких як вершина, точки інтересу, тощо. З трьох типів просторових сутностей точки містять найменшу кількість інформації, оскільки неможливі вимірювання (тобто розмір або об'єм об'єкта). Точки, однак, можуть бути використані для представлення областей у меншому масштабі. Наприклад, міста на карті світу будуть представлені точками замість полігонів.

Точки також можуть бути з'єднані для формування ліній, які використовуються для позначення лінійних об'єктів, таких як дороги, стежки, річки. У ліній вже є довжина. Нарешті, замкнуті лінії або двовимірні полігони використовуються для географічних об'єктів, які охоплюють певну поверхню, такі як озера, будівлі. Вони також можуть представляти межі різних областей, таких як ліси, міста, країни.

Геопросторові дані зазвичай діляться на два класи: векторні дані та растрові дані. Ці два типи моделей даних говорять про те, як дані зберігаються в системі.

Векторний формат для зберігання просторових даних використовує вектори, які є лінійними сегментами, визначеними їх кінцевими точками. Вектор розміру 0 представляє точку. Послідовність взаємопов'язаних векторів являє собою лінію, а ланцюжки векторів, які повертаються назад до їх відправної точки, можуть представляти межі області або полігону. На відміну від растрової моделі, де простір явно дискретизується як сітка, векторна модель використовує координатування простору для визначення кінцевих точок кожного вектора. Використання векторних даних спрощує декілька операцій, коли існує необхідність об'єднати або масштабувати дані з різних джерел.

Растрові дані структуровані як масив або сітка комірок з пікселями. Растри можуть представляти будь-яку з трьох просторових одиниць, згаданих раніше (рис. 2.1). Таким чином, точки можуть бути представлені одним пікселем, лінії – послідовністю з'єднаних пікселів, а області – групою сусідніх пікселів. Растри можуть полегшити обробку даних або систематичні операції, оскільки масиви зазвичай підтримуються мовами програмування. Проте вони неефективні з точки зору використовуваного об'єму пам'яті. Якщо одиниці, що представляються, не мають складних форм, відображення просторових об'єктів, що використовують растри, буде займати більше місця, ніж ті ж одиниці, що використовують векторну модель даних.

2.3 Приклади просторового аналізу

ГІС має велику панель інструментів просторового аналізу. Щоб продемонструвати кілька можливостей та функцій, що підтримуються ГІС, розглянемо ряд прикладів, які ілюструють їх через різні типи програм.

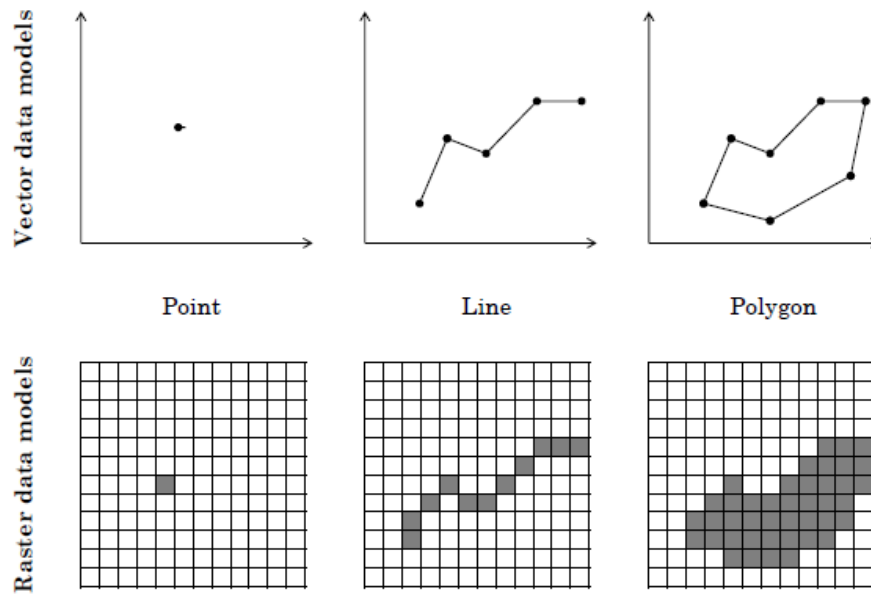


Рисунок 2.1 – Векторні та растрові моделі в ГІС

Інвентаризація ресурсів. За допомогою ГІС можлива інвентаризація просторово прив'язаних ресурсів. Як і будь-яка інша інформаційна система, ГІС здатна збирати дані з різних джерел, зв'язувати та поєднувати їх. За умови, що окремі джерела даних є сумісними за допомогою загальної просторової координатної системи, система зможе порівняти їх. Таким чином, ГІС може бути використана як інструмент для об'єднання даних з різних джерел інформації та управління ними.

Мережевий аналіз. Однією з найбільш затребуваних функцій ГІС є мережевий аналіз, який дозволяє системі управляти цілими мережами для транспортування, зв'язку і застосовувати на них різні алгоритми. При цьому система спроможна відповідати на запитання, наприклад, про найменший шлях до даного пункту призначення, обчисливши маршрут, який пов'язує декілька пунктів. Критеріями, що розглядаються тут, можуть бути відстань, але також час, за яким потрібно подорожувати, витрати на певні шляхи або пропускна здатність певних гілок в мережі за умови проблеми з потоком. В цьому аналізі використовуються алгоритми безпосередньо із теорії досліджень операцій,

такі як методи знаходження найкоротшого шляху, задача комівояжера, або метод критичного шляху.

Розподілені дані. Подібно до збору даних з кількох джерел, ГІС може поширювати свої послуги в мережі зв'язку. Вхідні дані можна отримати з декількох веб-служб, користувачі можуть проглянути отриману інформацію на відстані, розрахункові маршрути можуть надсилатися на мобільні термінали, а результати просторового аналізу можуть бути розміщені на картах, які будуть надруковані. Таким чином, ГІС часто використовується, коли необхідна спільна система, яка об'єднує декілька входів або залучає зацікавлених сторін до співпраці.

Територіальний аналіз. Територіальний аналіз базується на використанні даних рельєфу (рис. 2.2), щоб отримати інформацію про крутизну схилу. Ці моделі, які можна переглянути в трьох вимірах, можуть бути використані для виконання більш складних аналізів, таких як розрахунок водозбірних зон чи зон видимості. Водозбірні зони використовуються в гідрографії для прогнозування рівнів води в разі опадів. Зон видимості – це приклад аналізу видимості, який обчислює всі області, з яких видима точка. Вони можуть бути використані в дослідженнях в області регіонального планування для розташування вітрових турбін поза видимості жителів.

Аналіз на основі шару. На основі цього аналізу використовуються запити, які включають вибір за певними обмеженнями. Наприклад, знайти всі лікарні, що знаходяться в радіусі 5 км від аварії, або всі антени, що знаходяться в межах 0,5 км від основної дороги та всередині міста. Для проведення такого аналізу ГІС надає користувачу дві основні функції: буферизацію (buffering) та накладання (overlay). Буферизація означає утворення областей, які задовольняють обмеженням за відстанню, наприклад площа в межах 0,5 км від основної дороги. Буфери зазвичай круглі або прямокутні навколо точок і коридорів постійної ширини навколо ліній. На рис. 2.3 показані приклади буферів для цих двох випадків. Логічне накладання стосується об'єднання, перетину, різниці або інших варіантів логічних операторів між декількома

шарами. Це дозволяє ГІС поєднувати кілька обмежень для створення єдиної карти об'єктів, які їх задовольняють.

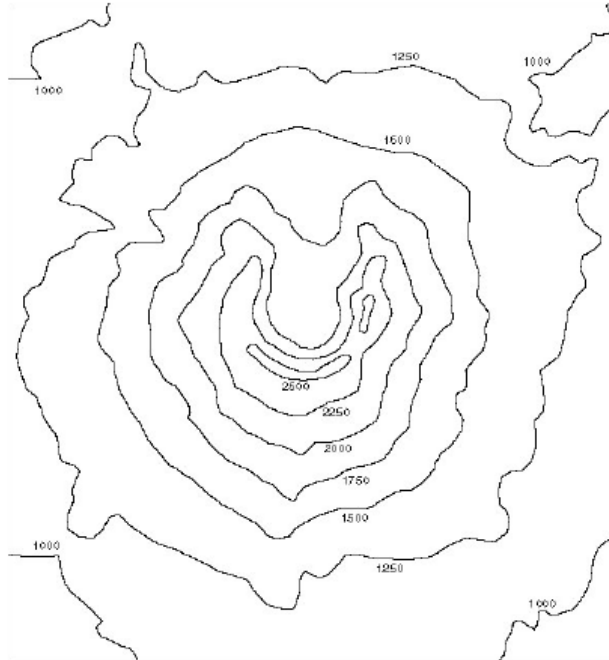


Рисунок 2.2 – Карта ізоліній, де кожна лінія має постійну висоту

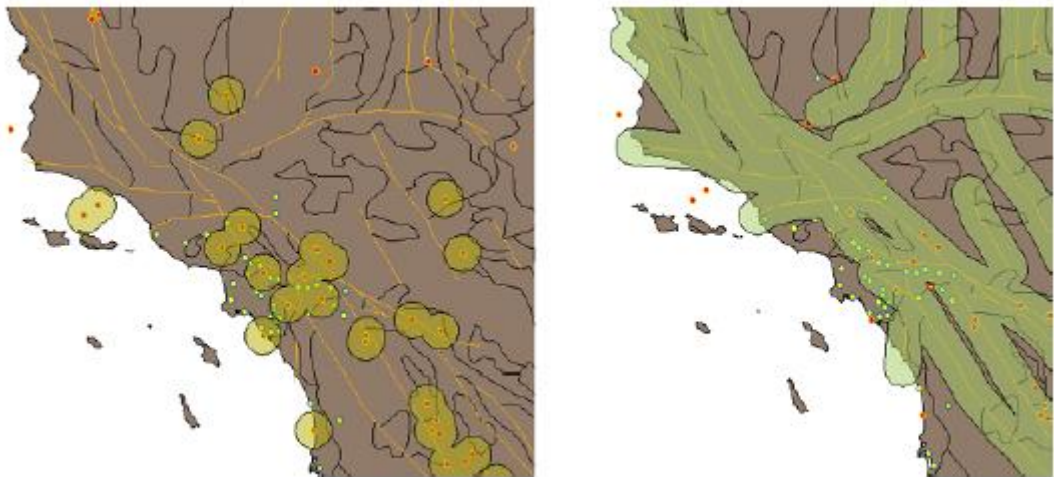


Рисунок 2.3 – Буферні карти для точок та ліній

Аналіз місця розташування. Моделі місцевості та аналіз шарів, описані вище, можуть бути використані для вибору місць розташування. Для їх виконання, ГІС пропонують інші функції, які служать для створення деяких шарів, які будуть використовуватися в аналізі. Одним із прикладів є створення карт ізохронів, які показують сусідство певних місць, виходячи з відстані або часу, необхідного для їх досягнення. Інший приклад – використання проксимальних полігонів або діаграм Вороного/Тіссена. Вони відокремлюють місцевість у полігонах, які містять область, найближчу до певної точки. Приклад такого результату наведено на рис. 2.4.

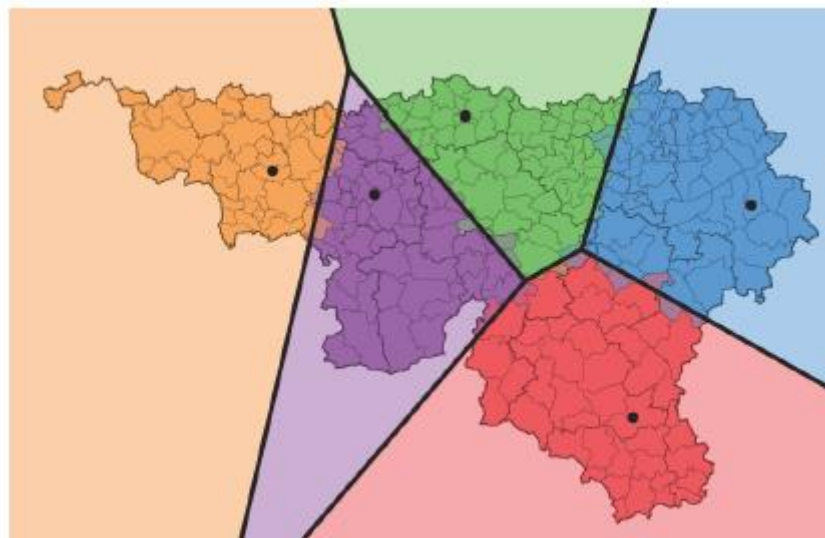


Рисунок 2.4 – Діаграма Вороного, яка отримана для п'яти точок

Просторово-часовий аналіз. Існує мало робіт щодо використання трьох видів вимірювань прив'язаних даних (наприклад, простору, часу та атрибуту). Незважаючи на те, що існуючі системи здатні збирати та зберігати часові дані, при аналізі та використанні їх для прогнозування, виникають декілька труднощів. Цей тип аналізу може привести до розуміння часової еволюції просторових явищ, якщо вони правильно оброблені.

На закінчення, в залежності від аналітичної обробки, яку вимагає аналіз, ми могли б розмістити їх в одній з трьох категорій:

- 1) Геометричний чи топологічний аналіз, якщо для аналізу потрібні логічні операції (наприклад, зв'язність, накладання) над просторовими об'єктами;
- 2) Аналіз атрибутів, якщо це пов'язано з варіаціями атрибутів області (наприклад, висота, тип ґрунту, швидкість вітру), які можуть бути дискретними або безперервними;
- 3) Мережевий аналіз, який включає в себе конфігурацію зв'язків між вузлами (наприклад, дорожньої мережі, мережами громадського транспорту, мережами дротових комунікацій, тощо).

2.4 Аналітичні обмеження ГІС

У порівнянні з потужними можливостями маніпулювання даними ГІС, їх функції просторового аналізу можуть бути досить елементарними. Дійсно, більшість ГІС зосереджені на аспектах картографії та керуванні картографічними даними, а не їх аналізом. 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, створення буферів, статистичний аналіз атрибутивних даних, інтерполяція та мережевий аналіз. Ці функціональні можливості, хоч і потужні, швидко досягають меж, коли вони використовуються в складних ситуаціях. Приклад таких обмежень:

- результати функції накладання швидко стають невіддільними, коли кількість відповідних факторів перевищують чотири або п'ять;
- у більшості процедур накладення не враховується той факт, що використовувані змінні можуть мати різне значення (тобто що вони можуть бути зважені по-різному);

– використання функції накладання включає в себе специфікацію ряду параметрів, таких як порогові значення. Це може привести до втрати даних і іноді визначається довільно.

2.5 Інтеграція БКАР і ГІС

З описаних вище функціональних можливостей ГІС дійсно зрозуміло, що вони розроблені для підтримки прийняття рішень. Через їхню здатність отримувати інформацію з необроблених просторових даних, ГІС можуть допомагати приймати обґрунтовані рішення. Інтеграція БКАР і ГІС може ще більше підштовхнути до розвитку ці сильні сторони. Слід зазначити, що ГІС вже підтримує картографічне моделювання та операції алгебри карт. Вони можуть бути використані для побудови простих моделей БКАР, таких як зважена сума. БКАР, однак, не обмежується лише моделями агрегації. Існує кілька інструментів підтримки, які можуть мати чималий вплив на процес прийняття рішень.

Структурування проблеми прийняття рішення. БКАР пропонує широкий спектр методів та інструментів, які допомагають структурувати проблему прийняття рішення: методи агрегування, процедури аналізу чутливості, методи створення або опису альтернатив, виявлення параметрів, врахування невизначеності тощо. Більшість просторових досліджень дійсно засновані на альтернативно орієнтованих підходах, де рішення знаходяться в центрі дослідження. БКАР пропонує інші способи розгляду проблеми, які більше засновані на фундаментальних елементах аналізу, таких як судження про цінність і корисність особи, яка приймає рішення.

Масштабування значень. Деякі процедури БКАР вимагають оцінювання для різних критеріїв, які повинні бути перетворені в порівнянні одиниці. Лінійні масштабні перетворення є найпростішими і найчастіше використовуються в реалізації ГІС. БКАР, однак, виділив інші типи перетворень, таких

як функції цінності/корисності та функції переваг, які призначені для формального представлення судження людини.

Зважуванні критерії. У всіх випадках, пов'язаних з просторовим рішенням, розглянуті критерії, імовірно, матимуть особливе значення для осіб, які приймають рішення. Найпопулярнішою процедурою зважування, яка використовується для підтримки прийняття рішень на основі ГІС, є метод зважування від Томаса Сааті. Існують і інші методи, такі як компромісні підходи.

Правила прийняття рішень. Правила прийняття рішень стосуються найбільш фундаментальних процедур, які генерують результати (наприклад, упорядкування, вибір тощо). БКАР надає різні методи та технології для кожного конкретного типу проблеми або ситуації. Існують декілька класів цих методів, і вибір відповідної технології є окремою проблемою сама по собі. Застосування правильного методу, однак, гарантує хороші результати та надає набір сумісних інструментів для документування рішення.

Аналіз чутливості. Унікальна ознака БКАР, яка не має еквівалента в ГІС, – це етап аналізу чутливості. Він визначає надійність отриманих результатів на основі варіації параметрів методу. Він зазвичай застосовується до ваг критеріїв і може бути здійснений систематично. Мало хто з дослідників використовують аналіз будь-якої форми чутливості при роботі з просторовим контекстом. Включення таких інструментів в ГІС дасть додатковий внесок у підтримку проблем просторового вирішення.

3 БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ГІС

3.1 Класифікація проблем GIS-MCDA

В роботах [1, 5]²¹ запропонована класифікація проблеми GIS-MCDA з використанням двох точок зору: компоненти ГІС та компоненти БКАР. Розглядаючи геоінформаційні компоненти, проблему можна поділити на три основні дихотомії:

1) Растрова або векторна модель даних. Типи даних, що використовуються для представлення географічних об'єктів, мають значення, оскільки методи, що застосовуються для кожного типу, сильно відрізняються. Моделі даних, що базуються на растрах, вимагають використання безперервних методів, тоді як моделі на основі векторних даних використовують дискретні 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, схил, близькість, висота для розрахунку оцінок альтернатив.

3) Явні або неявні просторові альтернативи. Ця різниця використовується для диференціювання випадків, коли просторовий компонент альтернативи визначається явно або неявно. Явні просторові альтернативи виникають у вирішенні проблем, таких як вибір місця розташування, місцеположення, придатність землекористування, зонування нарешті, у цих проблемах альтер-

²¹⁾ [1] Malczewski J. A GIS-based multi-criteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science* Vol. 20, No. 7, 2006, pp. 703–726

[5] Malczewski J. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1999. ISBN: 0-471-32944-4

нативи є просторовими об'єктами або їх комбінаціями. На противагу, неявно просторові альтернативи відносяться до проблем вирішення, де реалізовані рішення можуть мати ряд позитивних або негативних наслідків у певних місцях. До цього виду проблеми можливо 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 компонентів БКАР виділяють ще три дихотомії для класифікації проблем GIS-MCDA.

Мультиатрибутивний та мультицільовий аналіз рішення. У багатьох проблемних питаннях набір альтернатив, які пройдуть процес відбору, заздалегідь є визначеним та обмеженим. Ці методи можна назвати дискретними методами. З іншого боку, мультицільові проблеми, як правило, неперервні, тому що зазвичай визначаються через використання обмежень. В роботі [5]²²⁾ автор розділяє БКАР, відповідно до типів правил прийняття рішень, які вони використовують. Таким чином, мультиатрибутивні підходи поділяються на наступні категорії:

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

Мультицільові підходи розділені на чотири категорії:

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

²²⁾ [5] Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1999. ISBN: 0-471-32944-4

– інше.

Індивідуальне та групове прийняття рішень. Більшість проблем включає лише одну особу, що приймає рішення. Проте може бути кілька осіб або груп інтересів, представлених різними структурами цільових переваг. В цьому випадку рішення проблеми називається груповим прийняттям рішень.

Рішення в умовах визначеності та невизначеності. Такий розподіл залежить від обсягу інформації, яка доступна для осіб, які приймають рішення або аналітиків. 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.

В роботі [17]²³⁾ запропоновано сценарій процесу прийняття рішень, який ґрунтується на категоріях, які також використовуються в роботі [5]²⁴⁾. Результат у вигляді блок-схеми представлений на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Блок-схема сценаріїв прийняття рішень

²³⁾[17] 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

²⁴⁾ [5] Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1999. ISBN: 0-471-32944-4

3.2 Елементарні функції БКАР

Для спрощення процесу інтеграції БКАР в ГІС прийнято представляти процес підтримки прийняття рішень БКАР у вигляді елементарних функцій, список яких представлений в табл. 3.1. На рис. 3.2 наведено огляд цих функцій у двох підходах, що складаються з мультиатрибутивного (дискретного) та мультицільового (безперервного) прийняття рішень. Ця діаграма базується на тому, що всі методики використовують аналогічний процес підтримки рішень, який починається зі збирання даних, розробки моделі рішення, застосування правил прийняття рішень та рекомендації.

Таблиця 3.1– Елементарні функції БКАР

№ з/п	Функція БКАР	Підхід прийняття рішень
1	Визначення/генерація альтернатив	Дискретний
2	Побудова карт критеріїв	Дискретний
3	Побудова карт атрибутів	Дискретний
4	Визначення математичної програми	Безперервний
5	Рішення математичної програми	Безперервний
6	Генерування таблиць переваг	Дискретний
7	Квантування	Дискретний
8	Нормалізація	Дискретний
9	Попередній аналіз домінування	Дискретний
10	Генерація можливих рішень	Дискретний/ Безперервний
11	Визначення переваг	Дискретний/ Безперервний
12	Зважування критеріїв оцінки	Дискретний/ Безперервний
13	Аналіз чутливості/надійності	Дискретний/ Безперервний
14	Агрегація	Дискретний
15	Пропозиція	Дискретний

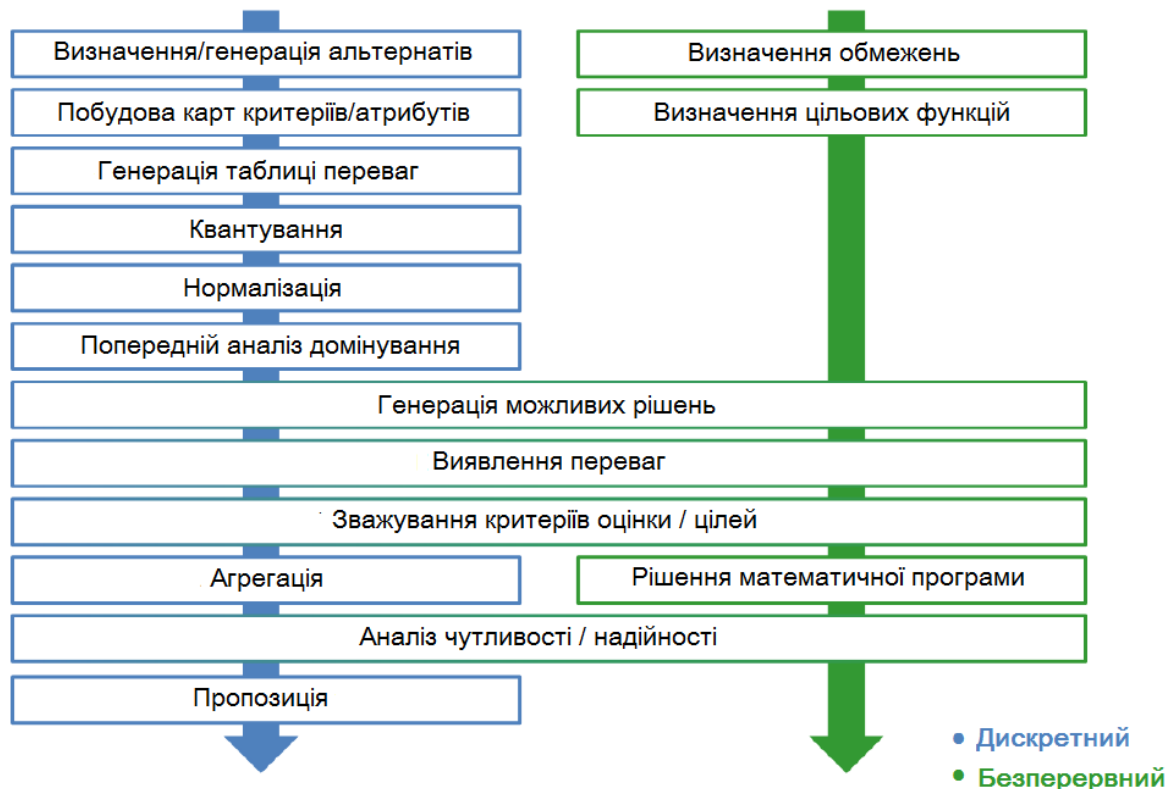


Рисунок 3.2 – Схеми для елементарних функцій БКАР

Якщо ці кроки будуть розділені на основні компоненти та будуть застосовані в ГІС, вони дозволять користувачу побудувати свою власну програму БКАР, використавши функції в якості будівельних блоків. І дійсно, майже всі методи агрегації БКАР можуть бути розкладені таким чином.

3.3 Типи інтеграції моделі GIS-MCDA

Географічні інформаційні системи завжди розглядалися як системи підтримки прийняття рішень через їх функціональні можливості управління даними, аналізу та візуалізації. Проте самостійно вони не мають аналітичних функцій, щоб одночасно враховувати декілька факторів і отримувати багатозорові результати. Впровадження багатокритеріальних агрегаційних функцій, інструментів чутливості та методологій в цілому може допомогти покращити просторовий аналіз. Протягом останніх двадцяти років спроби інтеграції до-

сягли значного прогресу. Розроблені програми, що дозволяють спільне використовувати ці дві дисципліни, та нові методи, що враховують специфічні та багатокритеріальні питання. Подібні системи можуть бути розміщені на декількох технічних рівнях інтеграції, починаючи від слабких зв'язків до повністю інтегрованих систем.

Слабий зв'язок – цей тип інтеграції полягає у використанні певних програм або інструментів для різних етапів аналізу. Загальний процес прийняття рішень може нагадувати наступні кроки:

- 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 цими 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 МКАР для етапу оцінки.

Тісний зв'язок – це тип інтеграції коли засоби одного процесу (як правило, БКАР) реалізовані як модуль або скрипт в іншу систему, 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, що давали доступ до аналізу БКАР.

Повна інтеграція – це повністю інтегрована система MCDA-GIS, що має мультикритеріальну функціональність та функцій просторового аналізу, та дозволяє користувачу отримувати доступ до будь-якої з них у 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 моделі GIS-MCDA наведений у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Опис систем з різними типами інтеграцій моделі GIS-MCDA

Назва	Слабке з'єднання	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 проблем, що зустрічаються найчастіше
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 визначеним методом або інструментами

В даній науковій роботі буде створено програмне забезпечення, яке можна віднести до системи зі слабким зв'язком. Розроблений окремий ін-

струмент (скрипт) для ГІС не можна назвати повнофункціональним, тому що визначення ваг критеріїв буде відбуватися у спеціалізованій МКАР системі.

3.4 Існуюче програмне забезпечення GIS-MCDA

Перша комерційна ГІС, яка інтегрувала процедури для методології SMART та визначення ваг за допомогою методу Сааті була ГІС IDRISI (рис. 3.3). Поточна версія програмного забезпечення включає в себе повний модуль БКАР з підтримкою процедури Ordered Weighted Average (OWA), евристичного MOA та методу аналізу ієрархій (АНР).

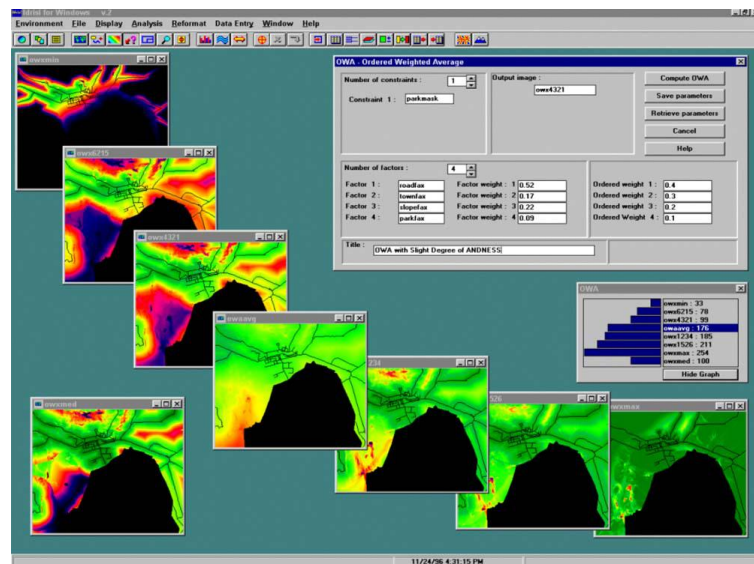


Рисунок 3.3– Інтерфейс IDRISI GIS

Найпоширеніший на даний час комерційний 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. Серед них є методи: АНР, OWA, SAW, TOPSIS та ін. Але на жаль ArcScript більше не відкривається для нових внесків, але ESRI додав кілька інших послуг для заміни. Ця поведінка

характерна для більшості програмних платформ, що передбачає можливість розширення функцій для залучення користувацьких спільнот.

Третя система, яка заслуговує розгляду, – це програма DECERNS SDSS, що розроблена в Обнінському університеті, Росія та є інтеграцією БКАР та ГІС в єдину веб-архітектуру [18]²⁵⁾. Оскільки вона має одну базу даних, ця система дозволяє користувачу швидко перейти на будь-який інструмент у будь-який момент аналізу. Таким чином, можна задіяти більш ітеративний процес тестування надійності моделі та зміни параметрів, перш ніж подавати належні рекомендації. Система реалізує вражаючу кількість методів БКАР (наприклад, MAVT, MAUT, ANP, TOPSIS, PROMETHEE, SMAA, FlowSort) та допоміжних інструментів. Однак, хоча обидва інструменти були розроблені разом, вони зберігалися 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 окремо, тому що має змінювати інтерфейси, щоб використовувати один з них. Тим не менш, заплановані деякі поліпшення, що означає, що DECERNS може стати однією з перших повних систем для забезпечення повного інтеграційного досвіду для користувачів. На рис. 3.4 і 3.5 показані скріншоти підсистеми підтримки прийняття рішень (DMS) та підсистеми ГІС.

Останні три системи були прикладами інтегрованих систем, але є й інші варіанти вирішення проблеми, пов'язаної з інтеграцією БКАР та ГІС. Так більшість аналітиків для проблем, які не вимагають надто складних аналітичних функцій, використовують об'єднання окремого програмного забезпечення для різних етапів аналізу. Аналітичні програми, такі як R, Mathworks Matlab та Microsoft Excel використовують в просторовому аналізі деяких ос-

²⁵⁾ [18] 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

новних ГІС. Тому більшість із них можуть експортувати свої дані атрибутів в найбільш популярні формати, такі як Excel або CSV.

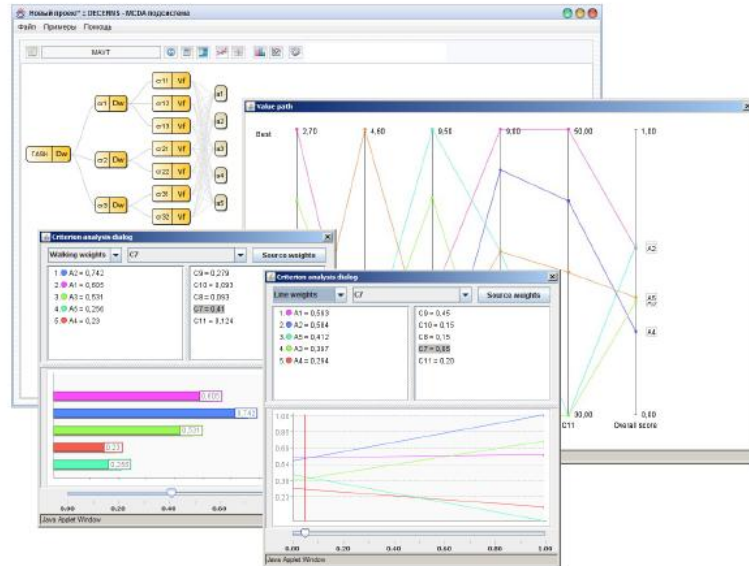


Рисунок 3.4 – Підсистема DMS системи DECERNS SDSS [18]

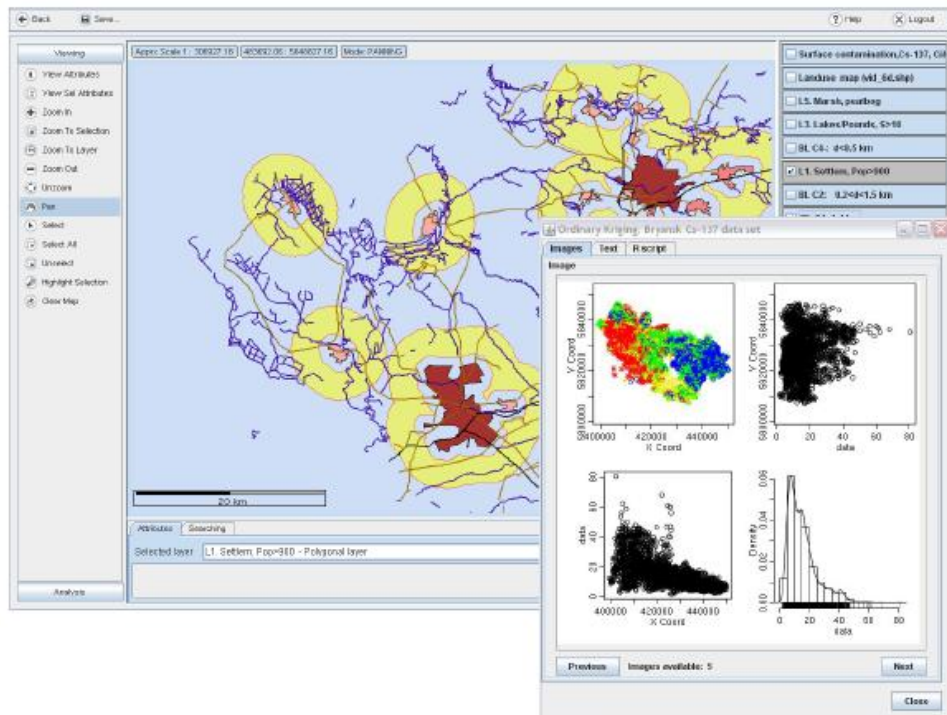


Рисунок 3.5 – Підсистема GIS системи DECERNS SDSS [18]

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

Деякі комерційні ГІС, такі як ArcGIS ESRI або Microsoft MapPoint, також доступні як інтерфейси API (тобто інтерфейси прикладного програмування). 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.

3.5 Процес прийняття рішень в GIS-MCDA

Кілька дослідників запропонували концепції схеми для процесів прийняття рішень, починаючи з [5]²⁶⁾, в спробі визначити інструменти, які були б найбільш необхідні для кожного етапу аналізу. На рис. 3.6 показані три фази, які складаються з наступних етапів:

1) Фаза збору інформації. Аналітик збирає дані про проблему для визначення способу використання та зберігання інформації в ГІС:

– визначення проблеми – цей крок визначає мету процесу, вибір конкретного проблемного рішення (вибір, ранжування, сортування, опис);

– критерії оцінки – оскільки деякі критерії можуть бути просторовими, аналітик може використовувати ГІС для їх розробки за допомогою експертів;

²⁶⁾ [5] Malczewski J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1999. ISBN: 0-471-32944-4

– обмеження – оскільки альтернативи для цих проблем будуть просторово-орієнтовані, аналітик може використовувати ГІС для виявлення даних, що їх обмежують.

2) Фаза проектування. Після збору всіх необхідних даних, на другому етапі аналітик проектує модель для вирішення проблеми, яка буде залежати від багатокритеріальних функцій:

– альтернативи – коли обмеження були введені, якщо такі є, аналітик може створити перелік альтернатив або набір можливих рішень;

– матриця рішень – коли визначено критерії і альтернативи, аналітик може запустити таблицю оцінювання за допомогою експертів, якщо це необхідно. У деяких випадках, якщо всі необхідні дані були зібрані раніше, цей крок може бути автоматичним;

– переваги ОПП – на цьому етапі особа, що приймає рішення, може вказати свої погляд на проблему та допомогти аналітику ввести параметри обраного методу;

– правила прийняття рішень – залежно від використовуваного методу іноді є потреба вдатися до правил прийняття рішень.

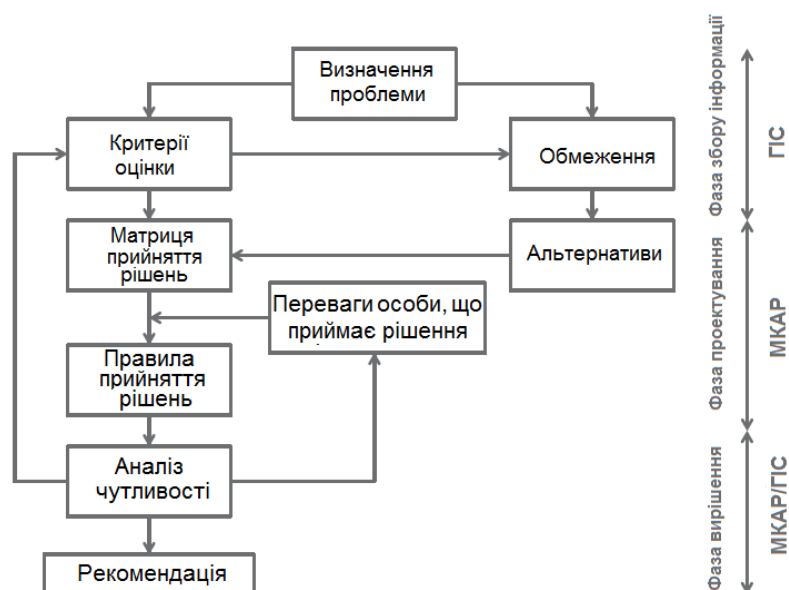


Рисунок 3.6 – Блок-схема прийняття рішення

3) Фаза вирішення. Нарешті, коли модель буде завершено, вона зможе бути використана для вивчення набору прийнятних рішень:

– аналіз чутливості – цей крок допоможе перевірити надійність отриманого рішення або налаштувати модель відповідно до побажань ОПР;

– рекомендація – наприкінці аналізу, як очікується, аналітик надасть вичерпний висновок та обґрунтує його рекомендації щодо вирішення проблеми та пояснить, як їх реалізувати.

4 РОЗРОБКА ГІС-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТУ БКАР

Опишемо методологію БКАР, яку надалі будемо реалізовувати у вигляді окремого програмного інструменту ГІС. Програмний інструмент зможе виконувати наступні дії з растровими шарами карти, що представляють собою критерії оцінки альтернатив:

- виконувати перекласифікацію растрових шарів відповідно до заданих діапазонів перекласифікації;
- виконувати розрахунок вагових коефіцієнтів важливості критеріїв оцінки відповідно до МАІ;
- виконувати згортку оцінок альтернатив за різними критеріями оператором агрегування зважена сума.

Програмний інструмент буде створений як скрипт, написаний на мові програмування Python.

За допомогою розробленого програмного інструменту спробуємо вирішити наступне завдання. Виконаємо ранжування території м. Одеса за ступенем придатності для проживання ОНР. Будемо враховувати вимоги ОНР, а саме: віддаленість від промислових районів міста, близькість до паркових і пляжних зон, наявність транспорту та близькість транспортних зупинок. Ієрархія прийняття рішень для даної задачі наведена на рис. 4.1.

Для виконання даного багатокритеріального аналізу в ГІС, був створений проект в пакеті ESRI ArcGIS з векторними шарами критеріїв: промислові зони, паркові зони, пляжні зони, транспортні зупинки (рис.4.1). Векторні шари були імпортовані з картографічного веб-сервісу OpenStreetMap. За допомогою інструменту Euclidean Distance були побудовані растри критеріїв, кожна комірка якого містить значення евклідової відстані від найближчого об'єкту. Це і будемо вважати підготовкою вхідних даних для створюваного інструменту БКАР.

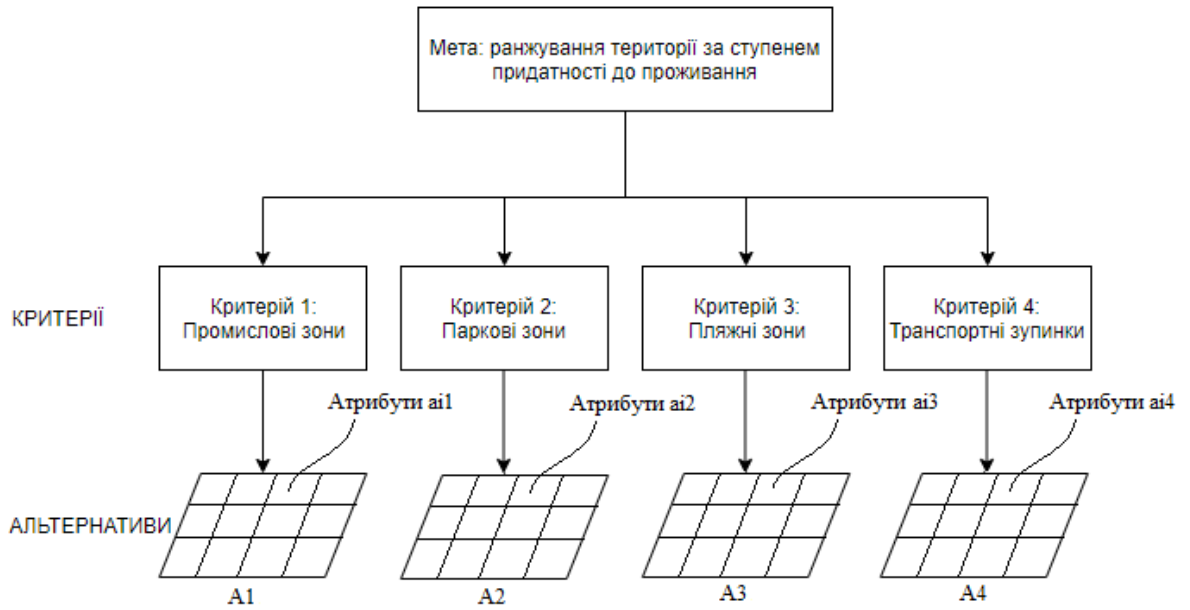


Рисунок 4.1 – Ієрархія прийняття рішень по пошуку придатних місць проживання

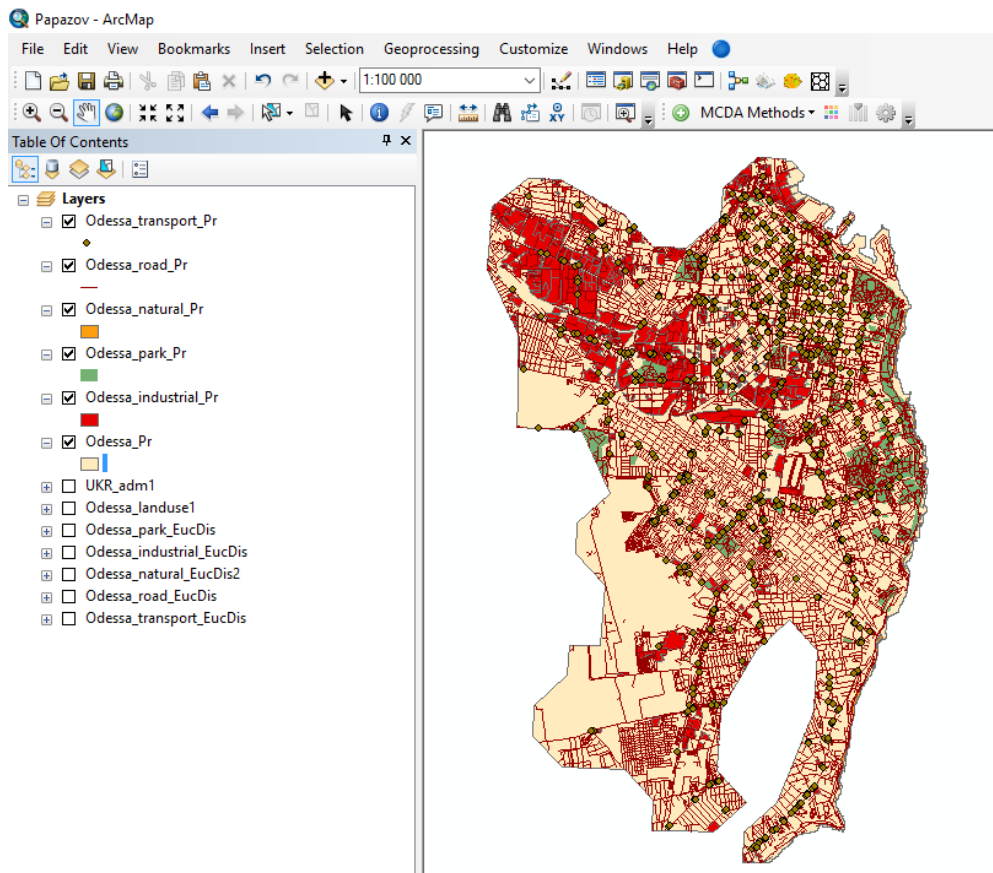


Рисунок 4.2 – Проект Арсмар

Розглянемо можливості мови програмування Python для створення інструментів геообробки даних, а далі кожний етап аналізу окремо.

4.1 Створення інструментів за допомогою Python

Мова Python є незалежною, міжплатформною, відкритою мовою програмування, швидкою, потужною і легкою в освоєнні. Вона широко використовується і підтримується [19]²⁷.

Python з'явився в ArcGIS версії 9.0. З тих пір він використовувався в якості однієї з мов для написання скриптів, що містять процеси геообробки; область його застосування продовжує розширюватися. Кожен випуск розширював можливості Python і робив його використання все більш зручним.

ESRI остаточно впровадив Python в ArcGIS та розглядає цю мову в якості основного засобу, який задовольняє всі потреби користувачів. Перелічимо деякі переваги Python:

- легкий у вивченні, він ідеально підходить для початківців, залишаючись при цьому відмінним засобом для досвідчених користувачів;
- відмінно масштабований, він підходить як для великих проектів, так і для маленьких одноразових програм, відомих як скрипти;
- портативність і міжплатформність;
- вбудованість (написання скриптів в ArcGIS);
- стабільна і впевнена робота;
- велике співтовариство користувачів.

Python поширюється на всю систему ArcGIS, перетворюючись в мову аналізу, перетворення даних, автоматизації картографічних процесів, і дозволяє збільшити продуктивність цих робіт.

Бібліотека ArcPy забезпечує доступ з Python до всіх інструментів геообробки, включаючи додаткові модулі, а також пропонує велику кількість ко-

²⁷⁾ [19] Офіційний сайт Python URL: <http://www.python.org> (Дата звернення 10.11.2019)

рисних функцій і класів для роботи з даними ГІС. Використовуючи Python і ArcPy, можна розробляти велику кількість зручних програм для роботи з географічними даними.

Модулі ArcPy являє собою файл Python, що містить функції і класи. ArcPy підтримується різними модулями, включаючи 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).

Класи ArcPy можна використовувати для створення об'єктів, що їх називають екземплярами. Такі класи ArcPy як SpatialReference і Extent часто використовуються як ярлики для завдання параметрів для інструментів геообробки, які інакше довелося б ставити у вигляді складних рядків.

Функції ArcPy – частина програми, що виконує певне завдання. Функція може включатися в більш велику програму. У ArcPy всі функції геообробки представлені у вигляді функцій, проте не всі функції є інструментами геообробки. Крім інструментів в ArcPy є кілька функцій для поліпшення робочих процесів геообробки з використанням Python. Функції (часто звані методами) можуть використовуватися для створення списків певних наборів даних, вилучення властивостей набору даних, перевірки імені таблиці перед її додаванням в базу геоданих, а також для виконання багатьох інших корисних завдань геообробки.

Автономний скрипт Python – це виконуваний файл з розширенням .py, який можна запустити з командного рядка, з інтегрованої середовища розробки Python (IDE) або двічі клацнувши файл .py в провіднику Windows.

Інструмент-скрипт Python – це скрипт Python, який доданий в набір інструментів геообробки. Після додавання в якості інструменту-скрипта, він починає вести себе як будь-який інший інструмент геообробки – його можна відкрити і запустити з діалогового вікна, використовувати у вікні Python або ModelBuilder, а також викликати з інших скриптів та інструментів-скриптів.

ArcPy – це пакет, який заснований на успішному модулі `arcgisscripting`. Його метою є створення основи для успішного і продуктивного виконання аналізу географічних даних, конвертації даних, управління даними і автоматизації карти в Python.

Додатки та скрипти ArcGIS написані з використанням ArcPy дозволяють отримати доступ до численних модулів Python, розроблених користувачами ГІС і програмістами, що працюють в різних галузях. Ще одна перевага використання ArcPy в середовищі Python полягає в тому, що Python є універсальною мовою програмування, яка дозволяє працювати в режимі інтерпретації, що дає можливість швидко моделювати і перевіряти скрипти в інтерактивному середовищі, а також підтримує можливість написання великих додатків.

З технічної точки зору інструменти геообробки представляють собою функції, які можна викликати з `arcpy`, як і будь-яку іншу "рідну" функцію цього модуля. Проте, щоб уникнути плутанини між інструментами і відмінними від них функціями, такими як утиліта `ListFeatureClasses()`, існують чіткі відмінності.

Інструменти документуються інакше, ніж функції. У кожного інструменту є довідкова сторінка в довідковій системі ArcGIS Desktop. Функції документуються в документації ArcPy. Інструменти на відміну від функцій повертають об'єкт `result`. Інструменти створюють повідомлення, до яких можна звертатися за допомогою багатьох функцій, таких як `GetMessages()`. Функції не створюють повідомлень. Інструменти ліцензуються на рівні продукту (ArcGIS for Desktop Basic, Standard або Advanced) або на рівні додаткових модулів ArcGIS Network Analyst, ArcGIS Spatial Analyst та ін. Функції не потребують ліцензування, вони встановлюються разом з ArcPy.

При виконанні інструменту геообробки результат його роботи повертається у вигляді об'єкта `result`. Зазвичай це шлях до вихідного набору даних, який був створений або оновлений за допомогою інструменту. В інших випадках це можуть бути інші типи значень, такі як число або логічне значення.

Якщо вихідні дані є багатозначним параметром, значення можуть бути повернуті як список в списку.

Крім інструментів ArcPy містить велику кількість функцій для поліпшення підтримки процесу геообработки. Функції можна використовувати для створення списків певних наборів даних, отримання властивостей наборів даних, перевірки наявності даних, перевірки імен таблиць перед додаванням їх в базу геоданих або для виконання безлічі інших завдань, що вирішуються за допомогою скриптів.

4.2 Перекласифікація растрів за заданими діапазонами значень

Як вже було відмічено раніше, атрибути альтернатив, тобто значення комірок растрових шарів критеріїв повинні бути нормовані у діапазоні $[0,1]$, що зробить можливим їх порівняння та згортку оцінок. Для перекласифікації растрів в пакеті ArcGIS використовується інструмент Reclassify. Даний інструмент виконує перекласифікацію растру в інтервалі $[0,10]$, так як показано на рис. 4.1, а далі з використанням інструменту «Алгебра карт» (рис. 4.2) усі значення комірок отриманого растру можна поділити на 10, та отримати стандартизований в діапазоні $[0,1]$ растр критерію.

Для перекласифікації растрових шарів нашого проекту будемо використовувати в якості вихідних даних один з можливих варіантів переваг ОНР, представлений у табл. 4.1. Відмітимо, що програмний інструмент, що розроблюється, індиферентний до вихідних даних, діапазони задає користувач при запуску інструменту перекласифікації.

Приклад запуску інструменту перекласифікації для критерію паркові зони наведено на рис. 4.3. Вікно запуску інструменту «Алгебра карт» наведено на рис. 4.4.

Наступним етапом процедури БКАР є розрахунок ваги критеріїв, який буде виконувати методом аналізу ієрархій.

Таблиця 4.1 – Діапазони перекласифікації для критеріїв

Критерії	Значення перекласифікації					
	10	8	6	4	2	0
Промислові зони	більше 5000 м	4000 – 5000 м	3000 – 4000 м	2000 – 3000 м	1000 – 2000 м	0 – 1000 м
Паркові зони	500 – 1000 м	1000 – 1200 м	1200 – 1500 м	0 – 500 м	1500 – 2000 м	більше 2000 м
Пляжні зони	1000 – 1500 м	800 – 1000 м	1500 – 2000 м	2000 – 2500 м	більше 2500 м	0 – 800 м
Транспортні зупинки	300 – 500 м	500 – 800 м	800 – 1000 м	0 – 300 м	1000 – 1200 м	більше 1200 м

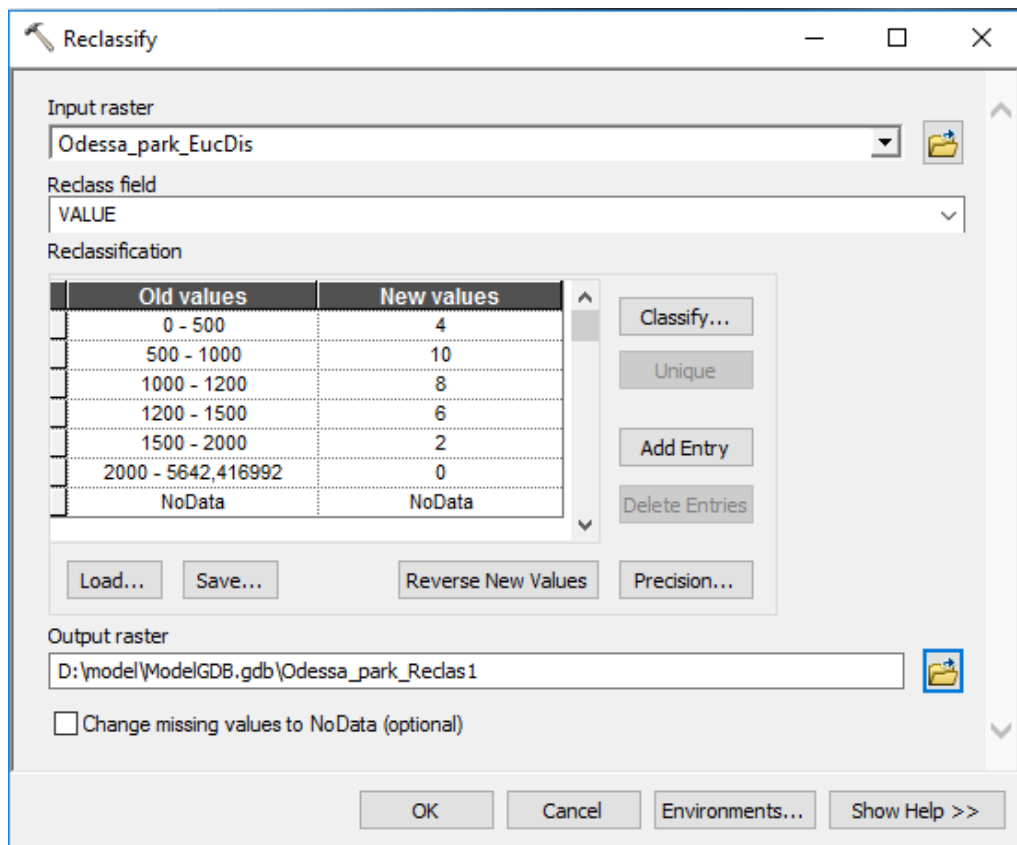


Рисунок 4.3 – Перекласифікація критерію «Паркові зони»

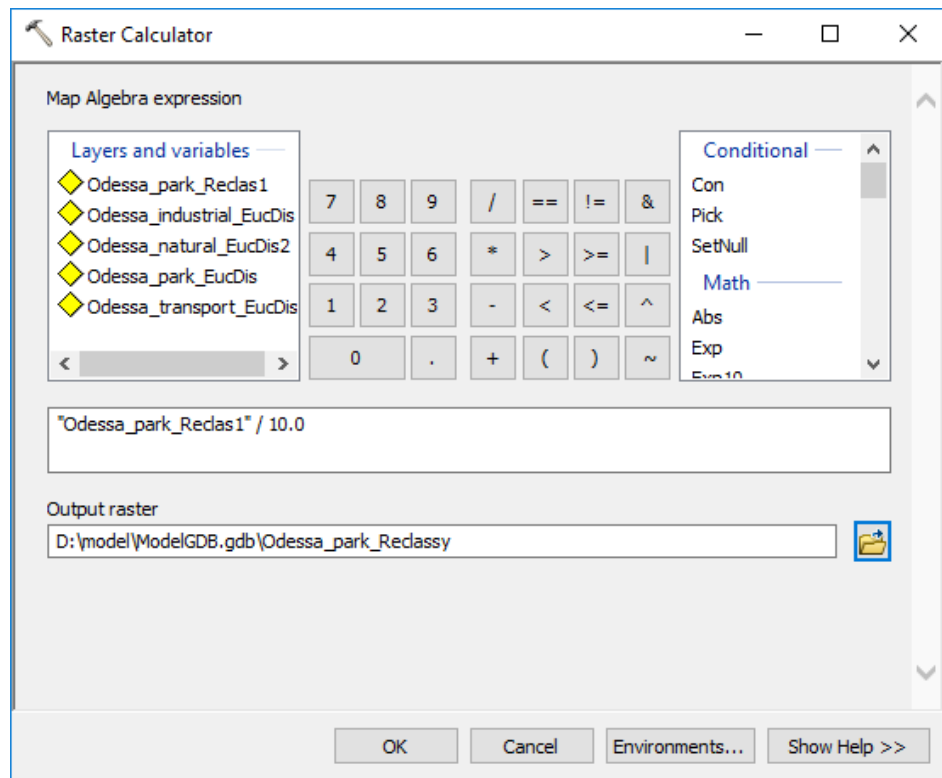


Рисунок 4.4 – Вікно калькулятора растрів

4.3 Розрахунок вагових коефіцієнтів критеріїв

Для розрахунку вагових коефіцієнтів побудуємо окремі скрипти, які надалі будемо запускати при виконанні процедури БКАР. Розрахунок вагових коефіцієнтів будемо виконувати за допомогою розглянутого у розділі 2 методу аналізу ієрархій. Програмний код скриптів наведений у додатку А.

Перший скрипт розроблений для створення порожньої матриці парних порівнянь, яку повинен заповнити користувач. За замовчуванням всі растрові шари критеріїв, які відкриті в поточній робочій області проекту, ідентифікуються інструментом як критерії. Вхідними параметрами скрипта є шлях до бази геоданих та ім'я таблиці (рис.4.5), в якій і буде створена матриця порівнянь. Приклад заповненої таблиці представлений на рис.4.6.

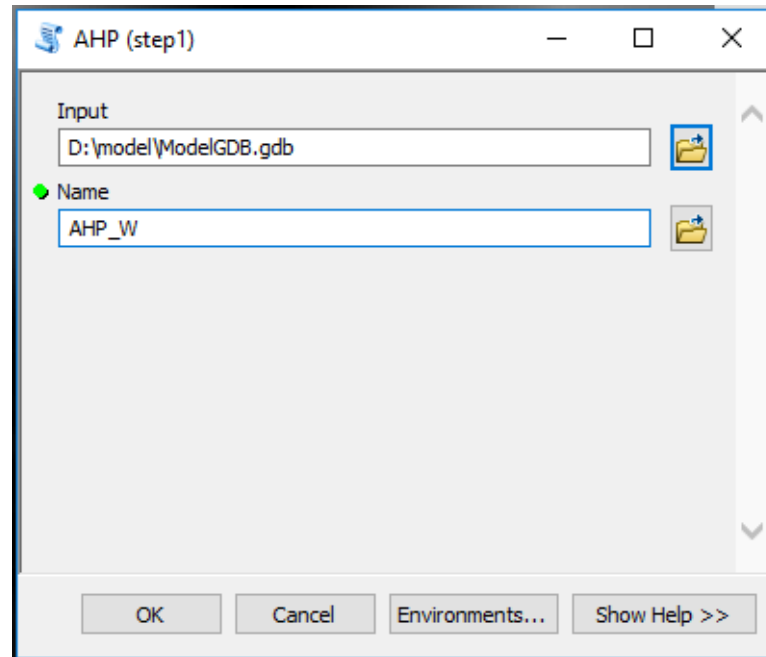


Рисунок 4.5 – Вхідні параметри скрипта створення таблиці парних порівнянь

Table						
AHP_W						
	OBJECTID *	layername	Industrial	Park	Natural	Transport
	1	Industrial	1	0,5	0,33333	0,2
	2	Park	2	1	0,5	0,25
	3	Natural	3	2	1	0,33333
	4	Transport	5	4	3	1
▶						

Рисунок 4.6 – Заповнена таблиця з матрицею парних порівнянь

Після заповнення і збереження у базі геоданих таблиці можна запустити другий скрипт, який розраховує ваги критеріїв та перевіряє індекс узгодженості. Вхідним параметром скрипта є ім'я створеної раніше таблиці, що містить оцінки порівнянь критеріїв. Таблиця з розрахованими вагами та індексом узгодженості для нашого проекту представлена на рис.4.7.

layername	Industrial	Park	Natural	Transport	weight	CI	RI	CR	Notes
Industrial	1	0,5	0,33333	0,2	0,08467	0,01707	0,8	0,01918	The matrix is considered to be consistent enough.
Park	2	1	0,5	0,25	0,13969	0,01707	0,8	0,01918	The matrix is considered to be consistent enough.
Natural	3	2	1	0,33333	0,23330	0,01707	0,8	0,01918	The matrix is considered to be consistent enough.
Transport	5	4	3	1	0,54232	0,01707	0,8	0,01918	The matrix is considered to be consistent enough.

Рисунок 4.7 – Розраховані ваги критеріїв

Після розрахунку вагових коефіцієнтів проводять згортку атрибутів альтернатив за різними критеріями за допомогою оператора агрегування зважена сума.

4.4 Агрегування критеріїв оператором зважена сума

Оператор зважена сума (Weighted Sum, WS) є одним з найбільш широко використовуваних правил прийняття рішень на основі ГІС. Цей метод часто застосовується при аналізі землекористування/придатності, вибору ділянки і проблеми оцінки ресурсів. Основною причиною його популярності є те, що цей метод легко реалізувати в середовищі ГІС з використанням операцій картографічної алгебри і картографічного моделювання. Цей метод також легко зрозумілий і інтуїтивно привабливий для осіб, які приймають рішення.

WS можна формалізувати наступним чином. Нехай набір альтернатив рішення буде представлений:

$$X = \{x_{i*} | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (4.1)$$

Альтернативи представлені набором комірок або пікселів в растровій базі даних ГІС. Таким чином, індекс i вказує місце розташування i -ої альтернативи. Для простоти будемо використовувати один індекс для вказівки місця розташування альтернативи (комірка, що позначена $i = 1$, знаходиться в верхньому лівому куті сітки карти, комірки пронумеровані зліва направо,

справа для кожного рядка, комірка m розташована в нижньому правому куті растрової карти). Кожна альтернатива описується за допомогою її локального атрибута (дані координат) і атрибута даних (значення атрибутів, пов'язані з місцем розташування). Оскільки атрибути служать змінними рішення, можемо призначити результат рішення (значення критерію) як x_{ij} , який представляє рівень j -го атрибута щодо альтернативи i . Отже, альтернативу i можна охарактеризувати вектором в рівнянні (4.2), а рівні атрибутів по альтернативі представлені вектором в рівнянні (4.3).

$$x_{i*} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

$$x_{*j} = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

Вхідні дані для рівнянь (4.2) і (4.3) можуть бути організовані у вигляді таблиць (оціночна матриця або географічна матриця). Відповідно, дані можуть зберігатися в ГІС як набір шарів карти. Дані складаються з набору n шарів даних, і кожна комірка сітки в шарі даних містить значення атрибута x_{ij} . У конкретній ситуації прийняття рішення набір альтернатив може бути обмежений шляхом накладення обмежень на значення атрибутів (непросторове обмеження) або на атрибути розташування (просторові обмеження).

З огляду на вхідні дані, проблема полягає в об'єднанні (агрегації) шарів карти відповідно до правила вирішення WS. Формально правило прийняття рішення оцінює кожну альтернативу, наступною функцією цінності:

$$V(\mathbf{x}_i) = \sum_j w_j v_j(\mathbf{x}_i) = \sum_j w_j r_{ij} \quad (4.4)$$

де w_j - нормалізована вага, така, що $\sum w_j = 1$;

$v_j(\mathbf{x}_i)$ є функцією цінності для j -го атрибута, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$;

r_{ij} – атрибут, перетворений до порівняного масштабу.

Ваги представляють відносну важливість атрибутів. Найбільш краща альтернатива вибирається шляхом визначення максимального значення $V(x_i)$ для $i = 1, 2, \dots, m$.

WS може бути введений в дію з використанням будь-якої системи ГІС, що має можливості накладення. Методи накладення дозволяють об'єднати шари карти атрибутів (вхідні карти), щоб визначити складений шар карти (вихідну карту).

Щоб вирішити, чи підходить певна територія для певного об'єкта чи діяльності, необхідно визначити критерії, які допоможуть особам, що приймають рішення. Ці критерії (атрибути), які представлені у вигляді тематичних шарів ГІС, повинні відповідати певним вимогам. Критерії повинні бути всебічними, вимірюваними, повними, не зайвими і мінімальними. Комплексний атрибут – це атрибут, який вказує на досягнення мети, пов'язаної з вирішенням проблеми. Вимірюваний атрибут – це атрибут, який можна оцінити, використовуючи значення, який вимірює переваги у вирішенні проблеми. Атрибути вважаються повними, якщо вони охоплюють всі аспекти проблеми. Не-надлишкові атрибути – це атрибути, незалежні один від одного таким чином, що кожен атрибут представляє один аспект проблеми. Вибір критеріїв базується на різних факторах, таких як ціль дослідження, експертний аналіз та наявність даних.

Для виконання агрегування критеріїв будемо використовувати інструмент *Weighted Sum*, вигляд якого наведений на рис. 4.8. Вхідними параметрами інструменту є растрові шари критеріїв, що були раніше перекласифіковані в діапазон значень атрибутів $[0,1]$ та розраховані методом аналізу ієрархій ваги критеріїв.

В наступному розділі розглянемо більш докладніше створений за допомогою виклику стандартних інструментів ArcGIS програмне забезпечення для проведення багатокритеріального аналізу.

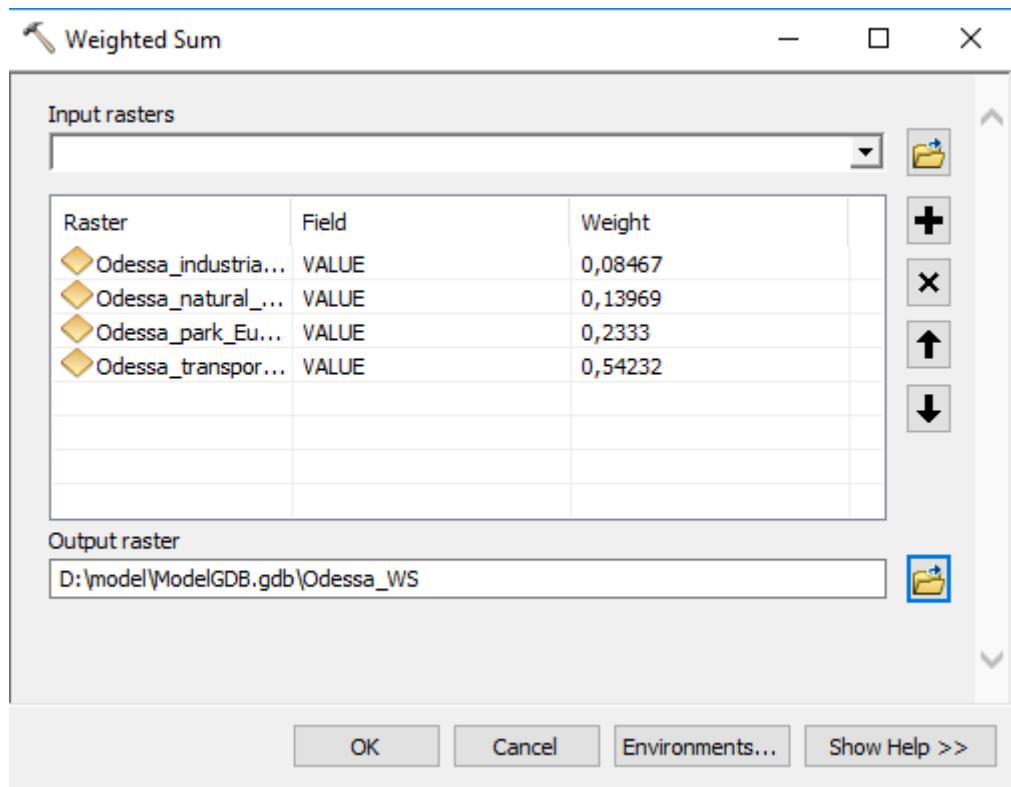


Рисунок 4.8 – Інтерфейс інструменту Weighted Sum

4.5 Побудова моделі геообробки

Для візуалізації побудованого інструменту геообробки був використаний пакет Model Builder. Елементами моделі можуть бути інструменти бібліотеки ArcToolbox, скрипт на мові Python, VBScript та ін.

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.

Вікно ModelBuilder складається з вікна відображення, в якому будується блок-схема моделі, а також головного меню і панелі інструментів, яку можна використовувати для роботи з елементами цієї блок-схеми. При запуску процесів з ModelBuilder їх виконання можна відстежувати в діалоговому вік-

ні ходу геообработки. При запуску моделі відбувається наступне: перевіряються всі змінні моделі і виконуються інструменти, які мають стан «Готовий до виконання» (Ready-to-run). Якщо будь-які вихідні змінні повинні бути додані до зображення, вихідні дані додаються в таблицю змісту ArcMap. Інструменти, які не мають стану «Готовий до виконання» (Ready-to-run) або залежать від інструменту, не готового до виконання, не виконуються. Інструменти моделі повністю інтегровані в середовище геообработки і працювати з ними можна так само, як з системними інструментами або інструментами скриптів. На рис. 4.9 представлено модель геообработки, що була створена для інструменту багатокритеріального аналізу. Реалізація моделі на кодї Python наведена у додатку А.

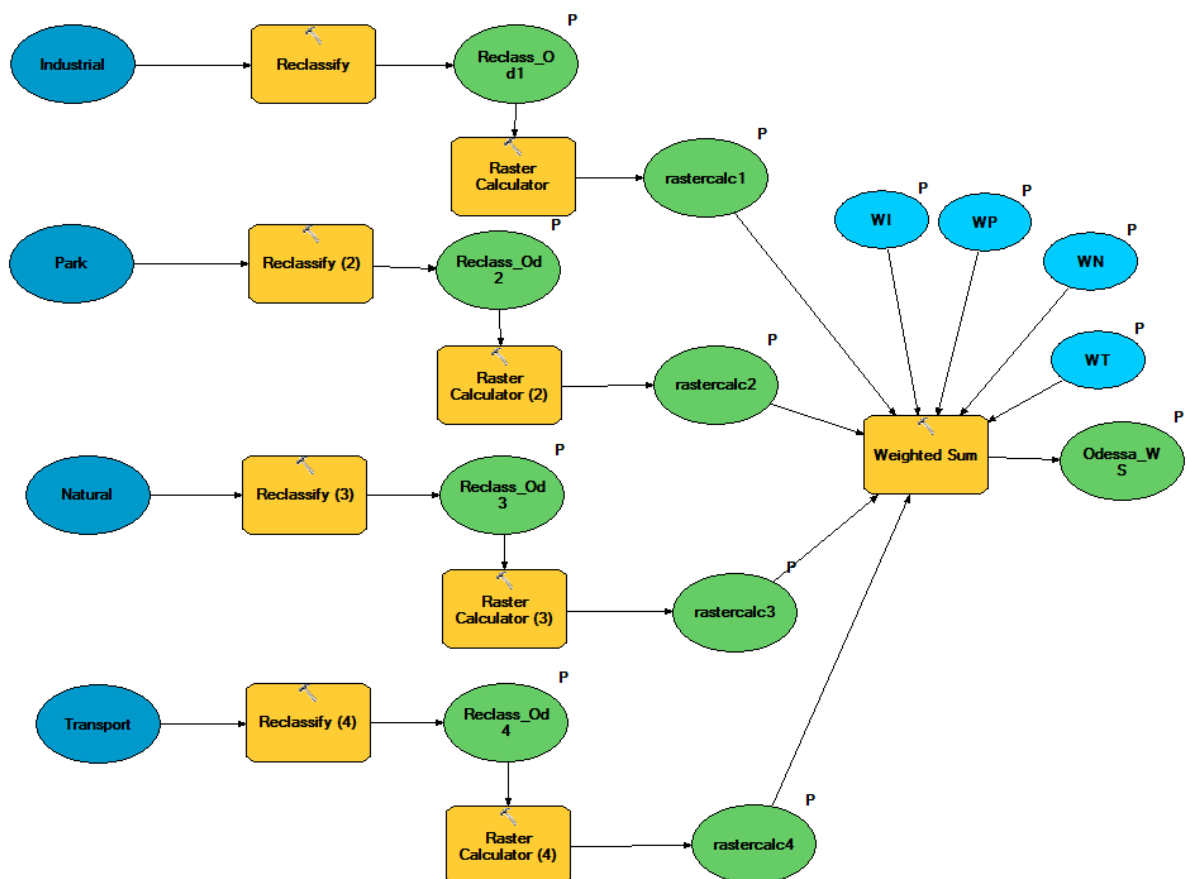


Рисунок 4.9 – Модель геообработки для багатокритеріального аналізу

4.6 Тестування програмного інструменту

В ході виконання магістерської роботи розроблений програмний засіб для проведення багатокритеріального аналізу рішень, який складається з інструменту геообробки та скриптів Python для розрахунку вагових коефіцієнтів важливості критеріїв.

Розглянемо більш докладніше процедуру БКАР із застосуванням програмного засобу в ГІС ESRI ArcGIS. З початку користувач на основі поставленої задачі формує ієрархію прийняття рішень (рис.4.1). Виконує декомпозицію об'єктів, що впливають на рішення, на окремі критерії, а також обирає територію дослідження, тим самим визначаючи альтернативи рішення. Критерії, як правило, представляються окремими векторними шарами. У випадку рішення нашої задачі це три полігональних векторних шари: індустріальні, паркові та пляжні зони міста, а також точковий шар з транспортними зупинками (рис.4.2).

Запропонована процедура БКАР призначена для робіт із растровою моделлю даних. Для врахування факторів близькості від зазначених раніше об'єктів треба виконати дискретизацію векторних шарів в растрові з визначенням евклідових метрик близькості за допомогою інструменту Euclidean Distance. Отримані растрові шари критеріїв, що наведені на рис.4.10. Вони надалі і використовуються як вхідні растри для інструменту геообробки.

Перед запуском інструменту користувач повинен розрахувати ваги критеріїв за допомогою створених в роботі скриптів. Алгоритм розрахунку наведений у п. 4.3. Коли значення ваг критеріїв будуть знайдені при умові прийняттого значення індексу узгодженості матриці парних порівнянь, можна запускати інструмент геообробки.

В ході його виконання будуть створені для кожного критерію перекласифіковані растри, відповідно до діапазонів наведений в табл. 4.1, а також комплексна карта придатності територій для проживання, яка буде згенерована в результаті виконання оператора накладання зважена сума.

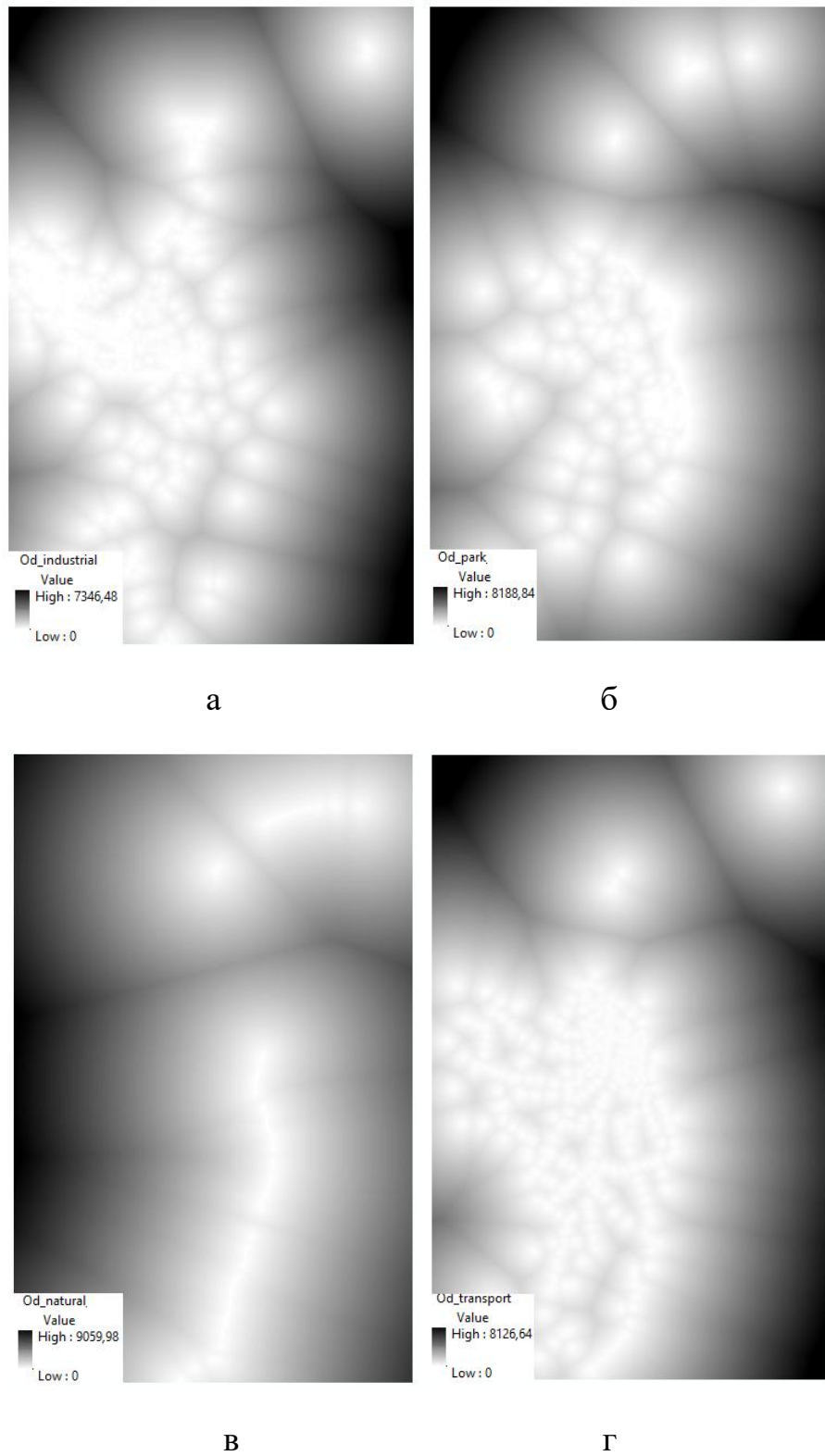


Рисунок 4.10 – Растрові шари евклідових відстаней від: а)індустріальних зон; б)паркових зон; в)пляжних зон; г)транспортних зупинок

Перекласифіковані растри критеріїв наведені на рис.4.11, комплексна карта придатності для проживання – на рис.4.12.

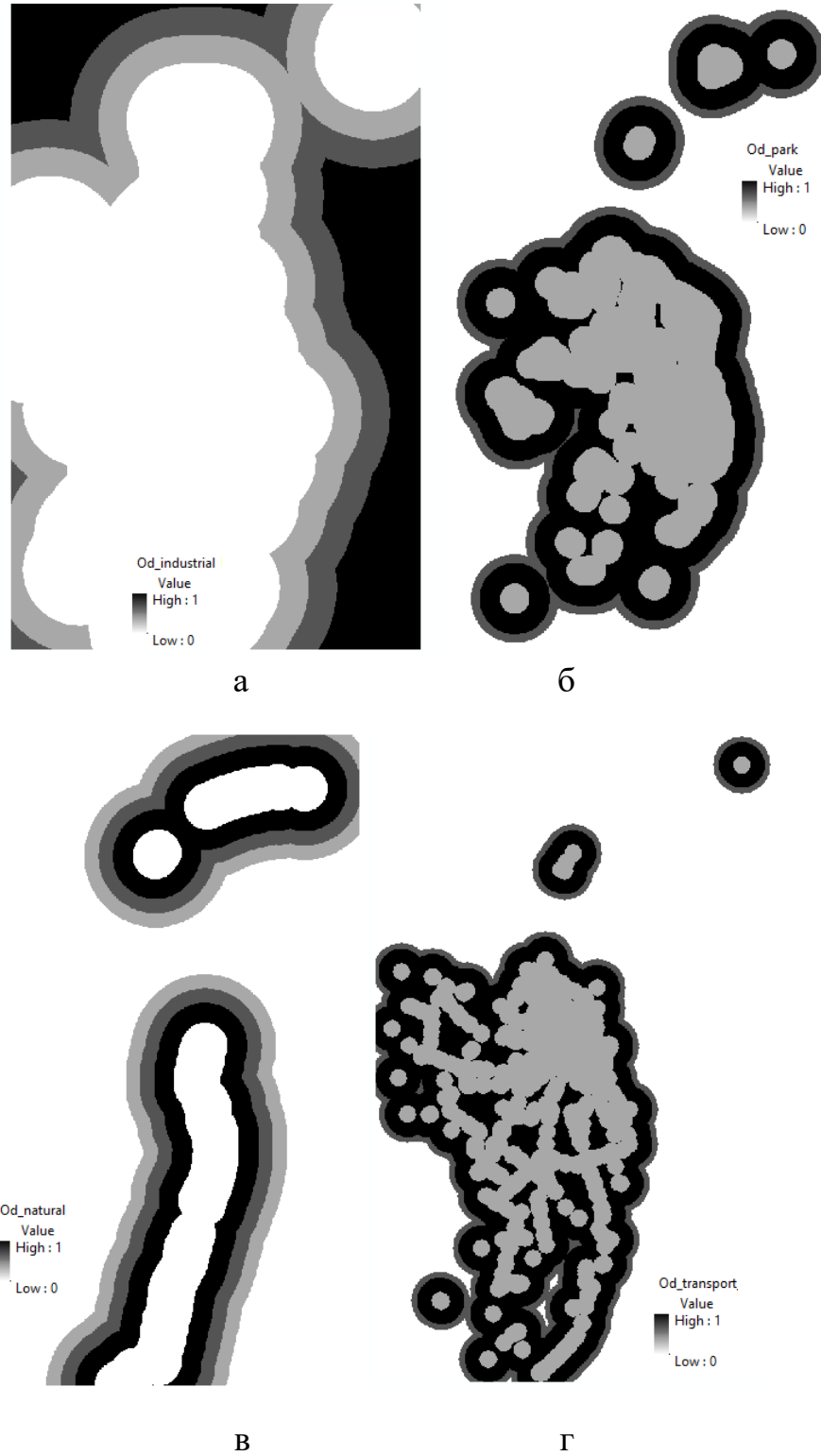


Рисунок 4.11 – Перекласифіковані растрові шари критеріїв: а)індустріальні зони; б)паркові зони; в)пляжні зони; г)транспортні зупинки

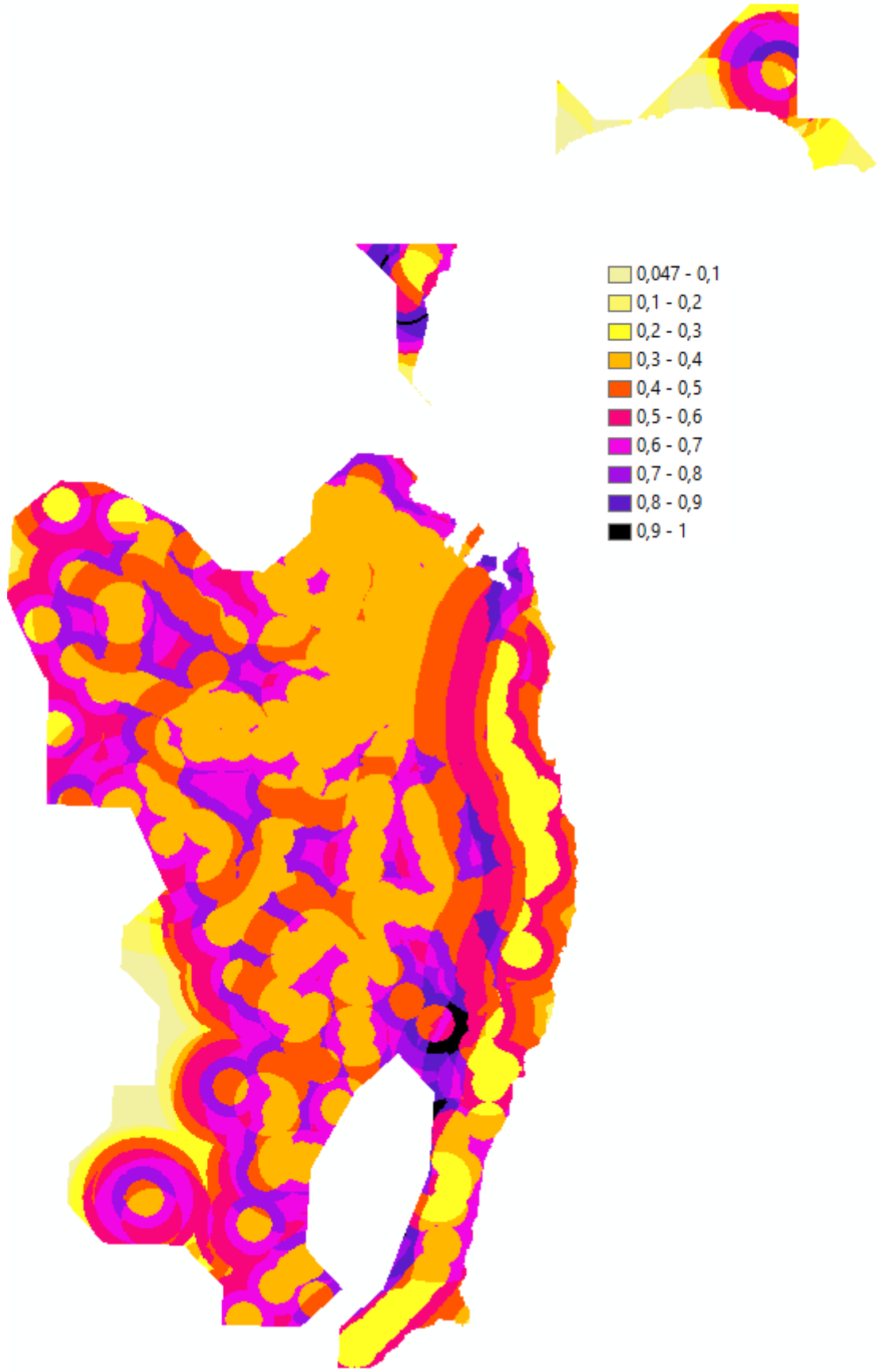


Рисунок 4.12 – Карта придатності

ВИСНОВКИ

В наш час ГІС, що швидко розвиваються, є ідеальною основою для розробки повнофункціональних систем підтримки просторових рішень. Це потужні системи управління, здатні збирати, аналізувати, моделювати та відображати просторові дані. Основним обмеженням цих систем є відсутність аналітичних можливостей для обробки кількох критеріїв прийняття рішень. З іншого боку, дисципліна теорія прийняття рішень активно розвивається і збагачується великою кількістю нових методів. Тому актуальним є поєднання інструментів ГІС та методів багатокритеріального прийняття рішень.

В магістерській роботі був створений програмний інструмент для виконання процедури багатокритеріального аналізу рішень по вибору придатних міських місць проживання в ГІС ESRI ArcGIS. Багатокритеріальний вибір здійснювався в м. Одеса за чотирма критеріями: віддаленість від промислових районів міста, близькість до паркових і пляжних зон, наявність транспорту та близькість транспортних зупинок. Програмний інструмент був виконаний у вигляді скрипту, написаного на мові програмування Python. Також представлена модель гообробки у візуальному середовищі ModelBuilder, яка враховує послідовність застосування всіх інструментів пакету від перекласифікації растрових шарів критеріїв та розрахунку їх ваг важливості до згортиатрибутів альтернатив за різними критеріями оператором накладання зважена сума.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1) Malczewski J. A GIS-based multi-criteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science* Vol. 20, No. 7, 2006, pp. 703–726
- 2) Malczewski J. Multiple Criteria Decision Analysis and Geographic Information Systems. *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis, International Series in Operations Research and Management Science*, 2010, VOL: 142, 2010, pp. 369-395
- 3) Belton V., Stewart T. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers. 2002, 372 p.
- 4) Kahraman C. (Ed). *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Theory and Applications with Recent Developments*. Series: Springer, Optimization and its Applications, 2008, vol. 16, 600 p.
- 5) Malczewski J. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1999. ISBN: 0-471-32944-4
- 6) Belton V. and Stewart T. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers.
- 7) Janssen, R. (2001). On the use of multi-criteria analysis in environmental impact assessment in the netherlands. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 10(2), pp.101–109.
- 8) Marler R. T. and Arora J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization*, 41(6), pp. 853–862
- 9) Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York
- 10) Saaty T. (2002). Decision making with the analytic hierarchy process. *Scientia Iranica*, 9(3), pp. 215–229
- 11) Saaty T. (2005). *The analytic hierarchy and analytic network processes*

for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In Figueira, F., Greco, S., and Ehrgott, M., editors, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp. 345–408. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London

12) H. Ahmadi, M. S. Rad, M. Nilashi, O. Ibrahim, A. Almaee. Ranking the micro level critical factors of electronic medical records adoption using TOPSIS method // *Health Informatics – An International Journal*. 2013. Vol. 2. №4, November. p. 19–32

13) Triantaphyllou E. and Sanchez A. (1997). A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods. *Decision Sciences*, 28(1), pp. 151–194

14) Система Expert Choice. URL: <http://expertchoice.com> (Дата звернення 10.11.2019)

15) Система DECERNS SDSS. URL: <http://www.decerns.com> (Дата звернення 10.11.2019)

16) Vincke P. (1992). *Multicriteria Decision-Aid*. John Willey & Sons.

17) 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

18) 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

19) Офіційний сайт Python URL: <http://www.python.org> (Дата звернення 10.11.2019)