

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Географічний факультет

О.Г. Міхно, І.М. Патракеєв

ПРИКЛАДНІ ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

*(ГІС в транспортно-логістичних системах та
плануванні і управлінні розвитком територій)*

Навчальний посібник

Київ – 2020

УДК 528.94:004.925.8 ББК 26.8я73

Рецензенти:

Л.М. Даценко, доктор географічних наук, професор кафедри геодезії та картографії Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

І.О. Підлісецька, кандидат географічних наук, доцент кафедри геодезії та картографії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

.

Затверджено Вченою радою географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол № 9 від 24 квітня 2020 року).

О.Г. Міхно, І.М. Патракеєв

Прикладні геоінформаційні системи: начальний посібник

К.2020, 98 с.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	3
ПЕРЕДМОВА.....	4
РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ	5
ПРАКТИЧНІ РОБОТИ	22
ПИТАННЯ ДО ЗАЛІКУ	27
ЗАВДАННЯ МОДУЛЬНИХ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ	29
МАТЕРІАЛИ ДО ЛЕКЦІЙ	30
РОЗДІЛ 1. ГЕОПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ.....	30
1.1. Основні напрями впровадження геоінформаційних систем в транспортну інфраструктуру.....	30
1.2. Основи теорії графів.....	36
1.2.1. Визначення графу.....	36
1.2.2. Матричне подання графів.....	37
1.2.3. Операції над графами.....	38
1.2.4. Обчислення транзитивних замикань у графі.....	40
1.2.5. Досяжність і контрдосяжність в графах.....	41
1.2.6. Знаходження множини вершин, що входять до шляху.....	43
1.2.7. Матричний метод знаходження шляхів у графах.....	44
1.2.8. Вага і довжина шляху.....	45
1.2.9. Алгоритм пошуку найкоротшого шляху.....	46
1.3. Реалізація транспортно-логістичних моделей в середовищі геоінформаційної системи.....	49
1.3.1. Терміни, що застосовуються при геоінформаційному моделюванні мереж.....	49
1.3.2. Порядок створення мережі.....	51
1.3.3. Атрибути мережі.....	56
1.3.4. Повороти.....	59
1.3.5. Мультимодальні мережі.....	60
1.3.6. Типові мережеві задачі.....	61
РОЗДІЛ 2. ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЇ.....	69
2.1. Аналіз придатності території – основа планування і управління її розвитком.....	69
2.2. Основи теорії нечітких множин.....	70
2.3. Геоінформаційне моделювання придатності.....	75
2.3.1. Булеве моделювання придатності.....	75
2.3.2. Переваги та недоліки булевої придатності.....	82
2.3.3. Моделювання придатності з використанням балів або рейтингів.....	84
2.3.4. Зважені фактори.....	85
2.3.5. Приклад моделювання придатності з використанням балів.....	87
2.3.6. Переваги та недоліки моделювання придатності з використанням балів.....	95
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	97

Передмова

Навчальний посібник передбачає розгляд теоретичного обґрунтування і практичної реалізації застосування інструментарію геоінформаційної системи (ГІС) для обробки векторного подання географічної інформації на прикладі моделювання дорожньої мережі та растрового її подання на прикладі пошуку придатної території за визначеними критеріями. Теоретичною основою геопросторового моделювання дорожньої мережі є математична теорія графів. В першій частині навчального посібника наводяться основи теорії графів, на яких ґрунтується подальша реалізація транспортно-логістичних моделей в середовищі геоінформаційної системи. В другій частині посібника, де розглядається геоінформаційний аналіз придатності території, теоретичною основою формування критеріїв вибору є математична теорія нечітких множин. Наводяться базові основи теорії нечітких множин і властивості функцій належності. На думку авторів, поєднання теоретичного обґрунтування з описом прийомів практичного моделювання в середовищі геоінформаційної системи дозволить більш глибоко сприйняти закономірності процесу геопросторового моделювання навколишнього середовища під час їх комп'ютерної реалізації.

Під час написання навчального посібника були використані деякі матеріали п'ятої частини "UKR-05: Просторове моделювання та додатки для інфраструктури просторових даних" проведеного на базі географічного факультету українсько-канадського проекту "Закладення основ інфраструктури просторових даних: забезпечення бази в українському уряді для підтримки стабільного економічного зростання".

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Географічний факультет

Кафедра геодезії та картографії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник декана/директора інституту
з навчальної роботи

«___» _____ 20__ року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Прикладні геоінформаційні системи
(ГІС в транспортно-логістичних системах та
плануванні і управлінні розвитком території)

для студентів

галузей знань	19 Архітектура та будівництво
	10 Природничі науки
спеціальностей	193 Геодезія та землеустрій
	103 Науки про Землю
освітніх програм	Геодезія та землеустрій
	Картографія
освітнього рівня	бакалавр
вид дисципліни	<u>вибіркова</u>

Форма навчання	денна
Навчальний рік	<u>2019/2020</u>
Семестр	7
Кількість кредитів ECTS	3
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Форма заключного контролю	залік

Викладачі: **Міхно Олексій Григорович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри
геодезії та картографії, доцент;

Яценко Ольга Юріївна, асистент кафедри геодезії та картографії

Пролонговано: на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» ____ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» ____ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2019

Розробник: Міхно Олексій Григорович, *кандидат технічних наук, доцент кафедри
геодезії та картографії, доцент*

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри

(підпис) (Даценко Л.М.)
(прізвище та ініціали)

Протокол № ____ від « ____ » _____ 20__ р.

Схвалено науково - методичною комісією географічного факультету

Протокол від « ____ » _____ 20__ року № ____

Голова науково-методичної комісії _____ (Запотоцький С.П.)
(підпис) (прізвище та ініціали)

ВСТУП

1. Мета дисципліни – дати знання з теорії та практичного застосування процедур обробки геопросторових даних для вирішення задач навігації транспортних засобів по шляхах та вибору оптимальної ділянки території за визначеними критеріями в програмному середовищі геоінформаційної системи.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Успішне опанування курсів: «*Основи геоінформаційних систем та технологій*», «*Прикладні геоінформаційні системи (ГІС в моніторингових системах)*».
2. Володіння навичками роботи в програмному середовищі ArcGIS.

3. Анотація навчальної дисципліни:

Дисципліна складається з двох частин. Перша частина присвячена моделюванню дорожньої мережі в середовищі геоінформаційної системи на основі векторного полілінійного шару доріг. Друга частина розглядає порядок створення растрової моделі території, де значення кожного елементу растра є результатом впливу різних критеріїв, які висуваються користувачем до відповідного просторового розміщення. Теоретичною базою першої частини навчальної дисципліни є математична теорія графів, а другої – теорія нечітких множин.

3. Завдання (навчальні цілі):

- вивчення теоретичних засад і порядку створення векторної моделі дорожньої мережі за допомогою інструментарію геоінформаційної системи;
- вивчення теоретичних засад і порядку створення растрової моделі придатності території за допомогою інструментарію геоінформаційної системи.

Виконання поставлених завдань дозволять випускнику досягти наступних компетенцій:

- здатність використання інформаційних технологій (ЗК-5);
- здатність вміти використовувати сучасне геодезичне, навігаційне, геоінформаційне та фотограмметричне програмне забезпечення та обладнання (ФК-7).

4. Результати навчання (РН) за дисципліною:

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність)		Форми (та/або методи і технології) викладання і навчання	Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	основи математичної теорії графів	лекція, практична робота,	Контрольні	10%

1.2	порядок геопросторового моделювання транспортно-логістичних систем	самостійна робота	роботи	10%
1.3	основи теорії нечітких множин як інструмент впливу об'єктів на навколишнє середовище			10%
1.4	порядок геопросторового моделювання придатності території			10%
2.1	використовувати векторні просторові дані для створення моделі дорожньої мережі	лекція, практична робота, самостійна робота	звіти за результатами практичної роботи	10%
2.2	застосовувати алгебру растрів в середовищі геоінформаційної системи для моделювання придатності території			10%
3.1	демонструвати навички ефективної міжособистісної взаємодії та командної роботи.	практична робота	звіти за результатами практичної роботи	10%
3.2	демонструвати вміння використовувати інформаційні і комунікаційні технології			10%
4.1	демонструвати здатність вчитися і бути сучасно навченим	самостійна робота	звіти за результатами самостійної роботи	10%
4.2	виконувати пошук та опрацювання різних джерел географічної інформації	самостійна робота		10%

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін, які не входять до блоків спеціалізації)

Результати навчання дисципліни (код) Програмні результати навчання (назва)	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2
знати теоретичні основи геодезії, вищої та інженерної геодезії, топографічного і тематичного картографування, складання та оновлення карт, дистанційного зондування Землі та фотограмметрії, землеустрою, оцінювання нерухомості і земельного кадастру	+	+	+	+						
обробляти результати геодезичних вимірювань, топографічних і кадастрових знімань, з використанням геоінформаційних технологій та комп'ютерних програмних засобів і системи керування базами даних					+	+				
володіти технологіями і методиками планування і виконання геодезичних, топографічних і кадастрових знімань та комп'ютерного оброблення результатів знімань в геоінформаційних системах					+	+				
демонструвати навички ефективної міжособистісної взаємодії та командної роботи.							+	+		
демонструвати вміння використовувати інформаційні і комунікаційні технології							+	+		

демонструвати здатність вчитися і бути сучасно навченим									+	+
виконувати пошук та опрацювання різних джерел географічної інформації									+	+

7. Схеми формування оцінки:

Форми оцінювання: рівень досягнення всіх запланованих результатів навчання визначається за результатами написання тестових контрольних робіт, оцінкою на практичних заняттях та виконання завдань самостійної роботи.

Питома вага результатів навчання у підсумковій оцінці за умови її опанування на належному рівні така:

- ✓ результати навчання – 1.1 – 1.4 (знання) – 40%;
- ✓ результати навчання – 2.1 – 2.4 (вміння) – 20%;
- ✓ результати навчання – 1.1 – 1.4 (комунікація) – 20%;
- ✓ результати навчання – 2.1 – 2.4 (автономність) – 20%;

7.1. Форми оцінювання студентів:

У курсі передбачено один змістовий навчальний модуль. Заняття проводяться у вигляді лекцій, практичних робіт та самостійної домашньої роботи. Завершується дисципліна – **заліком** (у 7-му семестрі).

Упродовж семестру, після завершення відповідних тем, проводяться тематичні письмові тестові роботи. Для визначення рівня досягнення результатів навчання, передбачених пунктами 2.1 – 2.2, студенти під час практичних занять демонструють результати своєї самостійної роботи та набуті навички.

Для студентів, які упродовж семестру не досягли мінімального рубіжного рівня оцінки (60% від максимально можливої кількості балів) проводиться заключна контрольна робота, максимальна оцінка за яку не може перевищувати 40% підсумкової оцінки (до 40 балів за 100 – бальною шкалою).

Умовою отримання позитивної результуючої оцінки з дисципліни є досягнення не менш як 60% від максимально можливої кількості балів.

Підсумкове оцінювання у формі заліку (усно/письмова форма): максимальна кількість балів на заліку - 40 балів, мінімальна кількість балів, які додаються до семестрових – 24 бали (60% максимальної кількості балів, відведених на залік).

Студенти, які набрали сумарно меншу кількість балів ніж критично-розрахунковий мінімум – 20 балів до складання заліку не допускаються. Рекомендований мінімум для допуску до заліку – 36 балів.

Студент допускається до заліку за умови подання всіх передбачених планом звітів за практичну роботу.

За роботи, подані не в зазначений термін, віднімається по 2 бали за кожен день затримки.

	КР1	КР2	ПР 1	ПР 2	залік	Підсумкова оцінка
<i>Мінімум</i>	4	4	15	15	22	60
Максимум	10	10	20	20	40	100

7.2. Організація оцінювання: *(обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою програмою навчальної дисципліни форм оцінювання із зазначенням орієнтовного графіку оцінювання).* Оцінювання проводиться шляхом накопичення балів за всі елементи контролю з дисципліни (контрольні роботи, практичні заняття та модульні контрольні роботи з усною інтерпретацією викладених в них тверджень).

При цьому, кількість балів:

- **1-34** відповідає оцінці «незадовільно» з обов'язковим повторним вивченням дисципліни;
- **35-59** відповідає оцінці «незадовільно» з можливістю повторного складання;
- **60-64** відповідає оцінці «задовільно» («достатньо»);
- **65-74** відповідає оцінці «задовільно»;
- **75 - 84** відповідає оцінці «добре»;
- **85 - 89** відповідає оцінці «добре» («дуже добре»);
- **90 - 100** відповідає оцінці «відмінно».

Шкала відповідності *(за умови заліку)*

За 100 – бальною шкалою	За національною шкалою
90 – 100	Зараховано
85 – 89	
75 – 84	
65 – 74	
60 – 64	
1 – 59	не зараховано

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЗАНЯТЬ

№ п/п	Назва лекції	Кількість годин		
		лекції	практ.	С/Р
4 курс 7 семестр				
Змістовий модуль 1. ГІС в транспортно-логістичних системах та плануванні і управлінні розвитком територій				
1	Тема 1. Основні напрями впровадження геоінформаційних систем в транспортну інфраструктуру	2		4
2	Тема 2. Основи теорії графів	4	4	10
3	Тема 3. Реалізація транспортно-логістичних моделей в середовищі геоінформаційної системи	2	4	10
	Контрольна робота	2		
4	Тема 4. Основи теорії нечітких множин	2	4	10
5	Тема 5. Булевий метод визначення придатності території	2		10
6	Тема 6. Моделювання придатності території з використанням балів або рейтингів	2	4	10
	Підсумкова контрольна робота	2		
	ВСЬОГО	18	16	54

Загальний обсяг **90 год.**, в тому числі:

Лекції – **18 год.**

Практичні роботи – **16 год.**

Консультації - **2 год.**

Самостійна робота - **54 год.**

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна:

1. Інвестиційні інструменти проектного менеджменту / Бушуєв С.Д., Гурін Е.А. – К.: Укрінтеї, 1998. – 184 с.
2. Энди Митчел. Руководство по ГИС-анализу. Ч.1. Модели пространственного распределения и взаимосвязи. - Киев: ЭКОММ, 2000. – 179 с.
3. ДеМерс М. Н. Географические информационные системы, основы.: Пер.с англ. - М.:Изд. Дата+, 1999. - 491 с.
4. ArcGIS. Spatial Analyst. Руководство пользователя. ESRI, 2001, Пер. с англ. DATA+ Ltd. – 216 с.
5. ArcGIS. Network Analyst. Руководство пользователя. ESRI, 2001, Пер. с англ. DATA+, Ltd. – 36 с.
6. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов. М.: Наука, 1990. – 384 с.
7. Wolfgang Kainz. Fuzzy Logic and GIS. Department of Geography and Regional Research University of Vienna, Austria. 2008. – 21 p.

Додаткова:

8. Берж К. Теория графов и ее применения. М.:Иностранная литература, 1962. – 319 с.
9. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. Тбилиси: Мецниереба, 1974. – 234 с.
10. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2001. – 124 с.
11. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. 7-е изд. – К.: 2001.
12. Хаксхолд В.Е. Введение в городские географические информационные системы. – М.: Дата+, 1999. - 320 с.
13. Цветков В.Я. Географические информационные системы и технологии.- М.: Финансы и статистика, 1998. – 288 с.
14. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1968. – 352 с.
15. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Новиков Д.А., Шульженко Н.А. Модели и механизмы в управлении организационными системами. М.: Издательство «Тульский полиграфист», 2003. Том 1. – 560 с., Том 2 – 380 с., Том 3 – 205 с.
16. Использование Microsoft Project 2002. Специальное издание.: Пер. с англ. –М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1184с.: ил.
17. The Standard for Program Management.- PMI, 2006. – 109 p.
18. Zadeh L.A., Fuzzy Sets. Information and Control, Vol. 8, 1965, pp. 338 – 353.

Додаткові ресурси:

Тема 1. Основні напрями впровадження ГІС в транспортну інфраструктуру.

Лекція 1. Основні напрями впровадження ГІС в транспортну інфраструктуру. (2 год.)

Управління майном термінальних комплексів. Управління територіями під об'єктами транспортних систем. Управління парком транспортних засобів. Побудова і оптимізація маршрутів на існуючій дорожній мережі. Моніторинг стану дорожнього полотна. Навігація. Інформаційні послуги населенню.

Завдання для самостійної роботи (4 год.)

1. Створити простий мережевий набір класів просторових об'єктів на основі бази геоданих з єдиного лінійного класу просторових об'єктів і класу просторових об'єктів поворотів. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/00470000005t000000/>

Для виконання завдань треба використовувати набір даних Network Analyst Tutorial за посиланням

<http://www.arcgis.com/home/item.html?id=d6bd91b2fddc483b8ccbc66942db84cb>

2. Створити мультимодальний набір мережевих даних з кількох класів просторових об'єктів разом з набором класів об'єктів. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/00470000005v000000/>

Контрольні запитання та завдання

1. Наведіть основні напрями впровадження геоінформаційних систем в транспортну інфраструктуру.
2. Яким чином геоінформаційні технології можуть використовуватись для управління майном термінальних комплексів?
3. Які системи управління парком транспортних засобів можуть бути реалізовані за допомогою геоінформаційних систем?

4. Що розуміють під оптимізацією маршрутів на існуючій дорожній мережі?

ТЕМА 2. Основи теорії графів.

Лекція 2. Графи і способи їх подання. (2 год.)

Визначення графу. Орієнтовані, неорієнтовані і змішані графи. Петля. Матричне подання графів. Матриця суміжності. Операції над графами: об'єднання, перетин, кільцева сума.

Лекція 3. Досяжність в графі. (2 год.)

Обчислення транзитивних замикань за допомогою матриці суміжності. Досяжність і контрдосяжність в графах. Матриці досяжності і контрдосяжності. Знаходження множини вершин, що входять до шляху. Матричний метод знаходження шляхів у графах. Вага і довжина шляху. Граф зі зваженими дугами. Потужність шляху. Граф зі зваженими вершинами. Зважений граф. Алгоритм пошуку найкоротшого шляху (Алгоритм Дейкстри).

Завдання для самостійної роботи

(10 год.)

1. Знайти найшвидший маршрут для відвідування ряду зупинок в зумовленому порядку. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/00470000005w000000/>

2. Знайти чотири пожежних частини, які можуть швидше за все надати допомогу за вказаною адресою в разі виникнення пожежі. Необхідно також створити маршрути і напрямки руху, за якими повинні пересуватися пожежні команди. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/00470000005z000000/>

3. Створити серію полігонів, що представляють відстань, яка може бути досягнута з пункту обслуговування протягом певного часу. Необхідно обчислити трьох-, п'яти- і десятихвилинні зони обслуговування для шести товарних складів в Парижі. Також потрібно визначити, скільки є магазинів

в кожній з цих областей обслуговування. Визначте склад, розташування якого має бути змінено для кращого обслуговування магазину. Додатково створіть матрицю Джерело-Призначення для доставки товарів зі складу в усі магазини в межах 10 хвилин. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/004700000060000000/>

4. Створити модель для знаходження найкоротшого маршруту, що з'єднає 21 магазин в Парижі. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/004700000061000000/>

Контрольні запитання та завдання

1. Дати визначення графу.
2. Які характеристики графу визначає матриця суміжності?
3. В чому різниця між орієнтованими і неорієнтованими графами?
4. Яким чином реалізується операція перетину двох графів?
5. Яку загальну властивість мають операції об'єднання, перетину і кільцевої суми графів?
6. Дати визначення транзитивного замикання в графі.
7. Які визначите пряме і зворотне транзитивне замикання через матрицю суміжності?
8. Сформулюйте порядок побудови матриці досяжності і контрдосяжності в графі.
9. Назвіть порядок визначення шляху в графі?
10. Визначити графи із зваженими дугами і вершинами.
11. Сформулюйте порядок побудови матриці досяжності і контрдосяжності в графі.
12. Навести алгоритм Дейкстри для обчислення найкоротшої відстані між двома вершинами в графі.

Тема 3. Реалізація транспортно-логістичних моделей в середовищі геоінформаційної системи.

Лекція 4. Реалізація транспортно-логістичних моделей в середовищі геоінформаційної системи. (2 год.)

Терміни, що застосовуються при геоінформаційному моделюванні мереж. Інженерні і транспортні мережі. Геометрична і логічна мережа. Мережевий аналіз. Порядок створення мережі. Елементи мережі: ребра, з'єднання, повороти. Атрибути мережі: витрати, ознаки, обмеження, ієрархія. Повороти. Мультимодальні мережі. Типові мережеві задачі: визначення оптимального шляху; найближчий пункт обслуговування; зони обслуговування; матриця витрат Джерело-Призначення; задача вибору маршруту транспортного засобу; розміщення-розподілення; аналіз, залежний від часу.

Завдання для самостійної роботи

(10 год.)

1. *Знайти найбільш оптимальні маршрути для автопарку дистриб'юторської компанії для доставки товарів з центру розподілу в 25 роздрібних магазинів. У кожного магазину є певні потреби в товарі, і у кожної вантажівки є обмежена місткість товару. Основна мета - підібрати вантажівки з автопарку під певний набір магазинів і розподілити доставки таким чином, щоб знизити загальні транспортні витрати. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням*

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/004700000062000000/>

2. *Знайти найбільш оптимальні маршрути для автопарку, щоб перевозити людей, у яких немає іншого доступу до транспорту, з дому до лікарні для проходження лікування з дотриманням додаткових вимог з допомогою інших характеристик шару аналізу завдання VRP. Наприклад, буде введено максимальний час у дорозі для парних замовлень так, щоб люди не проводили занадто багато часу в дорозі. Будуть використані тимчасові обмеження, оскільки люди не повинні спізнюватись в лікарню. Деяким людям*

потрібні крісла-коляски, тому для них потрібно буде відправити транспорт зі спеціальними підйомниками для крісел-колясок. Після визначення маршрутів будуть створені покрокові вказівки результуючих маршрутів, які можна відправити електронним способом або роздрукувати і передати водіям. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/004700000063000000/>

3. Знайти таке розташування роздрібних магазинів, яке забезпечить максимальну прибутковість торгової мережі. Основною метою є розташувати магазин поблизу центрів розміщення населення і тим самим забезпечити попит на товар. В основі такого підходу лежить припущення, що люди роблять покупки в найближчих магазинах охочіше, ніж в далеких. Пропонується виконати аналіз місця розташування-розподілу, використовуючи три різних типи завдання: максимізація відвідуваності, збільшення частки ринку і збільшення цільового ринку. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/004700000067000000/>

Контрольні запитання та завдання

1. В чому головна відмінність між інженерними і транспортними мережами?
2. Що визначає логічна мережа?
3. Як такий атрибут як ієрархія дозволяє оптимізувати пошук шляху?
4. Що дозволяє визначити матриця Джерело-Призначення?
5. Чим визначається залежність мережевого аналізу від трафіку?
6. В якому вигляді подається мережевий набір класів об'єктів в програмі Network Analyst?
7. Навести порядок створення моделі для виявлення найшвидшого маршруту, що сполучає декілька пунктів в програмі Network Analyst.

8. Чим мультимодальний мережевий набір відрізняється від простого мережевого набору класів об'єктів?
9. Сформулюйте порядок визначення пунктів, що знаходяться в межах досяжності від визначеної точки на місцевості в програмі Network Analyst.
10. Сформулюйте порядок визначення оптимального забезпечення пунктів дорожньої мережі вантажем в залежності від технічних характеристик транспортного засобу в програмі Network Analyst.

Тема 4. Основи теорії нечітких множин.

Лекція 5. Нечітка логіка як математична основа управління територіями.

(2 год.)

Загальні відомості про нечітку логіку. Поняття і функція належності. Види області значень функції належності. Лінгвістична змінна. Властивості нечітких множин: перетин, об'єднання, доповнення.

Завдання для самостійної роботи

(10 год.)

1. *Створити набір мережевих даних з використанням об'єктів поворотів, вулиць і дорожніх показників міста Сан-Дієго. Цей набір також буде включати дані історії трафіку і, додатково, поточного трафіку, що дозволить переглядати швидкості руху в різний час дня і вирішувати мережеві завдання, які мають тимчасову залежність. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням*

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/0047000001s4000000/>

2. *Виконати аналіз області обслуговування для різного часу доби, використовуючи збережені в історії дані про рух і, додатково, дані про поточний рух. Полігони області обслуговування змінюються в залежності від інтенсивності вуличного руху. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням*

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/0047000001s6000000/>

3. Зробити розрахунок простого маршруту за допомогою атрибутів обмеження з різними значеннями параметра Використання обмежень (*Restriction Usage*), при цьому маршрут, по можливості, пролягатиме по дорогах, виділених для руху вантажівок, і обходити (уникати) платні дороги. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/0047000001s5000000/>

Контрольні запитання та завдання

1. Які задачі сформували підґрунтя для появи теорії нечітких множин?
2. В чому відмінність нечіткої множини від стандартного математичного визначення множини?
3. Що визначає лінгвістична змінна в теорії нечіткої логіки?
4. Які бінарні операції можна провести над нечіткою множиною?
5. Які варіанти об'єднання функцій належності можливі для нечітких множин?

Тема 5. Булевий метод визначення придатності території.

Лекція 6. Булеве моделювання придатності. (2 год.)

Аналіз придатності території – основа планування і управління її розвитком. Порядок формування критеріїв придатності. Переваги та недоліки булевої придатності.

Завдання для самостійної роботи

(10 год.)

1. Установити додатковий модуль геоінформаційної системи ArcGIS – *Spatial Analyst*. Додати і відобразити на карті набори даних, виділити їх значення на карті, впізнати значення у вказаних точках, вивчити діаграму і створити відмивання рельєфу ділянки, що аналізується. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/index.html#/na/00nt00000007000000/>

Необхідні дані для виконання вправи знаходяться на DVD-диску ArcGIS for Desktop або їх можна отримати у викладача.

2. Побудувати модель придатності, яка буде використана для пошуку підходящих місць для будівництва нової школи. Обчислити ухил, відстань до зон відпочинку і до наявних шкіл, потім перекласифікувати отримані набори даних за єдиною 10-бальною шкалою. Зважити їх і набір даних землекористування відповідно до процентною часткою їх впливу, і скомбінувати їх для отримання карти, яка б показала відповідні майданчики для будівництва нової школи. Потім вибрати оптимальне місце розташування для нової школи з декількох варіантів. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/00nt00000008000000/>

Контрольні запитання та завдання

1. Чим карта щільності висот відрізняється від відмивки рельєфу?
2. У чому сутність булевого визначення придатності території?
3. Наведіть приклади критеріїв придатності при булевому моделюванні.
4. Які недоліки існують при булевому моделюванні придатності території?
5. Які переваги булевого моделювання придатності території?

Тема 6. Моделювання придатності території з використанням балів або рейтингів.

Лекція 7. Моделювання придатності території використанням балів або рейтингів. (2 год.)

Порядок формування критеріїв придатності. Перекласифікація. Зважені фактори. Інструмент зваженого накладання. Приклад моделювання придатності з використанням балів. Переваги та недоліки моделювання придатності з використанням балів.

Завдання для самостійної роботи

(10 год.)

1. Знайти найкращий шлях для нової дороги від оптимального місця розташування шкільної ділянки до найближчого перехрестя з існуючої магістраллю. Створити нову модель під назвою "Пошук Найкращого Маршруту" (Find Best Route) в наборі інструментів Site Analysis, яка буде

обчислювати найкращий маршрут з урахуванням рельєфу від джерела (ділянки школи) до точки призначення, беручи до уваги ухил поверхні і тип землекористування ділянок, через які буде проходити маршрут. Інструкція щодо виконання цього завдання знаходиться на сайті геоінформаційної системи ArcGIS за посиланням

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.2/#/na/00nt00000005000000/>

2. Провести просторовий аналіз моделі місцевості для визначення зон невидимості. Нанести пануючі точки місцевості за відміркою рельєфу тестової ділянки. Створити окремі шейп-файли для кожної з визначених точок. Визначити зони видимості з усіх пануючих точок визначеної ділянки місцевості за допомогою оператора Visibility. За допомогою алгебри растрів накласти результати обчислень на попередньому етапі. Обчислити зони видимості одночасно для всіх пануючих висот..

Контрольні запитання та завдання

1. Навіщо потрібна процедура перекласифікації при визначенні найбільш придатної території?
2. В чому відмінність моделювання придатності території за допомогою балів або рейтингів від булевого моделювання придатності?
3. Які недоліки існують при моделюванні придатності території за допомогою балів або рейтингів?
4. Які переваги моделювання придатності території за допомогою балів або рейтингів?
5. Яким чином проводиться додавання растрів з різними розмірами комірок?
6. Яким буде результат додавання растрів, коли один з них має значення No Data?
7. Які додаткові растри необхідно побудувати при визначенні найкоротшого шляху?

Завдання для практичної роботи №1

«Визначення оптимального шляху пересування»

Розпорядження №1/2020

Отриманий наказ Командувача армією щодо підсилення військового контингенту в населеному пункті Великий Бичків. Підсилення забезпечити силами швидкого реагування за місцями дислокації: селище сільського типу Голошина, що має сільську раду; селище сільського типу Гура-Лалей; селище сільського типу Сучу-Де-Сус.

Надати карту маршрутів пересування автомобільним і залізничним транспортом. Визначити мінімальний час прибуття військового контингенту з відповідних пунктів. При цьому вважати, що швидкість пересування залізницею – 50 км/год, удосконаленим шосе – 60 км/год, шосе – 50 км/год, удосконаленою ґрунтовою дорогою – 40 км/год, іншими дорогами – 30 км/год. В випадку застосування залізниці і автомобільних доріг час на завантаження/вивантаження бойової техніки вважати за 30 хв.

Про можливості пересування і час прибуття, при відліку від часу «Ч» доповісти через 24 години з моменту отримання цього розпорядження.

Відправлено засобами АСУ ГІС: 10:35 10.03.2020

Начальник топографічної служби 5 АК

полковник

П.А.САВКОВ

Підпис

P.S. Вважати, що дорожня мережа проходить через населені пункти, до яких існує. Мережеву модель створити з застосуванням бази геоданих шарів дорожньої мережі та залізниці.

Завдання для практичної роботи №2

«Аналіз тактичних властивостей місцевості»

1. Теоретична складова постановки завдання.

Аналіз тактичних властивостей місцевості командир проводить по топографічній карті, яка в стандартному виконанні містить вісім основних сегментів: 1 - планово-висотна основа; 2 - рельєф суші; 3 - гідрографія та гідротехнічні споруди; 4 - населені пункти; 5 - промислові, сільськогосподарські і соціально-культурні об'єкти; 6 - дороги і дорожні споруди; 7 - рослинний покрив і ґрунти; 8 - кордони і окремі природні явища. Всі ці сегменти на паперовій топографічній карті зображуються кожен своїм кольором і при поліграфічному виготовленні мають кожен свою друкарську форму. Цифрова топографічна карта була отримана згодом з паперової шляхом векторизації кожного окремого сегмента і занесення в атрибутивну таблицю їх характеристик. Природно припустити, що ГІС-аналіз тактичних властивостей місцевості в загальному випадку повторює процедуру аналізу місцевості командиром, але те, що робиться командиром інтуїтивно, в геоінформаційній системі приймає абсолютно конкретні обриси.

На перший погляд ГІС-аналіз тактичних властивостей місцевості - це типова задача придатності території, яка вирішується шляхом алгебраїчного підсумовування растрів, кожен з яких несе інформацію про вплив окремої складової (рельєфу, гідрографії, ґрунтів, рослинного покриву і т.д.). Однак це не зовсім так. Вплив усіх складових у нашому випадку можна розбити на дві групи: перша група має чіткий розподіл на місцевості, елемент будь-якого растра приймає тільки два значення: No Data (немає даних з метою виключення їх з розгляду) або будь-яке число в інтервалі 0-1; друга група більше тяжіє до нечіткості, яка формується у вигляді спадаючого від 1 до 0 буфера навколо певних просторових об'єктів, в межах яких значення растра дорівнює 1, всі інші точки растра приймаються рівними 0. До першої групи слід віднести растр зон видимості з пануючих висот і пунктів спостереження недружньої сторони, а також растр зон непрохідності місцевості. До другої

групи належать растри рослинного покриву і дорожньої мережі. Для кожного з них формується спадаючий за лінійним законом буфер, ширина якого визначається часом досяжності цих об'єктів, тобто можливостями приведення військового контингенту у відповідний ступінь бойової готовності. Розглянемо більш детально порядок геоінформаційного аналізу тактичних властивостей місцевості. На першому етапі необхідно визначити межі району аналізу, для чого з інформаційного сховища беруть цифрову карту місцевості базового масштабу 1: 200 000. Для виділення району аналізу, створюється "маска району": на електронній карті визначаються межі зони можливого розташування військового підрозділу. Шляхом узгодження кордонів "маски" і створеної електронної карти формується електронна карта на район, який підлягає аналізу.

Для аналізу тактичних властивостей доцільно використовувати тільки вбудовані функції ГІС-аналізу, які реалізовані в більшості геоінформаційних програмних оболонок. Це - визначення зон видимості і крутизни схилів. При бажанні, можна застосувати більш складні алгоритми аналізу, наприклад, визначення зон непрохідності місцевості для автомобільної техніки в залежності від вологості та типу ґрунтів. Цей та інші підходи потребують додаткових даних, які не містяться у вихідній топографічній карті і розглядатися в даній роботі не будуть. На першому етапі створюється тривимірна модель району аналізу шляхом комплексної обробки елементів планово-висотної основи (пункти геодезичної мережі і пануючі висоти) і рельєфу (горизонталі) модулем просторового аналізу Spatial Analyst, а потім формується растр зон видимості з пануючих висот і додаткових пунктів спостереження у форматі GRID. Растр формується з урахуванням висоти елементів рослинності. Значення кожного елемента растра відповідає кількості пунктів спостереження, в зоні видимості яких він знаходиться. Наступною алгебраїчною процедурою є нормування растра і віднімання з 1. Таким чином, формується растрова модель району, для якої значення елементів растра змінюються в межах 0-1, і чим вище значення, тим більш

прийнятним для розташування є цей елемент місцевості з погляду маскування. Наступним етапом аналізу є виділення областей непрохідності для військових підрозділів. Відповідно, ці області є забороненими для знаходження в їх межах військових підрозділів. Такими областями є, як правило, об'єкти гідрографії та області поверхні суші, кут нахилу яких перевищує критичний для прохідності транспортних засобів. Залишилися після виключення областей непрохідності елементам растра присвоюються значення в інтервалі від 0 до 1 залежно від кута нахилу поверхні суші (чим менше кут, тим більше значення).

При розгляді растрових моделей рослинного покриву і дорожньої мережі доцільно ввести їх нечіткі межі. Це визначається вимогою знаходження військового підрозділу якомога ближче до дороги, щоб якнайшвидше забезпечити перебазування або розосередження, і в лісі, щоб забезпечити маскування і захист своїх військ від застосування зброї противником.

З усього відображуваного на топографічній карті рослинного покриву необхідно провести відбір значимих об'єктів - лісових насаджень з певними їхніми характеристиками: висота, діаметр стовбура, відстань між деревами. При аналізі потрібно враховувати прохідність рослинного покриву для техніки сухопутних військ.

Оцінюючи тактичні властивості місцевості, слід враховувати, що не всі складові однаково впливають на прийняття рішення про розміщення військ. Військове мистецтво передбачає два основних види їх бойового застосування: наступ і оборона. Зрозуміло, що для наступу більш важливою властивістю є прохідність місцевості, а для оборони - її захисні характеристики. Тому для кожної військової операції необхідно формувати свою ієрархію тактичних властивостей, керуючись ступенем їх впливу на бойові дії. Для розглянутої моделі будемо вважати, що ступінь впливу кожної складової на загальний результат однакова, хоча для оборони слід надати більше ваги рослинного покриву, а для наступу - дорожній мережі.

2. Постановка завдання.

Визначити найбільш придатні ділянки розташування підрозділу сухопутних військ на місцевості з урахуванням як мінімум наступних характеристик місцевості:

- зон невидимості з пануючих висот і з пунктів спостереження (блок-постів) супротивника відповідно до визначеного варіанту;
- зон непрохідності для техніки сухопутних військ (об'єкти гідрографії, ухили з кутом нахилу більше 25 градусів, лісові насадження, які не дозволяють прохід техніки сухопутних військ в залежності від відстані між деревами і товщини стовбура);
- характеристик дорожнього покриття (чим даліше відстань від дороги, тим гірше показник розташування);
- характеристик лісонасаджень (чим ближче до лісу, тим краще).

3. Варіанти виконання завдання:

№ варіанту	Розташування блок-постів	Примітка
1	БЕЙЛЕ-БОРША, Стримтура, Вишеул-де-Жос, Шанц	
2	СЕЧЕЛ, Валя-Вишеулуй, Леордина, Пояна-Илвей	
3	Бирсана, Ботиза, Ромули, Родна	
4	Сарата, Слетьоара, Еуд, Селиштя-де-Сус	
5	СИНДЖОРЗ-БЕЙ, Рускова, Шьеу, Вишеу	
6	Поенеле-Глодулуй, Кухя, Фьяд, Аньеш	
7	Рона-де-Сус, Леспедя, Гура-Финтини, Валя-Маре	
8	Велени, Бочикоел, Мойсей, Лунка-Ілвей	
9	Бистра, Поениле-де-суб-Мунте, Катараме, Ілва-Маре	
10	Ненешти, Вишеул-де-Мижлок, Мекерлеу, Речеле	
11	Голошина, Валя-Хотарулуй, Телчу, Бряза	
12	Сарата, Катараме, Агреш, Глод	
13	Розавля, Телчу, Валя-Вишеулуй, Маеру, Шьеу	

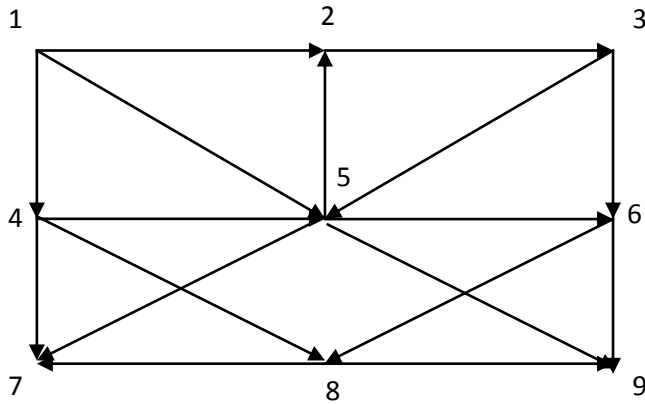
ПИТАННЯ ДО ЗАЛІКУ З ДИСЦИПЛІНИ
"ГІС В ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА
ПЛАНУВАННІ І УПРАВЛІННІ РОЗВИТКОМ ТЕРИТОРІЙ"

1. Основні напрями впровадження ГІС у транспортну інфраструктуру.
2. Поняття мережі, типи мереж.
3. Моделі мереж: геометричні та логічні мережі.
4. Поняття мережевого аналізу.
5. Набори мережевих даних.
6. Елементи мережі: ребра, з'єднання, повороти.
7. Зв'язність елементів мережі.
8. Атрибути мережі.
9. Витрати в мережі, поняття імпедансу.
10. Ієрархія в мережі. Обмеження, приклади обмежень.
11. Мультимодальні мережі.
12. Найкоротший шлях. Алгоритм Дейкстри.
13. Задача пошуку розміщення найближчого пункту обслуговування.
14. Задача визначення зон обслуговування в мережі.
15. Матриця витрат Джерело-Призначення (OD Cost Matrix).
16. Додаткові обмеження при визначенні маршрутів парку транспортних засобів.
17. Мережева задача розміщення-розподілення.
18. Приклади залежності мережевого аналізу від часу.
19. Визначення графу. Орієнтовані, неорієнтовані і змішані графи.
20. Матричне зображення графів. Матриця суміжності.
21. Операції над графами. Об'єднання графів.
22. Операції над графами. Перетин графів.
23. Операції над графами. Кільцева сума двох графів.
24. Пряме транзитивне замикання в графі.
25. Зворотне транзитивне замикання в графі.

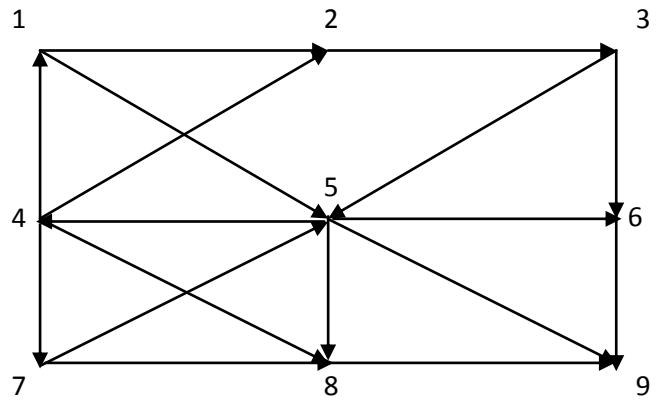
26. Знаходження вершин, що належать до шляху через транзитивні замикання.
27. Досяжність в графі. Матриця досяжності.
28. Контрдосяжність в графі. Матриця контрдосяжності.
29. Матричний метод знаходження шляхів у графах.
30. Порядок створення мережевого набору класів просторових об'єктів в ArcGIS.
31. Поняття нечіткої логіки і функція належності.
32. Види області значень функції належності.
33. Лінгвістична змінна.
34. Властивості нечітких множин: перетин, об'єднання, доповнення.
35. Моделювання придатності території. Булева модель придатності.
36. Переваги та недоліки булевої придатності.
37. Моделювання придатності з використанням балів або рейтингів.
38. Функція зваженого накладення як метод врахування зважених факторів.
39. Перекласифікація під час моделювання придатності з використанням балів, мета її застосування.
40. Переваги та недоліки моделювання придатності з використанням балів.

ЗАВДАННЯ МОДУЛЬНИХ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

Варіант 1



Варіант 2



1. Знайти матрицю суміжності.
2. Визначити досяжність і контрдосяжність в наведених графах.

Варіант 1

1. Визначення нечіткої множини, поняття лінгвістичної змінної.
2. Використання програми Spatial Analyst для створення шару зон невидимості з базових висот цифрової карти району Великий Бичків базового масштабу 1:200000.

Варіант 2

1. Властивості нечіткої множини: перетин, об'єднання, доповнення, їх графічне зображення.
2. Вибір двох точок з шару планово-висотної основи цифрової карти району Великий Бичків базового масштабу 1:200000, експорт їх в окремі шари і обчислення замаскованого шляху між ними.

РОЗДІЛ 1. ГЕОПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ.

1.1. Основні напрями впровадження геоінформаційних систем в транспортну інфраструктуру.

Територіальна розподіленість транспортних систем робить їх ідеальним об'єктом для використання в геоінформаційних системах. Іншими словами, геоінформаційні системи є оптимальною платформою для підготовки і ухвалення комплексних рішень у сфері транспорту. Адже просторова складова є природною основою інтеграції задач оперативного управління, розрахункових задач, задач управління транспортною інфраструктурою, навігації тощо. Розглянемо основні напрями впровадження ГІС в сферу транспорту, враховуючи досвід, накопичений на муніципальному рівні, як в Україні, так і в світі (рис. 1.1).

Управління майном термінальних комплексів. Перш за все під майном термінальних комплексів розуміють морські порти і аеропорти. Тут "майно" розглядається в широкому значенні, а не тільки як об'єкт обліку основних фондів. За великим рахунком, цей напрям використання ГІС не сильно відрізняється від управління майном інших підприємств і компаній. Тут ГІС є логічним продовженням традиційних баз даних і систем обліку, додаючи до них здатність всесторонньо моделювати територіально розподілену інфраструктуру підприємства - земельні ділянки, комунікації, розміщення об'єктів тощо. Поєднання графіки і табличної інформації для транспортних підприємств особливо цінне, оскільки дозволяє наочно представляти взаємне розташування просторових об'єктів. Чим краще поінформовані фахівці, тим більш ефективно вони зможуть управляти. Створювати таку модель доцільно за допомогою сучасних приладів для геодезичних вимірювань. Застосування високоточних приладів позиціонування дозволяє побудувати модель підприємства з сантиметровою точністю. Оскільки для навігації транспортних засобів використовується глобальна система позиціонування, що має також високу точність позиціонування, то утворюється єдина

геодезична основа для вирішення різних завдань підприємства. Така модель не просто "висить у повітрі", вона вписана в навколишню географічну реальність з її топографією, екологією, дорожньою мережею тощо.



Рис.1. Основні напрями впровадження ГІС в транспортну інфраструктуру.

Сучасні ГІС дозволяють створювати цифрові моделі транспортних підприємств, що за своїми можливостями набагато перевершують традиційні паперові плани. Бази геоданих прописують просторові і функціональні зв'язки між об'єктами, моделюють їх поведінку. Тривимірна інтерактивна візуалізація за допомогою спеціалізованих модулів ГІС істотно полегшує сприйняття плану (точніше, вже тривимірної моделі) транспортного підприємства. Слід також відзначити можливість поєднання у тривимірній

сцені інформації про об'єкти морського або річкового порту із загальною топографією, батиметрією і траєкторіями руху суден.

Аналогічно, для аеропортів можливе відображення їх території і об'єктів, суміщене з тривимірними зображеннями повітряних коридорів, траєкторій зльоту і посадки. Актуальне завдання для аеропортів – управління площами, що здаються в оренду туроператорам, підприємствам торгівлі і обслуговування пасажирів. ГІС дозволяє наочно відображати цю інформацію на електронних планах поверхів, пов'язаних з базами даних об'єктів оренди і орендарів. Правильне просторове подання дозволяє знаходити недовикористані ресурси або помилки в розміщенні, що можуть створити незручності або загрозу безпеці пасажирів. Такий підхід дозволяє керівникам, які ухвалюють управлінські рішення в цій області, підвищити якість обслуговування та конкурентоспроможність.

Управління територіями під об'єктами транспортних систем. Смуга відведення дорожньої мережі вимагає постійного моніторингу як з точки зору дотримання норм безпеки, так і для ефективного управління майном, вміщуючи земельні ділянки обслуговуючих підприємств. ГІС-технологія дозволяє інтегрувати дані повітряного лазерного сканування, аерофотознімання, тривимірні моделі об'єктів, інформацію про функціональні зони і технічні засоби регулювання руху в єдину геоінформаційну систему генерального плану дорожньої мережі. Виконання вимірювань координат за допомогою сучасних геодезичних приладів дозволяє створити комплексну модель дороги в реальних географічних координатах і надалі зв'язувати моделі окремих доріг і ділянок в загальну систему.

Управління парком транспортних засобів. Це завдання стоїть перед комерційними перевізниками, які здійснюють замовне транспортування вантажів і пасажирів (таксі), перед мережевими торговими компаніями, підрозділами збуту нафтових компаній, а також компаніями, які торгують по каталогах і через інтернет-магазини. Мета – знизити загальні витрати на

транспортування і прискорити виконання замовлень. Крім планування руху транспортних засобів, затребуваним є їх оперативний (у реальному часі) моніторинг. Зараз пропонуються готові системи для установки на рухомі об'єкти і в центри моніторингу. Така система складається з бортових пристроїв, сервера повідомлень і програмного забезпечення оператора. Бортові пристрої визначають своє положення у просторі і передають цифрові повідомлення з координатами по загальнодоступних каналах зв'язку. Досконаліші можуть передавати також телеметрію (параметри стану транспортного засобу або вантажу), вести автономний запис на вбудований носій даних, а також забезпечувати діалог водія і диспетчера. Транспортні підприємства, які бажають створити систему оперативного моніторингу парку транспортних засобів або вантажів, тепер можуть вибирати устаткування серед широкого спектру пропозицій різних виробників, як зарубіжних, так і українських. Координати, що передаються бортовими пристроями, поступають на сервер повідомлень, що веде оперативну базу даних. Вхідні повідомлення сортують і обробляють для формування індивідуальних журналів руху і параметрів об'єктів моніторингу. Ці журнали надаються операторам центру моніторингу в електронному вигляді, а траєкторії, що зберігаються в них, відображаються на електронній карті.

Побудова і оптимізація маршрутів на існуючій дорожній мережі. В великих містах існує, наприклад, більше десятка, а то і сотні маршрутів громадського транспорту (не рахуючи приватних перевізників). Утримати їх в одній голові, а тим більше проаналізувати – просто неможливо. До того ж оптимізувати потрібно не один вид транспорту, а всі їх в комплексі – метро, автобуси, трамваї, тролейбуси, міські електропоїзди. Це завдання – складне організаційно, оскільки вимагає координації великої кількості управляючих організацій. Воно складне також технічно, оскільки вимагає збору, систематизації і аналізу великого обсягу початкових даних. Геоінформаційні системи можуть запропонувати цілий ряд інструментів для вирішення цього завдання. Перш за все потрібно виконати транспортне районування міста на

основі аналізу забудови і природних перешкод для пересування. Ця робота складна для автоматизації, але і виконується не так часто. Її звичайно виконують вручну, але ГІС дозволить дещо автоматизувати цей процес. Застосовуючи засоби просторового аналізу, можна визначити транспортну потребу районів міста на основі аналізу відповідних чинників – щільності населення, рівня автомобілізації, розміщення центрів тяжіння (вокзали, ринки, великі торгові центри, розважальні комплекси) тощо. Природно, що виконувати такий аналіз зручно на основі цифрової карти і районування, також підготовлених в ГІС.

Нарешті, база даних маршрутів пасажирського транспорту є невід'ємною просторовою складовою – прекрасна основа для підготовки традиційних карт транспорту і створення інтерактивних інформаційних систем для населення. Наприклад, для інтернет-сервісу, що дозволяє будь-якому бажаючому знайти свій шлях з точки А в точку Б по діючих маршрутах пасажирського транспорту. Слід відзначити, що засоби аналізу, що є в ГІС, дозволяють не тільки прокладати маршрути по існуючій вулично-дорожній мережі, але і оцінювати ефективність самої цієї мережі, обчислювати вузькі місця, планувати розвиток. Практично в будь-якому місті можна знайти приклади, коли довжина навіть найоптимальнішого маршруту у багато разів перевищує геометрично найкоротшу відстань між пунктами відправлення і призначення (при тому, що на ідеальній мережі перевищення не може бути більше 40%). Причини цього – низька зв'язність мережі, обумовлена перешкодами (залізниці, річки і, як ні парадоксально, магістралі безперервного руху при нашій хронічній недостатності розв'язок), а також невдала організація руху. Результат – значний перепробіг для всіх учасників дорожнього руху: суспільного, комерційного і особистого транспорту. Ну, а наслідки відомі – пробки, шум, загазованість, прискорення зносу дорожнього полотна.

Моніторинг стану дорожнього полотна і планування ремонтів. Це один з найпопулярніших напрямів застосування ГІС в дорожніх

адміністраціях. Часто одного лише колірного кодування ділянок доріг по термінах ремонту буває досить, щоб істотно оптимізувати процес і підвищити якість дорожнього покриття в цілому. Якщо ж використовувати ГІС для інтеграції різносторонньої інформації про дорожню мережу (види/якість покриття, транспортне навантаження, дати ремонтів), то на її основі можна побудувати динамічну модель зносу шляхів і автоматизувати планування ремонтів. У базі геоданих також зручно зберігати відомості про дорожні знаки і іншу «придорожню» інформацію, прив'язану до географічних або прямокутних координат.

Моніторинг покриття потрібен не тільки автошляхам, але і аеропортам. Аналогічна задача відносно рейкового шляху стоїть і перед залізницями. У всіх цих областях транспорту ГІС можуть помітно підвищити ефективність витрат на підтримку покриття або шляхів в належному стані.

Навігація. Хоча навігація ґрунтується на просторовій інформації і, по суті, невід'ємна від транспорту, застосування універсальних ГІС-пакетів в цій галузі досить обмежене, оскільки для навігації необхідний лише невеликий набір специфічних функцій. Програмне забезпечення можна використовувати для навігації, маючи на увазі те, що воно відкрите для взаємодії з іншими додатками (на відміну від замкнутих бортових навігаційних систем), а також може вирішувати безліч супутніх задач. Вірніше, самі навігаційні функції будуть корисним доповненням в рухомій системі моніторингу/збору даних.

Інформаційні послуги населенню. Інформація про маршрути і розклад руху транспортних засобів потрібна всім. Засоби для її картографічного подання в Інтернеті існують вже більше двадцяти років. До недавнього часу була парадоксальна ситуація практичної відсутності інформаційних послуг для масового споживача. Причини були відомі – монополізм держави на просторову інформацію при її фактичній незацікавленості в наданні сервісів на її основі. Таємність координатних визначень з необхідною точністю донедавна залишалась принциповою перешкодою. Останніми роками

ситуація почала мінятися під тиском популярності проектів типу Google Maps, почали розвиватися аналогічні вітчизняні сервіси. З'являються актуальні карти доріг для планування поїздок, плани вулично-дорожньої мережі і маршрутів суспільного транспорту, схеми організації руху, інформація про ремонти і закриті ділянки шляхів, про пробки на шляхах в реальному часі тощо. Інтернет – ідеальне середовище для надання інформаційних послуг на основі цих даних – від простого відображення карт до пошуку оптимального маршруту з урахуванням визначених користувачем чинників.

Таким чином, за визначенням вище просторовим обсягом і переліком функцій транспортно-логістична система може бути виділена в окрему галузь геопросторового моделювання, яка вимагає створення окремого математичного апарату. Таким математичним апаратом для формалізації задач транспортної інфраструктури стала теорія графів.

1.2. Основи теорії графів.

1.2.1. Визначення графу.

Граф задається множиною точок або вершин $x_1, x_2, \dots, x_n$ і множиною ліній або ребер $a_1, a_2, \dots, a_m$, що сполучають між собою всі або частину вершин. Формальне визначення графа може бути дано наступним чином.

Графом називається впорядкована пара у вигляді $G = (X, A)$, де $X = \{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ – множина вершин графа; $A = \{a_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ – множина ребер графа.

Графи можуть бути орієнтованими, неорієнтованими і змішаними. Якщо ребра у множині A орієнтовані, що зазвичай показується стрілкою, то вони називаються *дугами*, а граф з такими ребрами називається *орієнтованим* графом (рис. 1.2,а). Якщо ребра не мають орієнтації, то граф називається *неорієнтованим* (рис. 1.2,б). Граф, в якому присутні і ребра, і дуги називається *змішаним* (рис. 1.2,в). Дуга a_i може бути представлена впорядкованою парою вершин (x_n, x_k) , де x_n – початкова, а x_k – кінцева

вершини. Наприклад, для графа G_1 (рис. 1.2,а) дуга a_1 задається парою вершин (x_2, x_1) , а дуга a_3 парою вершин (x_2, x_3) . Дуга, у якій початкова і кінцева вершини співпадають, називається *петлею*. У графі G_3 (рис. 1.2, в) дуга a_7 є *петлею*.

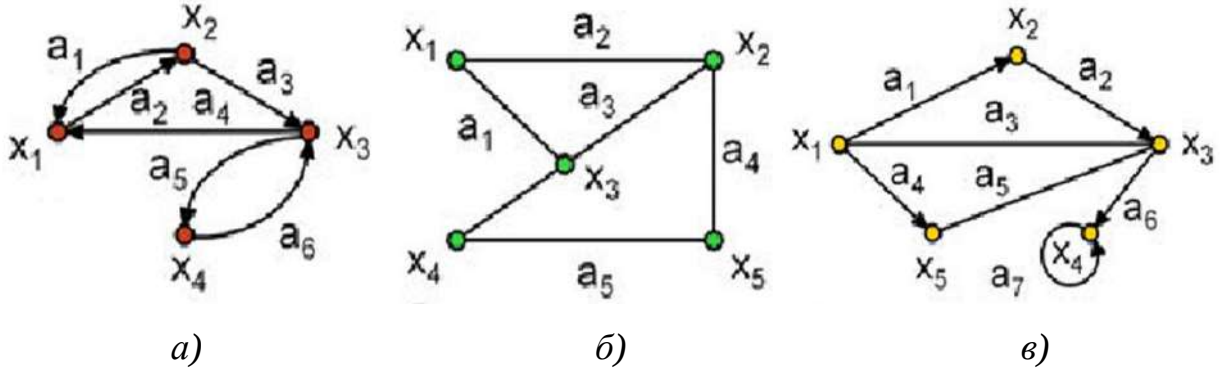


Рис. 1.2. Види графів: а – орієнтований; б – неорієнтований; в – змішаний.

1.2.2. Матричне подання графів.

Для виконання операцій над графами зручно представляти їх у вигляді матриць суміжності.

Матриця суміжності – це квадратна матриця розмірністю $n \times n$, (де n – число вершин графа), що однозначно представляє його структуру: $A = \{a_{ij}\}$, $i, j = 1, 2, \dots, n$. Кожен елемент матриці визначається наступним чином: $a_{ij} = 1$, якщо існує дуга (x_i, x_j) , $a_{ij} = 0$, якщо такої дуги не існує.

На рис. 1.3, наведений граф і його матриця суміжності.

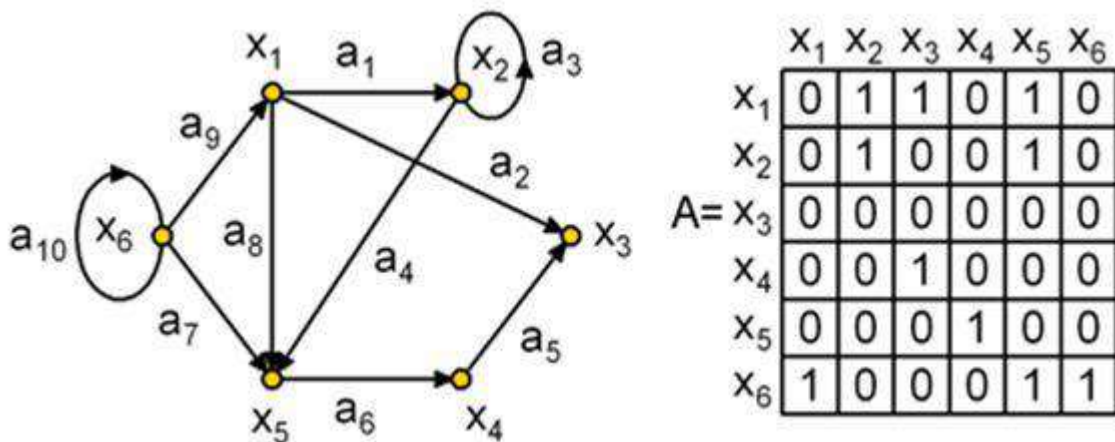
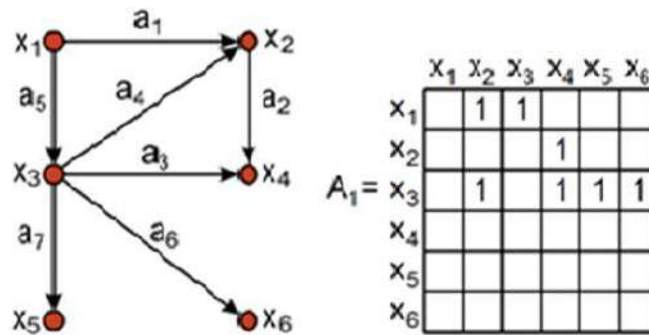


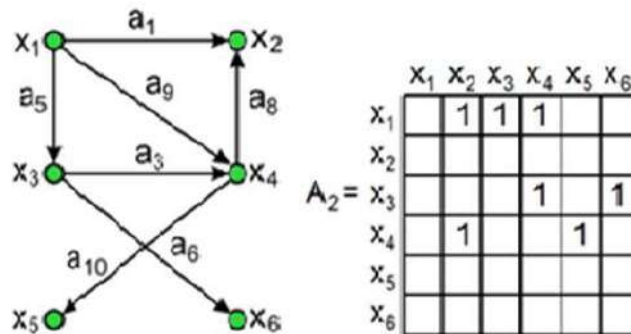
Рис. 1.3. Граф і його матриця суміжності.

1.2.3. Операції над графами.

Розглянемо основні бінарні операції над двома графами $G_1=(X_1,A_1)$ і $G_2=(X_2,A_2)$ (рис.1.4).



а)



б)

Рис. 1.4. Графи і їх матриці суміжності: а – граф G_1 , б – граф G_2 .

Об'єднання графів позначається як $G_1 \cup G_2$ і є таким графом $G_3=(X_1 \cup X_2, A_1 \cup A_2)$, що множина його вершин є об'єднанням X_1 і X_2 , а множина ребер – об'єднанням A_1 і A_2 . Граф G_3 , що одержаний операцією об'єднання графів G_1 і G_2 , і його матриця суміжності наведені на рис. 1.5. Матриця суміжності результуючого графа отримується операцією поелементного логічного ($1+1=1$) додавання матриць суміжності початкових графів G_1 і G_2 .

Перетином графів G_1 і G_2 , що позначається як $G_1 \cap G_2$, є граф $G_4=(X_1 \cap X_2, A_1 \cap A_2)$. Множини вершин і дуг графу G_4 складаються відповідно з вершин і дуг, присутніх одночасно в графах G_1 і G_2 . Результат операції перетину графів $G_1 \cap G_2$ наведений на рис. 1.6. Матриця суміжності графу G_4 є результатом поелементного множення матриць суміжності графів G_1 і G_2 .

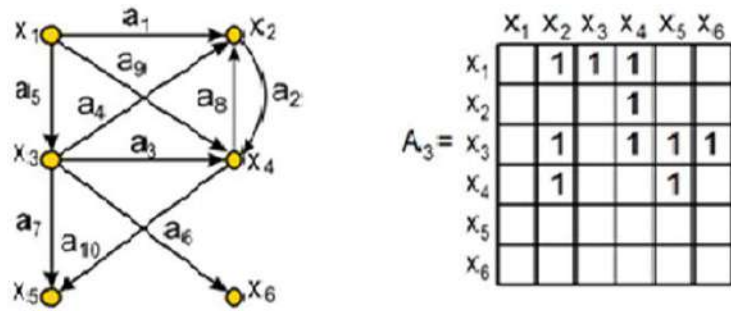


Рис. 1.5. Граф $G_3 = G_1 \cup G_2$ і його матриця суміжності.

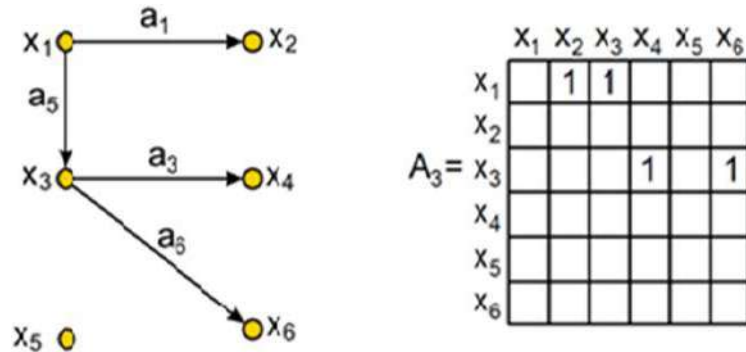


Рис. 1.6. Граф $G_4 = G_1 \cap G_2$ і його матриця суміжності.

Кільцевою сумою двох графів G_1 і G_2 , що позначається як $G_1 \oplus G_2$, є граф G_5 , породжений на безлічі ребер $A_1 \oplus A_2$. Іншими словами, граф G_5 не має ізольованих вершин і складається тільки з ребер, присутніх або в G_1 , або в G_2 , але не в обох одночасно. Кільцева сума графів G_1 і G_2 показана на рис. 1.7, а матриця суміжності кільцевої суми є операцією поелементного логічного додавання по $mod\ 2$ ($1+1=0$) матриць суміжності початкових графів G_1 і G_2 .

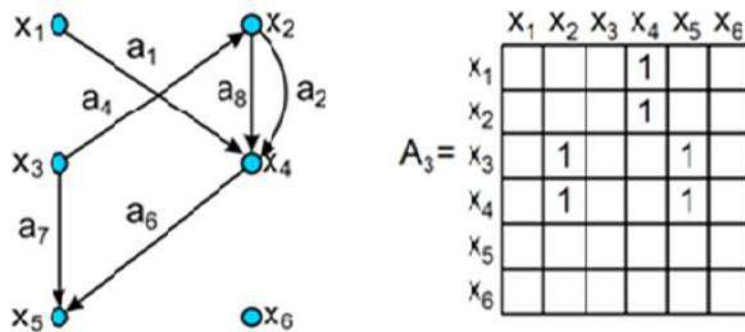


Рис. 1.7. Граф $G_5 = G_1 \oplus G_2$ і його матриця суміжності.

Легко переконатися в тому, що три розглянуті операції комутативні, тобто:

$$G_1 \cup G_2 = G_2 \cup G_1, \quad G_1 \cap G_2 = G_2 \cap G_1, \quad G_1 \oplus G_2 = G_2 \oplus G_1.$$

1.2.4. Обчислення транзитивних замикань у графі.

Пряме транзитивне замикання деякої вершини x_i графу G , $T^+(x_i)$ – це множина вершин, які досягаються з вершини x_i . Розглянемо метод знаходження прямого транзитивного замикання для вершини x_2 за допомогою матриці суміжності, наведеної на рис. 1.8,б, для графа, зображеного на рис. 1.8,а.

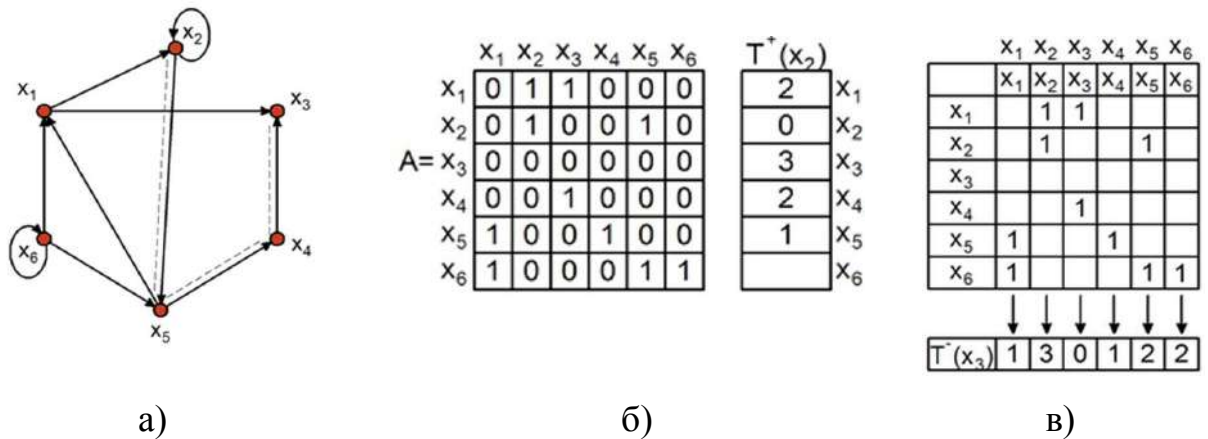


Рис. 1.8. а – граф G , б – матриця суміжності і пряме транзитивне замикання, матриця суміжності і зворотне транзитивне замикання.

На 1-му кроці ітераційного алгоритму заносимо 0 у стовпець T^+ для елементу x_2 і аналізуємо 2-й рядок матриці суміжності. Знаходимо, що елементи a_{22} і a_{25} дорівнюють 1. Заносимо 1 в 5-у клітинку T^+ . 2-а клітинка вже зайнята нулем, тому 1 до неї не заносимо. 2-й крок починається аналізом 5-ого рядка матриці суміжності, який відповідає вершині x_5 графа. Знаходимо, що елементи a_{51} і a_{54} дорівнюють 1, тобто з вершини x_5 існують дуги до вершин x_1 і x_4 , або інакше кажучи, з вершини x_2 є шляхи довжиною 2 до вершин x_1 і x_4 . Довжину шляху 2 заносимо в 1-у і 4-у клітинки стовпця $T^+(x_2)$. На 3-му кроці аналізуються 1-й і 4-й рядки матриці суміжності. Знаходимо, що елементи $a_{12}=1$, $a_{13}=1$ і $a_{43}=1$. У відповідну клітинку заносимо цифру 3. Це можливо зробити тільки для вершини x_3 , оскільки інші клітинки вже зайняті. Аналіз 3-ого рядка матриці на 4-му кроці показує, що з вершини x_3 немає вихідних дуг, отже процес формування прямого транзитивного замикання завершений.

Таким чином, в стовпці $T^+(x_2)$ стоять числа, що дорівнюють довжині шляху від вершини x_2 до відповідних вершин графа. Шлях від x_2 до x_3 , який дорівнює 3, показаний штриховою лінією на рис. 1.8,а. У стовпці $T^+(x_2)$ відмічені всі вершини, досяжні з вершини x_2 , отже, вони входять до прямого транзитивного замикання $T^+(x_2)$:

$$T^+(x_2) = \{ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \}.$$

Зворотне транзитивне замикання деякої вершини x_i графу G , $T(x_i)$ – це множина вершин, з яких можна досягти вершини x_i . Зворотне транзитивне замикання формується з аналогією з прямим, але ітераційний алгоритм застосовується не до стовпчика в матриці суміжності, а до рядка у цій матриці. Приклад знаходження зворотного транзитивного замикання для вершини x_3 наведений на рис. 1.8,в.

$$T(x_3) = \{ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \}.$$

1.2.5. Досяжність і контрдосяжність в графах.

Задач, в яких використовується поняття досяжності, доволі багато. Ось одна з них. Граф може бути моделлю вулично-дорожньої мережі, в якій перехрестя і перетини вулиць представлені вершинами, а дуги інтерпретують дозволені напрями руху між перехрестями і перетинами вулиць. При розгляді такої моделі можна поставити запитання, чи можливо від перехрестя x_i досягти перетину вулиць x_j , тобто, чи існує шлях, що йде від вершини x_i до вершини x_j ? Якщо такий шлях існує, то говорять, що вершина x_j досяжна з вершини x_i . Можна цікавитись досяжністю вершини x_j з вершини x_i тільки на таких шляхах, довжини яких не перевищують заданої величини або кількість вершин вибраного шляху менше числа вершин у графі.

Досяжність у графі описується матрицею досяжності $R=[r_{ij}]$, $i,j=1,2,\dots,n$, де n – число вершин графа, а кожний елемент визначається таким чином: $r_{ij}=1$, якщо вершина x_j досяжна з x_i , і $r_{ij}=0$ у протилежному випадку.

Множина вершин $R(x_i)$ графа G , досяжних із заданої вершини x_i , складається з таких елементів x_j , для яких (i,j) -й елемент в матриці

досяжності дорівнює 1. Очевидно, що всі діагональні елементи в матриці R дорівнюють 1, оскільки кожна вершина досяжна до себе самої шляхом довжиною 0. Подальше визначення досяжності шляхами довжиною 1, 2, 3... і так далі приводить до необхідності застосування транзитивного замикання для визначення елементів матриці досяжності. Множина досяжних вершин $R(x_i)$ представляє собою пряме транзитивне замикання вершини x_i , тобто $R(x_i) = T^+(x_i)$. Отже, для побудови матриці досяжності треба знайти множину $R(x_i)$ для всіх вершин x_i . При цьому $r_{ij}=1$, якщо $x_j \in R(x_i)$ і $r_{ij}=0$ у протилежному випадку.

На рисунку 1.9 показаний приклад визначення досяжності у графі, множини досяжності визначаються наступним чином:

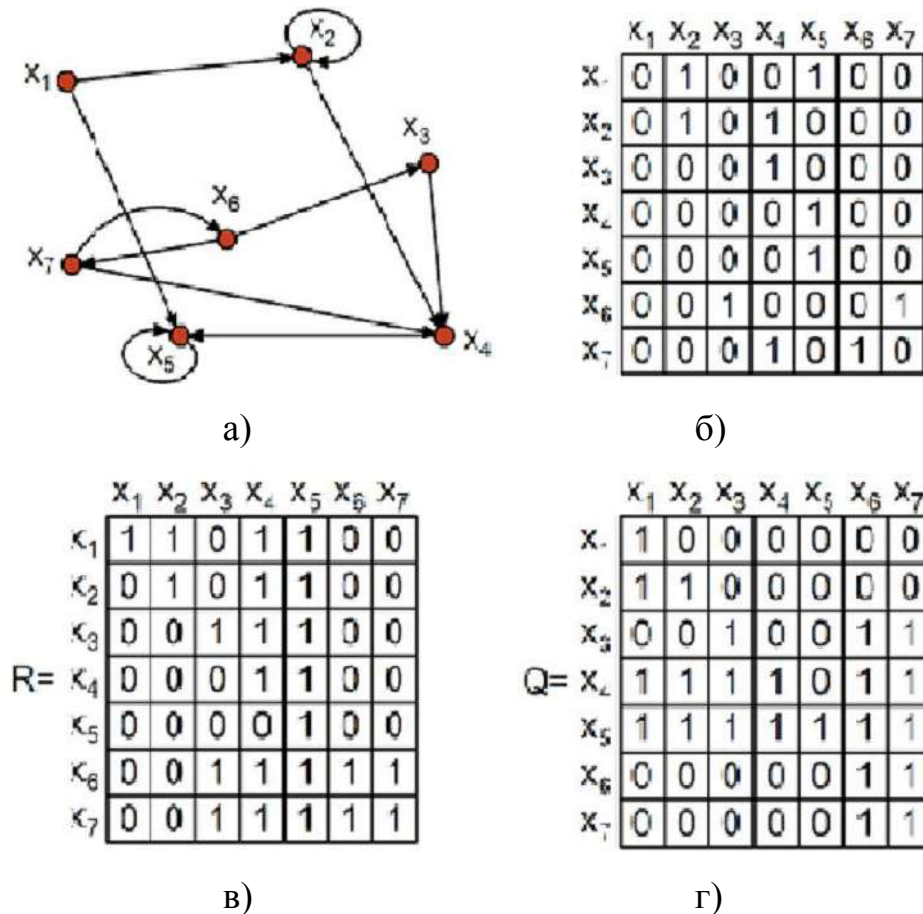


Рис. 1.9. а – граф G , б – матриця суміжності, в – матриця досяжності, г – матриця контрдосяжності.

$$R(x_1) = \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_2, x_4, x_5\} \cup \{x_2, x_4, x_5\} = \{x_1, x_2, x_4, x_5\},$$

$$R(x_2) = \{x_2\} \cup \{x_2, x_4\} \cup \{x_2, x_4, x_5\} \cup \{x_2, x_4, x_5\} = \{x_2, x_4, x_5\},$$

$$R(x_3) = \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_5\} = \{x_3, x_4, x_5\},$$

$$R(x_4) = \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_5\} = \{x_4, x_5\},$$

$$R(x_5) = \{x_5\} \cup \{x_5\} = \{x_5\},$$

$$R(x_6) = \{x_6\} \cup \{x_3, x_7\} \cup \{x_4, x_6\} \cup \{x_3, x_5, x_7\} \cup \{x_4, x_5, x_6\} = \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\},$$

$$R(x_7) = \{x_7\} \cup \{x_4, x_6\} \cup \{x_3, x_5, x_7\} \cup \{x_4, x_5, x_6\} = \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}.$$

Матриця досяжності показана на рис. 1.9,в. Матрицю досяжності можна побудувати по матриці суміжності (рис. 1.9,б), формуючи множини $T^+(x_i)$ для кожної вершини x_i .

В житті існують випадки, коли не можна повернутись в вихідну точку по тому ж самому ребру, наприклад, односторонній рух, полоси шляху, які розділені відбійниками тощо. Значить не завжди досяжність з вершини x_i до вершини x_j дорівнює досяжності з вершини x_j до вершини x_i . Така досяжність називається *контрдосяжністю* і вимагає додаткового опису.

Матриця контрдосяжності $Q=[q_{ij}]$, $i,j=1,2,\dots,n$, де n – число вершин графа, визначається наступним чином: $q_{ij}=1$, якщо з вершини x_j можна досягти вершину x_i , $q_{ij}=0$ в протилежному випадку.

Тобто, множиною контрдосяжності $Q(x_i)$ є множина таких вершин, з яких можна досягти вершину x_i .

$Q(x_i)$ – це є не що інше, як зворотне транзитивне замикання вершини x_i , $Q(x_i) = T(x_i)$. З визначень очевидно, що стовпець x_i матриці Q співпадає з рядком x_i матриці R , тобто $Q = R^T$, де R^T – матриця, транспонована з матриці досяжності R . Матриця контрдосяжності наведена на рис. 1.9,г.

1.2.6. Знаходження множини вершин, що входять до шляху.

Оскільки пряме транзитивне замикання вершини x_i $T^+(x_i)$ – це множина вершин, до яких є шляхи з вершини x_i , а зворотне транзитивне замикання вершини x_j $T^-(x_j)$ – множина вершин, з яких є шляхи до вершини x_j , то їх перетином $T^+(x_i) \cap T^-(x_j)$ є множина вершин, кожна з яких належить, принаймні, одному шляху, що проходить від x_i до x_j .

Так, наприклад, для графу, зображеному на рис. 1.10, знаходження вершин, що входять до шляху з вершини x_2 до вершини x_4 , зводиться до знаходження транзитивних замикань

$$T^+(x_2) = \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\},$$

$$T^-(x_4) = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\},$$

і їх перетину

$$T^+(x_2) \cap T^-(x_4) = \{x_2, x_3, x_4, x_5\}.$$

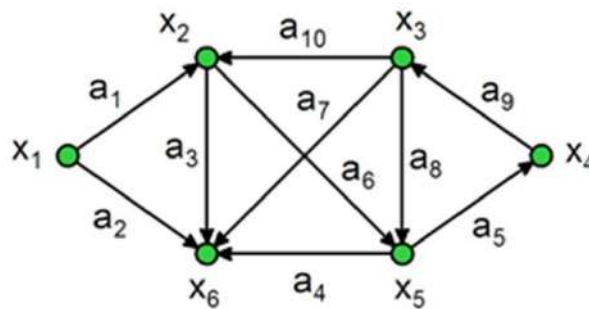


Рис. 1.10. Орієнтований граф.

1.2.7. Матричний метод знаходження шляхів у графах.

Матриця суміжності повністю визначає структуру графа. Піднесемо матрицю суміжності до квадрату за правилами математики. Кожний елемент матриці A^2 визначається за формулою:

$$a^{(2)}_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{ij}a_{jk}.$$

Добуток у формулі дорівнює 1 тоді і тільки тоді, коли обидва числа a_{ij} і a_{jk} дорівнюють 1, інакше він дорівнює 0. Оскільки з рівності $a_{ij}=a_{jk}=1$ випливає існування шляху довжиною 2 з вершини x_i у вершину x_k , що проходить через вершину x_j , то (i,k) елемент матриці A^2 дорівнює шляхам довжиною 2, що йдуть з x_i до x_k . На рисунку 1.11,а наведена матриця суміжності графа, зображеного на рис. 1.10. Результат піднесення матриці суміжності до квадрату A^2 показаний на рис. 1.11,б. Так "1", що стоїть на перетині другого рядка і четвертого стовпця, говорить про існування одного шляху завдовжки 2 з вершини x_2 до вершини x_4 . Дійсно, як бачимо в графі на

рис. 1.10, існує такий шлях: a_6, a_5 . "2" в матриці A^2 говорить про існування двох шляхів довжиною 2 від вершини x_3 до вершини x_6 : a_8, a_4 і a_{10}, a_3 .

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6				
A=	x_1	0	1	0	0	0	1	A ² =	x_1	0	0	0	0	1	1	A ³ =	x_1	0	0	0	1	0	1	A ⁴ =	x_1	0	0	1	0	0	0
	x_2	0	0	0	0	1	1		x_2	0	0	0	1	0	1		x_2	0	0	1	0	0	0		x_2	0	1	0	0	1	1
	x_3	0	1	0	0	1	1		x_3	0	0	0	1	1	2		x_3	0	0	1	1	0	1		x_3	0	1	1	0	1	1
	x_4	0	0	1	0	0	0		x_4	0	1	0	0	1	1		x_4	0	0	0	1	1	2		x_4	0	0	0	0	1	1
	x_5	0	0	0	1	0	1		x_5	0	0	1	0	0	0		x_5	0	1	0	0	1	1		x_5	0	0	0	1	1	2
	x_6	0	0	0	0	0	0		x_6	0	0	0	0	0	0		x_6	0	0	0	0	0	0		x_6	0	0	0	0	0	0
a)							б)							в)							г)										

а)

б)

в)

г)

Рис. 1.11. Матриця суміжності (а) і результати її піднесення до квадрату (б), третього ступеню (в), четвертого ступеню (г).

Аналогічно для матриці суміжності, піднесеної до третього ступеня A^3 (рис. 1.11,в), $a^{(3)}_{ik}$ дорівнює числу шляхів завдовжки 3, що йдуть від x_i до x_k . З четвертого рядка матриці A^3 видно, що шляхи завдовжки 3 існують: з x_4 до x_4 (a_9, a_8, a_5); з x_4 до x_5 (a_9, a_{10}, a_6); і два шляхи з x_4 до x_6 (a_9, a_{10}, a_3 і a_9, a_8, a_4).

Матриця A_4 показує існування шляхів довжиною 4 (рис. 1.11,г).

Таким чином, якщо $a^{(p)}_{ik}$ є елементом матриці A^p , то $a^{(p)}_{ik}$ дорівнює числу шляхів довжиною p , що йдуть від x_i до x_k .

1.2.8. Вага і довжина шляху.

Іноді дугам графа співставляють числа a_i , c_i , які називаються вагою або довжиною, вартістю або ціною. У кожному конкретному випадку вибирається те слово, яке ближче підходить по сенсу завдання.

Граф G , що описується трійкою виду $G=(X,A,C)$, де $X=\{x_i\}$, $i=1,2,\dots,n$ – безліч вершин, $A=\{a_i\}$, $i=1,2,\dots,t$ – безліч дуг, $C=\{c_i\}$, $i=1,2,3,\dots,t$ – безліч характеристик дуг, називається *графом зі зваженими дугами*.

Приклад такого графа наведений на рис. 1.12,а. При розгляді шляху M , поданого послідовністю дуг $(a_1, a_2, \dots, a_q)$, за його вагу (або довжину чи вартість) беруть число $L(M)$, що дорівнює сумі ваг всіх дуг, що входять до шляху, тобто $L(M)=(c_i)$ для всіх a_i шляху M .

Довжиною (або потужністю) шляху називається число дуг, що входять до нього. Найчастіше термін "довжина" вживають, коли всі дуги, що

входять до шляху, мають вагу, що дорівнює 1, тобто коли вага шляху співпадає з його довжиною (потужністю).

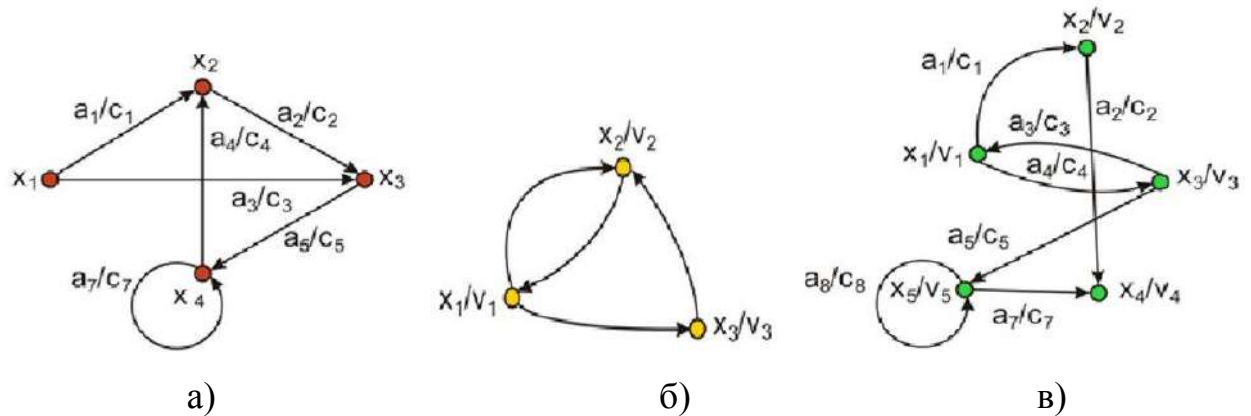


Рис. 1.12. Графи: а – зі зваженими дугами; б – зі зваженими вершинами; в – зі зваженими вершинами і дугами.

Граф із зваженими вершинами – це граф, що описується трійкою $G=(X,A,V)$, де $X=\{x_i\}$, $i=1,2,\dots,n$ – безліч вершин графа; $A=\{a_i\}$, $i=1,2,\dots,m$ – безліч дуг графа; $V=\{v_i\}$, $i=1,2,\dots,n$ – безліч характеристик вершин. В якості характеристик вершин можуть виступати "вартість", "потужність", "вага" тощо. Приклад такого графу наведений на рис. 1.12,б. Для графу із зваженими вершинами у разі подання шляху послідовністю вершин вагою шляху є сума ваг вершин, що входять до цього шляху.

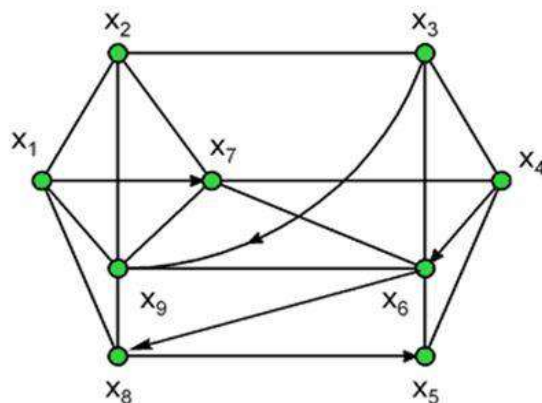
І нарешті, *зважений граф* визначається четвіркою виду $G=(X,A,V,C)$, тобто і дуги, і вершини цього графу мають деякі характеристики (рис. 1.12,в). Область застосування зважених графів як моделі досить широка: транспортні завдання, оптимізація мережі зв'язку і системи перевезень, завдання логістики тощо. Одним із відомих оптимізаційних завдань є знаходження найкоротших шляхів у графі зі зваженими дугами.

1.2.9. Алгоритм пошуку найкоротшого шляху.

Найбільш ефективний алгоритм пошуку найкоротших шляхів в графах був розроблений нідерландським вченим Едсгером Вібе Дейкстрою (нідерл. Edsger Wybe Dijkstra). Популярність Дейкстрі принесли його роботи в галузі застосування математичної логіки при розробці комп'ютерних програм. Він брав активну участь в розробці мов програмування і є одним з авторів

концепції структурного програмування і алгоритму знаходження найкоротшого шляху в орієнтованому графі з вагами ребер, відомий як *алгоритм Дейкстри*. Алгоритм будує таблицю усіх ваг ребер, розпочинаючи від початкового з'єднання і спершу визначаючи ребра з найменшою вагою. Далі виконується оцінка з'єднань, з якими пов'язані ці ребра, для визначення з'єднань з найменшою вагою. Якщо знаходиться об'їзна дорога з меншою сумарною вагою, ніж пряма дорога, то пряма дорога замінюється в таблиці. Цей процес продовжується, доки усі можливі шляхи між початковою та кінцевою точками не будуть оцінені. Із завершенням цього процесу визначається шлях з найменшою вагою між двома точками та обчислюється загальна вага витрат.

Розглянемо на прикладі порядок застосування алгоритму Дейкстри. На рисунку 1.13 наведені змішаний граф з дев'яти вершин і вагова матриця витрат ребер і дуг цього графа.



	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉
x ₁		10					3	6	12
x ₂	10		18				2		13
x ₃		18		25		20			7
x ₄			25		5	16	4		
x ₅				5		10			
x ₆			20		10		14	15	9
x ₇		2		4		14			24
x ₈	6				23				5
x ₉	12	13				9	24	5	

а)

б)

Рис. 1.13. а – граф; б – вагова матриця витрат.

Визначається початкова вершина бажаного маршруту. Вихідними умовами витрати переміщення до початкової вершини x_1 встановлюються рівними нулю, у той час як витрати переміщення до будь-якої з інших вершин встановлюються як нескінченність (рис. 1.14,а). На кожній ітерації алгоритму оновлюється обчислення витрат переміщення у кожен наступну вершину. На першому кроці для досягнення наступного набору вершин (x_2 , x_7 , x_8 і x_9) використовуються ребра і дуга, які зв'язані безпосередньо з

початковою вершиною x_1 . Витрати переміщення у ці вершини оновлюються на основі витрат переміщення кожним із ребер (рис. 1.14,б).

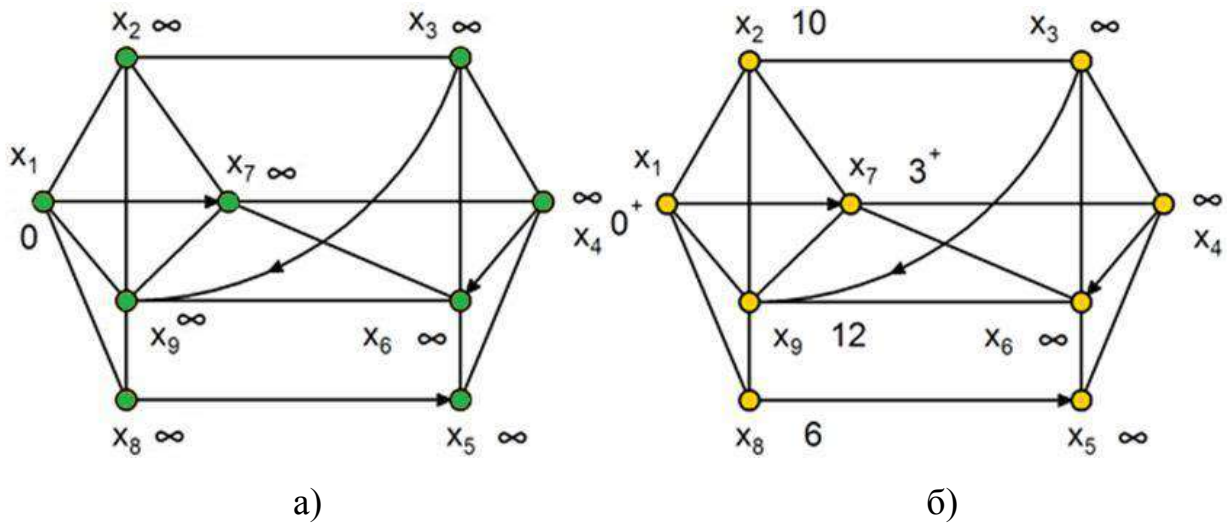


Рис. 1.14. а – початкові визначення алгоритму; б – результат першої ітерації.

На наступних кроках оцінюється переміщення ребрами, які зв'язані з розглянутими вершинами для досягнення наступного набору вершин. Витрати переміщення оновлюються для кожної вершини, для якої витрати були попередньо обчислені і зберігаються лише найнижчі витрати (позначка для вершини x_7 стає постійною і дорівнює 3). У наведеному прикладі зв'язані з вершиною x_7 ребра застосовуються для досягнення вершин x_2 , x_4 , x_6 , x_9 (рис.1.15,а). Витрати переміщення до вершини x_2 оновлюються до 5, а x_9 до 11, оскільки сумарне значення шляху від x_1 менше, ніж обчислене на попередньому кроці. І так далі. Найменша позначка на кожному кроці стає постійною. Після закінчення останньої ітерації (рис. 1.15,б) всі позначки стають постійними і показують витрати найкоротшого шляху від вершини x_1 .

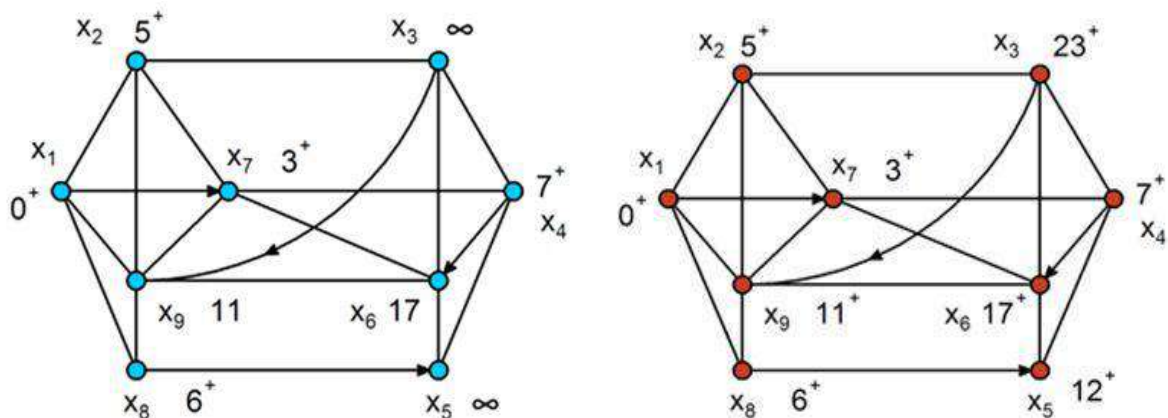


Рис. 1.15. а – результат другої ітерації; б – кінцевий результат.

1.3. Реалізація транспортно-логістичних моделей в середовищі геоінформаційної системи

1.3.1. Терміни, що застосовуються при геоінформаційному моделюванні мереж.

Мережа є системою взаємопов'язаних елементів, таких як ребра (дуги) та сполучні з'єднання (вершини), які представляють можливі маршрути від одного місця розташування до іншого.

Тут і далі будуть використані матеріали, що описують реалізацію транспортно-логістичних моделей в середовищі геоінформаційної системи ArcGIS за допомогою комп'ютерного модуля Network Analyst.

Поняття «мережа» в геоінформаційному моделюванні є аналогом математичного поняття «граф» і відрізняється від математичного визначення, що наведене вище, тим, що термін «вершини», наведений в теорії графів відповідає терміну «з'єднання» в геоінформаційному моделюванні. Мабуть вважається, що з'єднання мають більш широкий діапазон властивостей ніж вершини і в кінцевому підсумку визначають пропускну здатність геоінформаційної моделі.

Мережеві моделі поділяються дві категорії: інженерні мережі і транспортні мережі.

Інженерні мережі (Utility networks) використовуються для моделювання інженерних систем та річкових мереж. Такі мережі дозволяють переміщення вздовж ребер лише в один бік. В математиці такій моделі відповідає орієнтований граф, який складається з вершин і дуг.

Транспортні мережі (Transportation networks) використовуються для моделювання транспортно-логістичної інфраструктури. Прикладами таких мереж є вуличні, пішохідні або залізничні мережі. Такі мережі дозволяють переміщення ребрами в обох напрямках. В математиці такій моделі відповідає неорієнтований граф, який складається з вершин і ребер.

Існує дві форми представлення мережі в ГІС: *геометрична* і *логічна* мережа.

Геометрична мережа є моделлю набору просторових об'єктів, яка відображає місцеположення відповідних географічних елементів в реальному світі. Геометрична мережа містить пов'язану систему ребер і з'єднань. Ребро має два з'єднання, а з'єднання може поєднувати будь-яку кількість ребер. Просторові об'єкти, що представлені ребрами, можуть схрещуватись у двовимірному просторі не перетинаючись. Таку властивість геометричної мережі називають непланарністю. Просторові об'єкти, які складаються з ребер і з'єднань називаються *елементами* мережі.

Логічна мережа є суто мережевим графом і пов'язана з геометричною мережею. Логічна мережа також представляється сукупністю зв'язаних ребер та з'єднань. Ключовою відмінністю є те, що логічна мережа не має координатної прив'язки. Її основним призначенням є зберігання інформації щодо зв'язків в мережі разом з певними атрибутами. Оскільки ребра та з'єднання в логічній мережі не містять геометрії, то вони не є просторовими об'єктами. Основною функцією логічної мережі є формування поведінки просторових об'єктів, які входять до складу геометричної мережі. Логічна мережа не може існувати без геометричної, в той же час можливе існування геометричної мережі без логічної в тому випадку, коли немає необхідності формувати поведінку її елементів.

Мережевий аналіз підтримує розуміння та вирішення наступних проблем: визначення менш витратних мережевих шляхів між кількома вихідними точками та пунктами призначення; оптимальний розподіл зупинок та визначення найкоротшого шляху між зупинками, враховуючи обмеження, такі як часові вікна, ємність транспортних засобів, максимальний час поїздки; більш швидке реагування або більш зручне розташування пунктів обслуговування території відповідальності. Матриці витрат досягнення цілі, які створюються як частина мережевого аналізу, часто стають вхідними даними для виконання більш масштабного аналізу. Наприклад, при прогнозуванні поведінки транспортних потоків враховуються відстані, які людям доведеться подолати для досягнення певних об'єктів інтересу. Такі

мережеві відстані використовуються при обчисленні математичних виразів для прогнозування проходження маршруту.

1.3.2. Порядок створення мережі.

Перед тим, як виконати мережевий аналіз, потрібно створити набір даних, який моделює мережу. Розглянемо порядок створення моделі транспортної мережі. Набори мережевих даних геоінформаційної системи створюються з вихідних просторових об'єктів, які можуть складатися з простих об'єктів (ліній і точок) та поворотів, а також містять зв'язність вихідних об'єктів. Будь-який мережевий геоінформаційний аналіз відбувається на основі набору мережевих даних.

За допомогою набору мережевих даних можна змодельовати вуличну мережу, відображену на рисунку 1.16. На рисунку відображені можливості моделювання вулиць з одностороннім рухом, обмежень поворотів та естакад/тунелів. Аналіз цієї мережі, зокрема шлях від зупинки 1 до зупинки 2, виконується з урахуванням властивостей набору мережевих даних.



Рис. 1.16. Вулична мережа.

Щоб зрозуміти зв'язність та її значення, слід враховувати, що просторові об'єкти зазвичай не мають інформацією щодо існування один одного. Наприклад, якщо дві лінії перетинаються, жодна з ліній не містить

інформації стосовно іншої. Подібним чином точковий об'єкт на кінці лінії не містить жодної інформації про лінію. Однак, набір мережевих даних відстежує, які вихідні об'єкти співпадають. Він також має певну політику зв'язності для визначення, які співпадаючі об'єкти є дійсно пов'язаними. Завдяки цьому можна моделювати естакади і тунелі шляхом визначення відсутності зв'язку між дорогами. Таким чином, при виконанні мережевого аналізу механізми обчислення мають інформацію стосовно того, які шляхи мережею є доступними.

Можливі більш складні сценарії зв'язності, такі як *мультимодальні* транспортні мережі. Нижче наведено приклад транспортної мережі у центрі Парижа (рис. 1.17), яка відображає вуличну мережу і мережу метрополітену. Наведений приклад ілюструє найменш витратний шлях для пішохода, який може пересуватися вуличною мережею та мережею метрополітену.



Рис. 1.17. Мультимодальна транспортна мережа.

Набори мережевих даних складаються з елементів мережі. Елементи мережі створюються на основі вихідних просторових об'єктів. Геометрія вихідних просторових об'єктів допомагає встановити зв'язність. Окрім того, елементи мережі мають атрибути, які контролюють переміщення мережею. Існує три різновиди елементів мережі (рис. 1.18):

1) *ребра*: з'єднуються з іншими елементами (з'єднаннями) та є зв'язками, якими переміщуються агенти мережі;



Рис. 1.18. Елементи мережі.

2) *з'єднання*: з'єднують ребра та організовують переміщення між ребрами, також називаються “вузлами”;

3) *повороти*: зберігають інформацію, яка може впливати на переміщення між двома або більше ребрами.

Ребра та з'єднання формують базову структуру будь-якої мережі. Зв'язність у мережі стосується взаємодії ребер та з'єднань між собою. Повороти є необов'язковими елементами, які зберігають інформацію про зміну напрямку переміщення.

Кожен клас просторових об'єктів, який бере участь в мережі як вихідний, створює елементи на основі визначених ролей. Наприклад, клас лінійних об'єктів використовується як вихідний для елементів ребер, а клас точкових просторових об'єктів використовується для створення елементів з'єднань. Елементи поворотів створюються на основі класу просторових об'єктів поворотів. Створені елементи з'єднань, ребер та поворотів формують базову мережу.

Розглянемо приклад простої транспортної мережі та вихідних об'єктів, які беруть участь у її створенні. Ця мережа містить клас просторових об'єктів вулиць, який може бути застосований як вихідний для ребер, клас об'єктів вуличних перехресть, що виступають у ролі з'єднань, клас додаткових лінійних об'єктів у вигляді ребер (залізничні колії та автобусні маршрути) та

клас точкових просторових об'єктів, які використовуються як з'єднання (залізничні станції та автобусні зупинки).

З'єднання має існувати на кожному кінці ребра мережевого набору даних. Якщо не створити вихідний просторовий об'єкт з'єднання на кінці ребра, то системне з'єднання буде створене автоматично при побудові мережевого набору даних. Системні з'єднання зберігаються як точки у вихідному класі просторових об'єктів, який автоматично генерується при першій операції побудови мережевого набору даних.

При створенні мережевого набору даних, приймається рішення, які елементи ребер та з'єднань будуть створені з вихідних просторових об'єктів. Забезпечення коректного формування ребер та з'єднань є важливим для точних результатів мережевого аналізу. Зв'язність у наборі мережевих даних базується на геометричних відповідностях кінцевих точок поліліній, проміжних точок поліліній та застосуванні правил зв'язності, які були встановлені як властивості набору мережевих даних.

Геометрична мережа може включати будь-яку кількість класів просторових об'єктів. У наведеному нижче прикладі є один клас просторових об'єктів з'єднань – міста і два класи просторових об'єктів ребер, які зв'язують з'єднання – головні залізниці та маршрути вантажівок. На рисунку 1.19,а наведено геометричне представлення мережі, яке відображає дійсні координати елементів мережі.



Рис. 1.19. а – геометричне, б – логічне представлення мережі.

Логічне подання тієї ж самої мережі наведено на рис. 1.19,б. Воно організовує географічні просторові об'єкти в два ключові елементи: ребра і з'єднання. Всі міста є з'єднаннями, а маршрути вантажівок і основні залізниці – ребрами. Крім того, місто з назвою j2, має ідентифікатор елемента мережі 1 і у таблиці зв'язності можна побачити, як це місто пов'язане з іншими елементами. Це – з'єднання 1 в таблиці зв'язності і воно зв'язане з суміжними з'єднаннями – елементом j1 (ідентифікатор 0) через ребро r1 (ідентифікатор 10), елементом j3 (ідентифікатор 2) через ребро r2 (ідентифікатор 11) та елементом j4 (ідентифікатор 3) через ребро t1 (ідентифікатор 12).

Геометричний і логічний способи моделювання мережі є тільки різними поглядами на одну й ту ж саму мережу. Геометрична мережа містить інформацію щодо координат просторових об'єктів. Логічна мережа містить логічні зв'язки між цими просторовими об'єктами, які називаються елементами, оскільки в моделі не описуються їх геометричні властивості.

Таким чином, створення набору мережевих даних в програмному середовищі ГІС, починається з наявних класів просторових об'єктів з їх геометричними властивостями. Логічна версія мережі створюється на основі зв'язності просторових об'єктів та додаткових правил зв'язності.

До таких додаткових правил зв'язності можна віднести моделювання вертикального розташування елементів дорожньої мережі. Те, що дві дороги перетинаються на двовимірному їх зображенні, не означає, що можна проїхати з однієї на іншу у точці перетину. Це можуть бути естакади – коли одна дорога знаходиться над іншою (рис. 1.20).

Звичним способом моделювання зв'язності у подібному випадку є використання атрибутів, що описують логічне перевищення – не абсолютну висоту в метрах, а “рівень” у понятті мережі. У звичній вуличній мережі усі ребра та з'єднання мають однаковий рівень і вони усі зв'язуються один з одним, створюючи звичне перехрестя. З'єднання дозволяє проїхати з одного сегменту у будь-який інший.

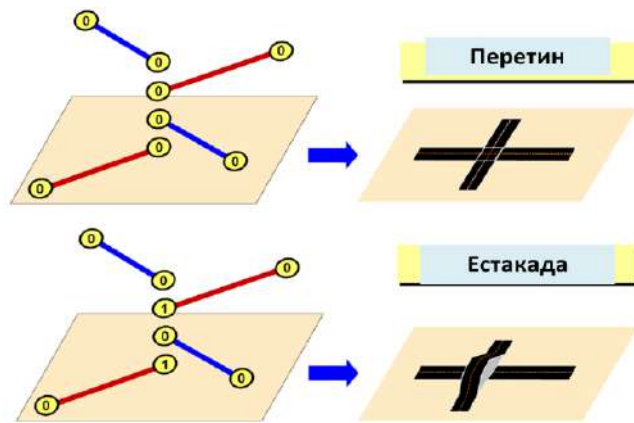


Рис. 1.20. Моделювання естакад.

У випадку естакад переїхати з одного ребра на інше можна тільки якщо вони мають однаковий рівень. Моделювати таку складну поведінку транспортних мереж можна через атрибути.

1.3.3. Атрибути мережі.

Атрибути мережі є властивостями елементів мережі, які контролюють прохідність мережі. Атрибутами можуть бути: час проходження заданої довжини шляху, для яких транспортних засобів і якими вулицями проїзд заборонений, обмеження швидкості, які вулиці мають односторонній рух тощо. Ребра можуть мати такі атрибути, як довжина, обмеження швидкості, час проїзду, обмеження одностороннього руху. З'єднання зазвичай не мають таких атрибутів, оскільки вони представлені як точки – однак, вони можуть містити інші атрибути для моделювання мережі. Повороти також можуть мати унікальні атрибути – наприклад, виконання лівого повороту може зайняти більше часу у порівнянні з правим поворотом.

Атрибути витрат використовуються для вимірювання та моделювання імпедансу (повного опору мережі), наприклад, час переміщення вулицею або обсяг сміття, яке збирається вздовж вулиці тощо. Ці атрибути пропорційно розподіляються вздовж довжини ребра: якщо час проходження ребра становить 3 хвилини, то проходження половини ребра займе 1,5 хвилини. Якщо ви шукаєте 1,5-хвилинний шлях вздовж цього ребра, то просторовий об'єкт маршруту складатиметься з першої половини просторового об'єкту ребра.

Мережевий аналіз зазвичай передбачає мінімізацію витрат (імпедансу) під час знаходження оптимального маршруту. Звичними прикладами є знаходження найшвидшого маршруту (мінімізація часу подорожі) або найкоротшого маршруту (мінімізація відстані). Час подорожі та відстань є атрибутами витрат набору мережевих даних.

Ознаки є атрибутами, які описують характеристики мережі або її елементів. На відміну від витрат ознаки не розподіляються. Це означає, що значення ознаки не залежить від довжини елемента ребра. Наприклад, кількість смуг є ознакою вуличної мережі. Іншим прикладом ознаки вуличної мережі є обмеження швидкості на вулицях. Хоча це не витратний атрибут і він не може бути використаний як імпеданс, однак він може бути використаний у поєднанні з відстанню для створення витратного атрибуту (наприклад, часу проїзду), який може бути застосований як імпеданс.

Для деяких елементів мережі можуть бути визначені *обмеження*. Обмеження визначаються таким чином, щоб у ході виконання аналізу проходження обмежених елементів було повністю заборонене, уникалося або, навпаки, йому віддавалася перевага. Найбільш звичним обмеженням є односторонній рух, який визначає, що певний елемент ребра може бути пройдений лише в одному напрямку. Іншим прикладом обмеження є обмеження за вагою. Транспортні засоби можуть проїжджати певний сегмент лише за умови, якщо вони не перевищують встановлений ліміт ваги.

Ієрархія – це рівень (ранг) елементів мережі. Вулична мережа може мати атрибут вихідних просторових об'єктів, який розбиває дороги на три (або більше) класи, наприклад, такі, як місцеві, другорядні та головні дороги. Можна використати цей атрибут вихідних просторових об'єктів для побудови атрибуту ієрархії набору мережевих даних. Після створення атрибуту ієрархії можна визначити, чи буде він використовуватись, чи ігноруватиметься при виконанні мережевого аналізу. Використання ієрархії дозволяє скоротити час на виконання аналізу великої мережі. Ієрархія також моделює, як в дійсності водії обирають прокладання маршруту швидкісними

та міжрегіональними дорогами, оскільки переміщення дорогами більш високого рангу є більш передбачуваним та простішим, ніж другорядними дорогами. Недоліком обчислень з використанням ієрархії є те, що вони не є точними. В деяких випадках можна більше мінімізувати час у дорозі або відстань в межах аналізу, ігноруючи ієрархію.

Виконання мережевого аналізу з використанням ієрархії застосовує евристичні методи, що зменшує час обчислень шляхом обмеження пошуку в основному на більш високих рівнях ієрархії. Наприклад, трирівнева ієрархія може містити наступні категорії:

- головні дороги (автомагістралі з вільним або обмеженим в'їздом);
- другорядні дороги (основні і магістральні дороги);
- місцеві дороги (відомчі дороги і місцеві вулиці).

За умов трирівневої ієрархії, місцеві дороги враховуються тільки в безпосередній близькості від початку і кінця маршруту, а на більшій відстані від початку і кінця маршруту враховуються лише другорядні дороги. Оскільки більша частина маршруту враховує тільки дороги більш високих категорій ієрархії, то це може призвести до результатів з більшими витратами, ніж без використання ієрархії (рис. 1.21).

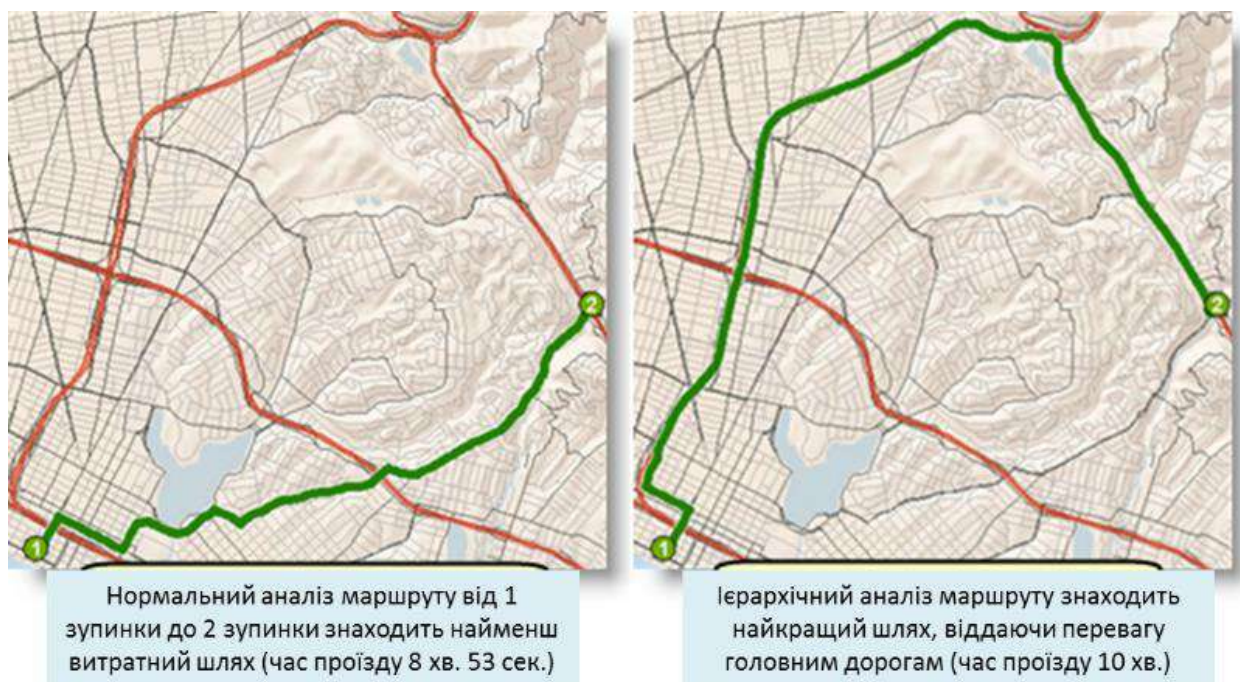


Рис. 1.21. Використання ієрархії при аналізі маршруту.

1.3.4. Повороти.

На відміну від ребер та з'єднань повороти не є обов'язковими елементами. Поворот моделює переміщення від одного елемента ребра до іншого. Часто повороти створюються для врахування витрат на їх виконання, або для їх повної заборони. Наприклад, просторовий об'єкт повороту, що відображає лівий поворот на перехресті, може мати витрати у 30 секунд для моделювання середнього часу перемикання зеленого кольору світлофору лівого повороту. Подібно до цього атрибут обмеження може бути використаний для заборони повороту взагалі. Таке обмеження використовується, коли поворот ліворуч визначається як заборонений. Повороти можуть створюватись на будь-якому з'єднанні, де зв'язуються ребра. Існує n^2 можливих поворотів у кожному з'єднанні мережі, де n – кількість ребер, що зв'язуються у цьому з'єднанні. Навіть у з'єднанні з одним ребром є можливість зробити один розворот.

На рисунку 1.22 відображається більш складний приклад, що поєднує інформацію поворотів з іншими елементами мережі. Він містить дозволи лівих та правих поворотів та можливості розворотів.

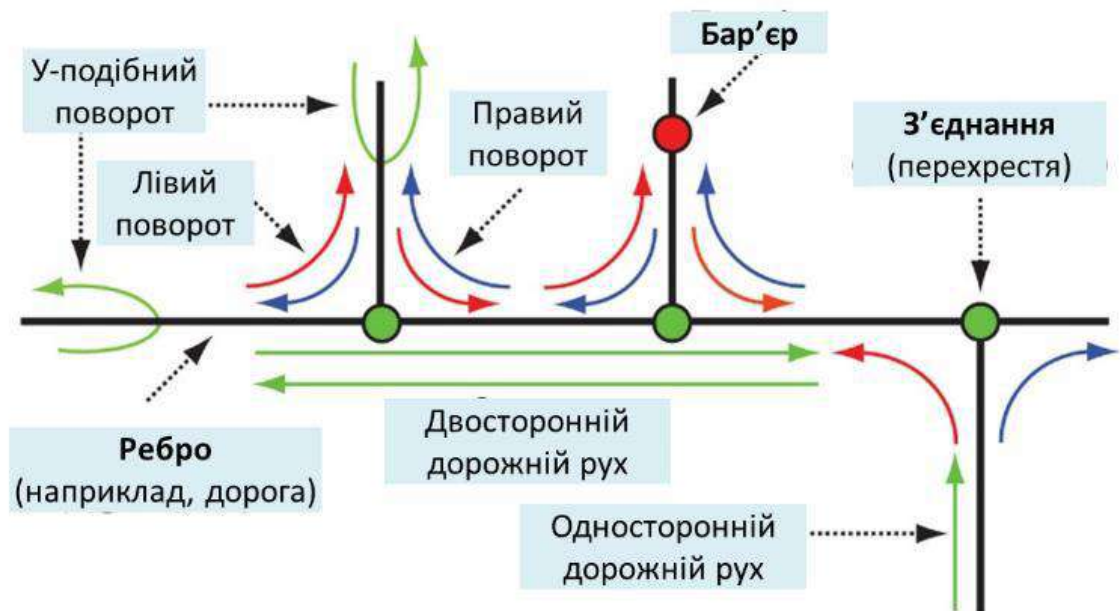


Рис. 1.22. Поєднання поворотів з іншими елементами мережі.

У поєднанні з інформацією щодо одностороннього руху та наявності можливих перешкод на рисунку наведена модель, що найбільш наближена до реальної транспортної мережі.

1.3.5. Мультимодальні мережі.

Можливі також і більш складні сценарії зв'язності, такі як мультимодальні транспортні мережі. Нижче наведено приклад типової транспортної мережі, яка відображає дороги, залізниці та пішохідні мережі (рис. 1.23).



Рис. 1.23. Мультимодальний набір мережевих даних.

Мультимодальна мережа вимагає визначення з'єднань, які слугують трансферними точками. Наприклад, можна пересісти з автодорожньої мережі на залізничну лише у визначених місцях. Мультимодальна мережа також вимагає унікальних атрибутів для кожної складової мережі. Наприклад, середня швидкість переміщення пішки буде значно відрізнятися від середньої швидкості переміщення залізницею або автотранспортом.

1.3.6. Типові мережеві задачі.

Мережевий аналіз дозволяє вирішувати наступний набір задач: визначення оптимального шляху, знаходження найближчого автомобіля швидкого реагування або відповідного просторового об'єкту, визначення території обслуговування навколо певного місця розташування, обслуговування набору замовлень з використанням парку транспортних засобів, вибір умов розташування об'єктів транспортної інфраструктури.

Визначення оптимального шляху. Мережевий аналіз дозволяє знаходити найкращий спосіб дістатися з одного місцеположення в інше, або відвідати кілька місць, що називають оптимальним маршрутом або найкоротшим шляхом. Якщо потрібно відвідати більше, ніж дві зупинки, то найкращий шлях може бути визначений для визначеного користувачем порядку зупинок. Або мережевий аналіз може визначити найкращий порядок відвідування зупинок, що називають вирішенням задачі комівояжера.

Залежно від вибору імпедансу, найкращий шлях може бути найшвидшим, найкоротшим, або найвидовищним. Отже, найкращий шлях можна визначити, як шлях з найменшим імпедансом, де імпеданс обирається користувачем і є будь-яким діючим витратним атрибутом мережі.

У наведеному нижче прикладі в першому випадку як імпеданс використовується час (рис. 1.24,а).

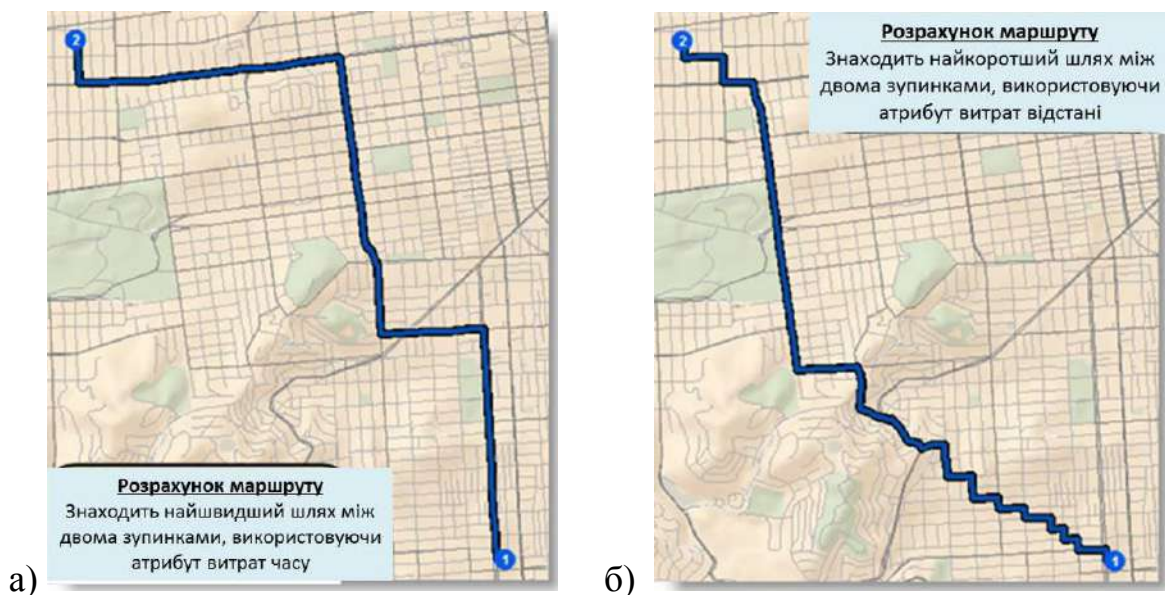


Рис. 1.24. Обчислення маршруту для витрат: а – часу; б – відстані.

Найшвидший шлях відображений синім кольором і має загальну довжину 4,5 милі, переміщення яким займає 8 хвилин. У наступному випадку імпедансом обрано відстань. Відповідно, довжина найкоротшого шляху становить 4,4 милі, переміщення яким займе 9 хвилин (рис. 1.24,б). Обидва рішення мають сенс – вибір одного з них залежить від конкретного сценарію.

Для визначення найкоротшого шляху мережею між двома або більше точками існує декілька алгоритмів. Найбільш вживаним алгоритмом є алгоритм Дейкстри, який детально був розглянутий раніше.

Найближчий пункт обслуговування. Знаходження найближчої лікарні до місця аварії, найближчих поліцейських авто до місця злочину та найближчого магазину до адреси замовника є прикладами задач пошуку розміщення найближчого пункту обслуговування (рис. 1.25).



Рис. 1.25. Пошук розміщення найближчого пункту обслуговування.

Шукаючи найближчий пункт обслуговування, можна задати, скільки їх потрібно знайти та в якому напрямку потрібно рухатися – до них або від них. Коли найближчі пункти знайдені, можна відобразити найкращий маршрут до них або від них, обчислити витрати переміщення для кожного із маршрутів та відобразити маршрутні листи до кожного з пунктів. Окрім того, можна визначити поріг імпедансу, за яким інструмент мережевого аналізу вже не повинен шукати пункти. Наприклад, можна налаштувати задачу пошуку

найближчого пункту обслуговування для знаходження лікарень на відстані 15 хвилин їзди від місця аварії. Будь-які лікарні, шлях до яких займе понад 15 хвилин, не будуть включені до результатів пошуку. Лікарні розглядаються як пункти обслуговування, а аварії розглядаються як інциденти (місця події). Мережевий аналіз дозволяє виконувати одночасно аналіз кількох найближчих пунктів обслуговування. Це означає, що можна мати кілька інцидентів і знайти найближчий пункт або декілька пунктів обслуговування для кожного інциденту.

Зони обслуговування. Мережевий аналіз дозволяє визначити зони обслуговування навколо будь-якого місця в мережі. Зона обслуговування мережі являє собою область, яка вміщує всі доступні вулиці, тобто вулиці, які лежать в межах заданого імпедансу. Наприклад, 10-хвилинна зона обслуговування для відповідного пункту вміщує всі вулиці, які знаходяться в межах 10-хвилинної доступності від цього пункту (рис. 1.26,а).



а)



б)

Рис. 1.26. Зони обслуговування: а – одинична, б – множинна.

Доступність визначає, як легко можна досягти визначеного місця. В мережевому аналізі доступність може бути виміряна з точки зору часу переміщення, відстані, або будь-якого іншого імпедансу в мережі. Множинні концентричні зони обслуговування відображають, як змінюється доступність зі зростанням імпедансу. Вони можуть бути використані, наприклад, для відображення кількості лікарень, що знаходяться на відстані 5-, 10- та 15-хвилинної поїздки від шкіл (рис. 1.26,б).

Матриця витрат Джерело-Призначення (OD Cost Matrix). Мережевий аналіз дозволяє створювати матрицю витрат Джерело-Призначення (origin-destination cost matrix) з багатьма початковими точками (джерелами) та багатьма кінцевими точками (призначеннями). Матриця витрат Джерело-Призначення є таблицею, яка містить мережевий імпеданс від кожного з джерел до кожного призначення. Окрім того, матриця ранжує точки призначення, з якими зв'язане кожне з джерел у порядку зростання мінімального мережевого імпедансу, необхідного для переміщення від заданого джерела до пункту призначення.

Для кожної пари початкової та кінцевої точок визначається найкращий шлях мережею, а витрати зберігаються в таблиці атрибутів вихідних (результуючих) ліній. Незважаючи на те, що на малюнку лінії є прямими, вони завжди зберігають мережеві витрати, а не відстань по прямій лінії. На рисунку 1.27 відображені результати матриці витрат Джерело-Призначення, яка була створена для знаходження витрат при досягненні чотирьох найближчих пунктів призначення від кожного джерела.

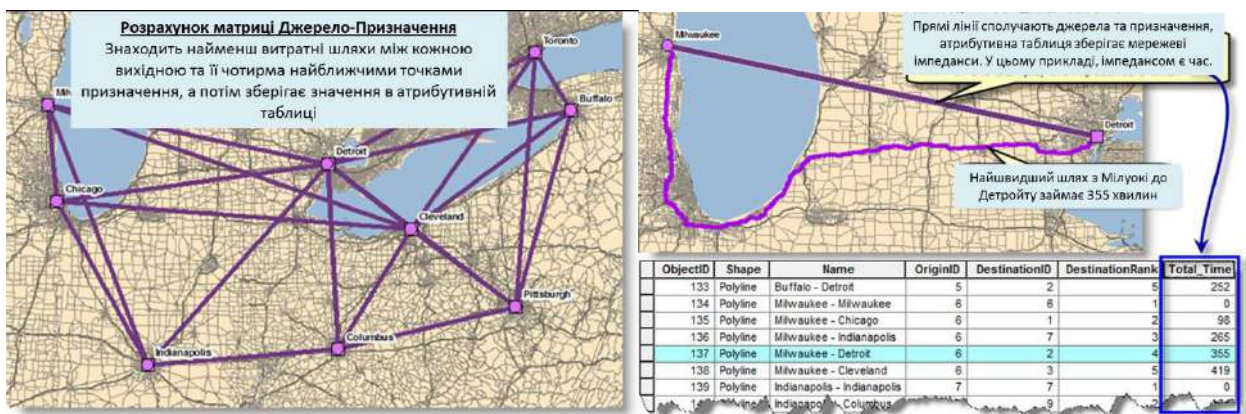


Рис. 1.27. Матриця витрат Джерело-Призначення.

Символи для прямих ліній можуть відрізнятися, наприклад, кольорами, відображаючи точку джерела, або товщиною, відображаючи час переміщення кожним із шляхів.

Задача вибору маршруту транспортного засобу. Мережевий аналіз забезпечує механізм вибору маршруту транспортного засобу, який може застосовуватися для вирішення складних завдань управління автопарком.

Одним з таких рішень є оптимальне визначення групи клієнтів для парку транспортних засобів та встановлення графіку їх відвідування. Метою вирішення подібних задач є врахування часових вікон при зберіганні загальних експлуатаційних та інвестиційних витрат для кожного маршруту якомога нижчими. Обмеження визначають проходження маршруту з урахуванням наявних ресурсів і в межах часових рамок, які визначаються робочими змінами водіїв, швидкостями руху, а також зобов'язаннями перед клієнтами.

Розглянемо приклад доставки товарів до продуктових магазинів з центрального складу. На складі наявний автопарк з трьох вантажівок. Склад працює тільки в межах певного часового вікна – з 8:00 до 17:00, протягом якого всі вантажівки повинні повернутися на склад. Кожна вантажівка має вантажопідйомність 6000 кг, що встановлює обмеження обсягу товарів, які вона може перевозити. Кожен магазин має попит на певну кількість товарів (в кг), що має бути доставлена, і кожен магазин має часові вікна, які обмежують час доставки. Крім того, водій може працювати тільки вісім годин на добу, має зробити перерву на обід, і йому оплачується час, витрачений на водіння та обслуговування магазинів. Мета полягає в тому, щоб продумати маршрут для кожного водія таким чином, щоб поставки могли бути зроблені з урахуванням всіх вимог обслуговування, а також треба мінімізувати час, що витрачається водієм на конкретний маршрут. На рисунку 1.28 відображено три маршрути, що отримані шляхом вирішення вищевказаної задачі вибору маршруту транспортного засобу.

Метод вибору маршруту транспортного засобу широко застосовується в сфері логістики, і більшість великих компаній, що беруть участь у розподілі товарів з використанням автопарку, використовують ту чи іншу форму аналізу вибору маршруту транспортного засобу.



Рис. 1.28. Задача вибору маршруту транспортного засобу.

Розміщення-розподілення. Розміщення-розподілення допомагає вибрати, з якими пунктами обслуговування з робочого набору об'єктів треба працювати на основі їх потенційної взаємодії з пунктами попиту. Це може допомогти відповісти на наступні питання:

Яке місце для нової пожежної станції буде забезпечувати найкращий час реагування для громади, враховуючи наявний набір пожежних станцій?

Якщо роздрібна компанія має бути скорочена, то які магазини слід зачинити, щоб зберегти найбільш повний попит?

Де слід побудувати фабрику, щоб мінімізувати відстань до складів готової продукції?

У цих прикладах пункти обслуговування представлені пожежними станціями, магазинами роздрібною торгівлі та фабриками, а пункти попиту представлені будинками, споживачами та складами готової продукції.

Метою обчислень може бути мінімізація загальної відстані між пунктами попиту та пунктами обслуговування, максимальне збільшення охоплення пунктів попиту в межах певної відстані від пунктів обслуговування, збільшення виділеного обсягу попиту, що зменшується з

віддаленням від об'єкта, або збільшення обсягу попиту, доступного в зоні розміщення пунктів обслуговування, які співробітничать або конкурують.

На рисунку 1.29 відображено результати аналізу розміщення-розподілення, що визначає, які пожежні станції є зайвими. Для вирішення задачі була використана наступна інформація: кількість пожежних станцій (пунктів обслуговування), серединні точки вулиць (пункти попиту) і максимально допустимий час реагування. Час реагування – це час, потрібний пожежним для досягнення заданого місця розташування. Механізм обчислення розміщення-розподілення визначив, що відділ пожежної охорони може закрити кілька пожежних станцій і все одно збереже трихвилинний час реагування.



Рис. 1.29. Результати аналізу розміщення-розподілення пожежних станцій.

З наявного набору пожежних станцій дев'ять станцій можуть бути закриті, а сім станцій, що залишаться, вистачить для реагування на виклики у межах трьох хвилин.

Аналіз, залежний від часу. Дані трафіку надають інформацію про те, як допустима швидкість руху на конкретних ділянках дороги змінюється на протязі доби (рис. 1.30). Це важливо для мережевого аналізу, тому що трафік впливає на час поїздки, що в свою чергу впливає на її результат. Якщо планується маршрут з одного місця в інше і не враховується трафік, то очікуваний час поїздки та час прибуття може бути далеким від

прогнозованого. Тому, можна застосувати можливості вибору маршруту, які дозволять зекономити час, уникнувши більш перевантажених і повільніших доріг.

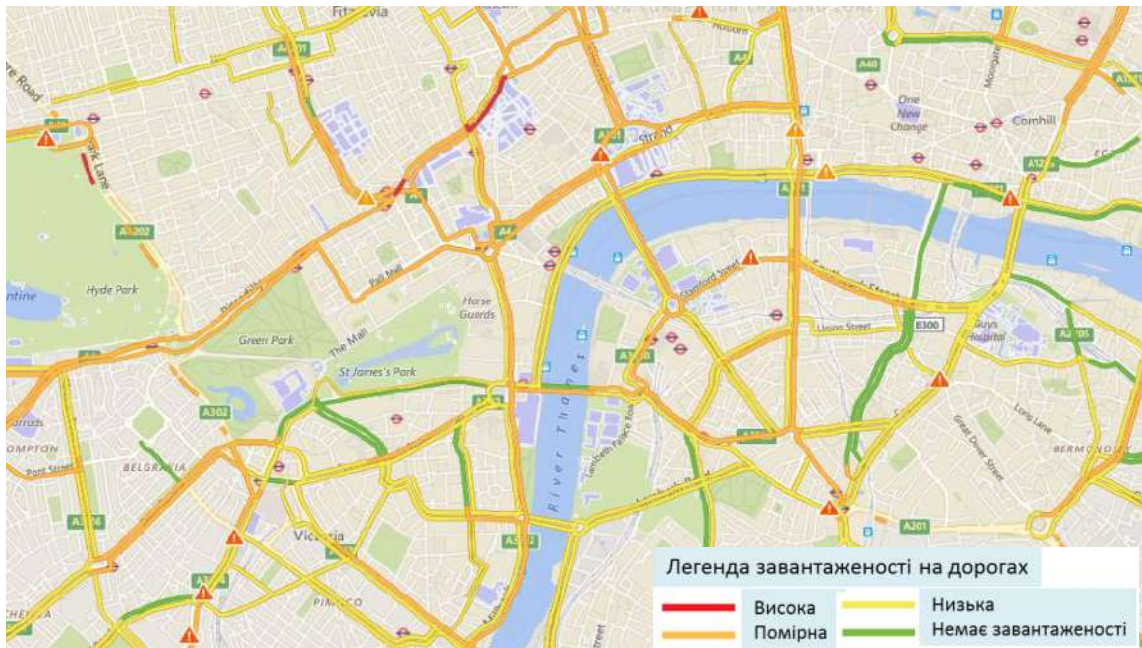


Рис. 1.30. Зображення даних дорожнього трафіку.

При мережевому аналізі можна зберігати швидкості руху в наборі мережевих даних з використанням двох різних моделей: *ретроспективного* і *поточного* трафіку. Це дозволяє відображати рух на карті і виконувати мережевий аналіз, застосовуючи поточні або типові швидкості руху.

РОЗДІЛ 2. ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЇ.

2.1. Аналіз придатності території – основа планування і управління її розвитком.

Моделювання придатності складається з кількох базових кроків. Воно розпочинається з визначення задачі, яку потрібно вирішити. Це дозволяє визначити критерії та здійснити керівництво розробленням моделі. Типові формулювання задач можуть виглядати наступним чином:

“Знайти в межах міста земельні ділянки, придатні для будівництва початкової школи”.

“Визначити місцеположення, які представляють придатні місця проживання для видів, що знаходяться під загрозою вимирання”.

Знаходження придатних місцеположень, зазвичай, є частиною більших завдань. Наприклад, у випадку розроблення стратегій охорони видів, що знаходяться під загрозою вимирання, знаходження придатних середовищ проживання є лише одним з аспектів цього більшого завдання.

Наступним кроком є встановлення критеріїв, які визначають найбільш придатні місцеположення. Це є центром моделі, оскільки слід дуже конкретно сформулювати, що мається на увазі під поняттям “придатний”. Наприклад, якщо мета полягає у знаходженні найкращих ділянок для нового будівництва, то треба використовувати такі критерії, як ухил, ґрунтовий покрив, відстань до комунікацій тощо. Для кожного критерію треба точно сформулювати, що означає більш або менш придатний, наприклад, перевага віддається ухилам меншим за 5 градусів.

Кожен з цих критеріїв надалі має бути представлений на карті. У випадку критерію ухилу слід буде розпочати з моделі рельєфу та створити карту ухилів. Використовуючи ухили, можна встановити, які ділянки є більш або менш придатними, наприклад, карта показуватиме ділянки з ухилами менше 5 градусів та понад 5 градусів.

Зрештою, карти окремих критеріїв мають бути поєднані змістовним чином. Наприклад, поєднання карт, що відображають ухили менше 5 градусів та території в межах 2 км від наявних головних доріг.

Кожен з цих кроків передбачає прийняття продуманих рішень.

Планування і управління розвитком територій це – досить складний технологічний процес, який вміщує багато аналітичних і прогнозних процедур, метою яких є створення моделей взаємодії просторових об'єктів, що формують основу для підтримки прийняття управлінських рішень.

Взаємодія просторових об'єктів може бути змодельована розподілом функції їх впливу в просторі. Проекція функції впливу на площину може слугувати основою створення моделі. Набір таких проекцій в вигляді растрів для кожного об'єкта сцени, що розглядається, обробляється комплексним алгоритмом і формується результуючий растр, у якого кожний елемент визначає сумарний вплив всіх об'єктів сцени в заданій точці простору. Процес формування функції впливу формалізується за допомогою математичної теорії нечітких множин.

2.2. Основи теорії нечітких множин.

Математична теорія нечітких множин (fuzzy sets) і нечітка логіка (fuzzy logic) є узагальненнями класичної теорії множин і класичної формальної логіки. Основною причиною появи нової теорії стала наявність нечітких і наближених міркувань при описі людиною процесів, систем, об'єктів.

Підхід до формалізації поняття нечіткої множини полягає в узагальненні поняття належності. У звичайній теорії множини існує декілька способів завдання множини. Одним з них є завдання за допомогою характеристичної функції, яка визначається наступним чином. Припустимо U - так звана універсальна множина, з елементів якої утворена множина, що розглядається в даному класі завдань, наприклад множина всіх цілих чисел, множина всіх гладких функцій тощо. Характеристична функція множини $A \in U$ – це функція μ_A , значення якої вказують, чи $x \in U$ є елементом множини A :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \in A, \\ 0, & \text{якщо } x \notin A. \end{cases}$$

Особливістю цієї функції є бінарний характер її значень.

З точки зору характеристичної функції, нечітка множина є природне узагальнення звичайної множини, коли ми відмовляємося від бінарного характеру цієї функції і передбачаємо, що вона може набувати будь-яких значень на відрізку $[0, 1]$. У теорії нечіткої множини характеристична функція називається *функцією належності*, а її значення $\mu_A(x)$ - мірою належності елемента x нечіткій множині A .

Тобто, нечіткою множиною A називається сукупність пар

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \mid x \in U \},$$

де μ_A - функція належності, тобто $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$.

Наприклад:

$$U = \{a, b, c, d, e\},$$

$$A = \{ \langle a, 0 \rangle, \langle b, 0,1 \rangle, \langle c, 0,5 \rangle, \langle d, 0,9 \rangle, \langle e, 1 \rangle \}.$$

Можна сказати, що елемент a не належить множині A , елемент b належить їй в малий мірі, елемент c більш менш належить, елемент d належить в значній мірі, e є елементом множини A .

Приклад. Припустимо U є множина дійсних чисел. Нечітка множина A , що позначає множину чисел, близьких до 10 (рис.2.1), можна задати наступною функцією належності: $\mu_A(x) = (1+|x|^m)^{-1}$, де $m \in \mathbb{N}$.

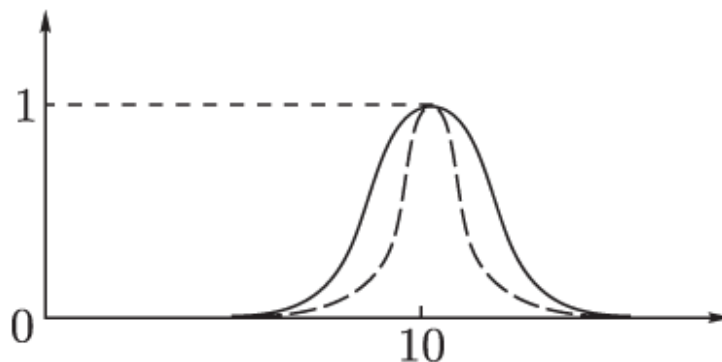


Рис. 2.1. Функція належності для чисел близьких до 10.

Показник міри m вибирається залежно від міри близькості до 10. Наприклад, для опису множини чисел, дуже близьких до 10, можна покласти $m = 4$; для множини чисел, не дуже далеких від 10, $m = 1$.

Коротко зупинимось на понятті лінгвістичної змінної. Лінгвістичну змінну можна визначити як змінну, значеннями якої є не числа, а слова або пропозиції природної (або формальної) мови. Наприклад, лінгвістична змінна "вік" може набувати наступних значень: "дуже молодий", "молодий", "середнього віку", "старий", "дуже старий" та ін. Ясно, що змінна "вік" буде звичайною змінною, якщо її значення - точні числа. Лінгвістичною вона стає, будучи використаною в нечітких міркуваннях людини.

Кожному значенню лінгвістичної змінної відповідає певна нечітка множина зі своєю функцією належності. Так, лінгвістичному значенню "молодий" може відповідати функція належності, яка подана на рис.2.2.

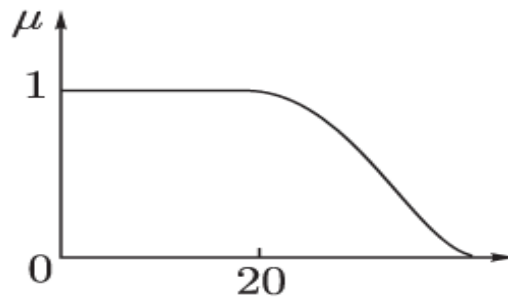


Рис. 2.2. Функція належності, що відповідає лінгвістичному значенню "молодий"

Над нечіткою множиною можна робити різні операції, при цьому необхідно визначити їх так, щоб в окремому випадку, коли множина є чіткою, операції переходили в звичайні операції теорії множин, тобто операції над нечіткою множиною повинні узагальнювати відповідні операції над звичайною множиною. При цьому узагальнення може бути реалізоване різними способами, через що якій-небудь операції над звичайною множиною може відповідати декілька операцій в теорії нечіткої множини.

Для визначення перетину і об'єднання нечіткої множини найбільшою популярністю користуються наступні три групи операцій:

Максимальні та мінімальні:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}.$$

Алгебраїчні:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x), \quad \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x).$$

Обмежені:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \min\{\mu_A(x) + \mu_B(x), 1\},$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \max\{\mu_A(x) + \mu_B(x) - 1, 0\}.$$

Доповнення нечіткої множини у всіх трьох випадках визначається однакою:

$$1 - \mu_A(x).$$

Приклад. Припустимо A – нечітка множина "від 5 до 8" (рис. 2.3, а), а B – нечітка множина "близько 4" (рис. 2.3, б), задані своїми функціями належності:

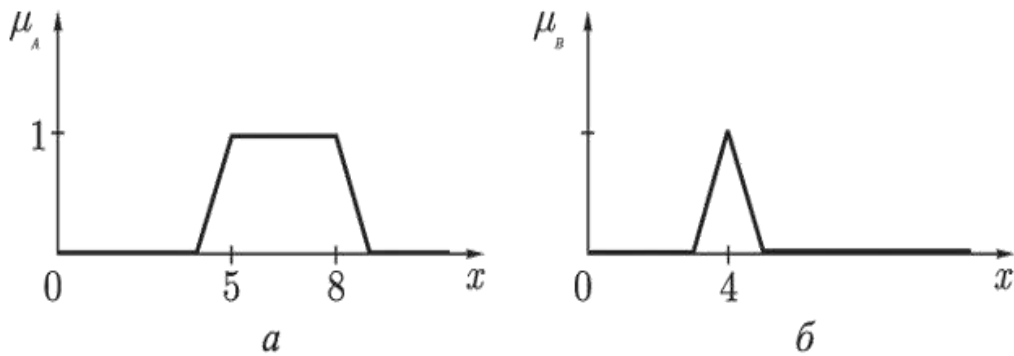


Рис. 2.3. Тестова нечітка множина.

Тоді, використовуючи мінімаксні операції, ми отримаємо множину, наведену на рис.2.4.

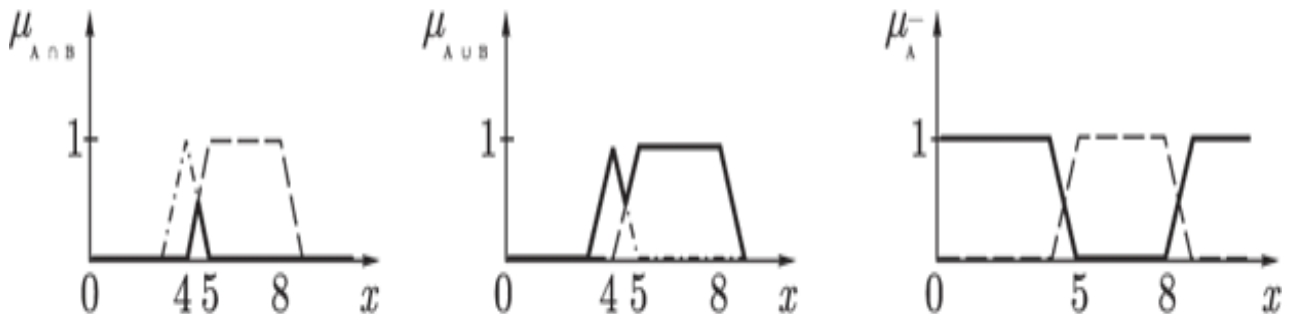


Рис. 2.4. Результат мінімаксних операцій.

Розглянемо деякі властивості і визначення, що відповідають поняттю нечіткої множини. Носієм нечіткої множини A називається чітка множина $\bar{A}$

таких точок в універсамі U , для яких величина $\mu_A(x)$ позитивна, тобто $\bar{A} = \{x \mid \mu_A(x) > 0\}$. Висотою нечіткої множини A називається величина $\sup \mu_A(x)$.

Нечітка множина A називається нормальною, якщо $\sup \mu_A(x) = 1$. Інакше вона називається субнормальною.

Нечітка множина називається порожньою, якщо $\forall x \in U \quad (\mu_A(x) = 0)$. Вочевидь, що в даному універсумі U існує єдина порожня нечітка множина. Непорожню субнормальну нечітку множину можна привести до нормальної (нормалізувати) за формулою:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \frac{\mu_A(x)}{\sup \mu_A(x)}$$

α -зрізом нечіткої множини A називається чітка підмножина універсальної множини U , яка визначена за формулою

$$A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0,1].$$

Множина строгого рівня визначається у вигляді $A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) > \alpha\}$. Зокрема, носієм нечіткої множини є множина елементів, для яких $\mu_A(x) > 0$. Точка переходу нечіткої множини A – це такий елемент $x \in U$, для якого $\mu_A(x) = 0,5$.

Чітка множина A^* , найближча до нечіткої множини A , визначається наступним чином:

$$\mu_{A^*}(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \mu_A(x) < 0,5; \\ 1, & \text{якщо } \mu_A(x) > 0,5; \\ 0 \text{ або } 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Нечітка множина A в просторі $U = R^n$ називається випуклою нечіткою множиною тоді і лише тоді, якщо її функція належності випукла, тобто для кожної пари точок x і y з U функція належності задовольняє рівнянню $\mu_A(\lambda x + (1-\lambda)y) \geq \min\{\mu_A(x), \mu_A(y)\}$, для будь-якого $\lambda \in [0,1]$.

Принцип узагальнення як одна з основних ідей теорії нечіткої множини носить евристичний характер і дозволяє розширити область визначення вихідного відображення φ на клас нечіткої множини. Припустимо $\varphi: U \rightarrow V$ –

задане відображення, і A – нечітка множина, задана на універсамі U . Тоді образ нечіткої множини A при відображенні φ є нечітка множина B , задана в V з функцією належності

$$\mu_B(y) = \sup_{x \in \varphi^{-1}(y)} \mu_A(x) .$$

2.3. Геоінформаційне моделювання придатності.

2.3.1. Булеве моделювання придатності.

Моделювання придатності є просторово-аналітичною процедурою, що визначає найбільш придатні місцеположення на основі набору критеріїв. Існують два основні різновиди моделювання придатності залежно від того, як будуються та поєднуються критерії. Перший і найпростіший підхід називається *булевым*. Він передбачає для кожного критерію відображення на карті територій, які або відповідають критерію, або не відповідають йому. При булевому моделюванні придатності комбінація критеріїв формується шляхом накладання карт та визначення ділянок, де реалізовані усі критерії. Кінцевим результатом є карта, які відображає придатні та непридатні території.

Розглянемо приклад булевої моделі придатності. Сценарій прикладу включає моделювання місць проживання пуми. Придатне середовище проживання пуми визначається наступними характеристиками:

- ухили понад 20 градусів;
- лісовий покрив;
- відстань до 1 км від річки;
- відстань понад 1 км від автомагістралей.

Ці критерії відображають той факт, що пума віддає перевагу місцевостям з крутими схилами та хорошим рослинним покривом для полювання на здобич, а також, що більшість її здобичі знаходиться поруч з водою та на віддалі від антропогенних об'єктів.

Наступним кроком є створення булевої карти для кожного з критеріїв. Необхідні дані для цього сценарію включають абсолютні висоти, рослинний

покрив, річки та автомагістралі. На рисунку 2.5 відображена територія дослідження, включаючи відмітку рельєфу, річки (синім кольором) та автомагістралі (червоним кольором).

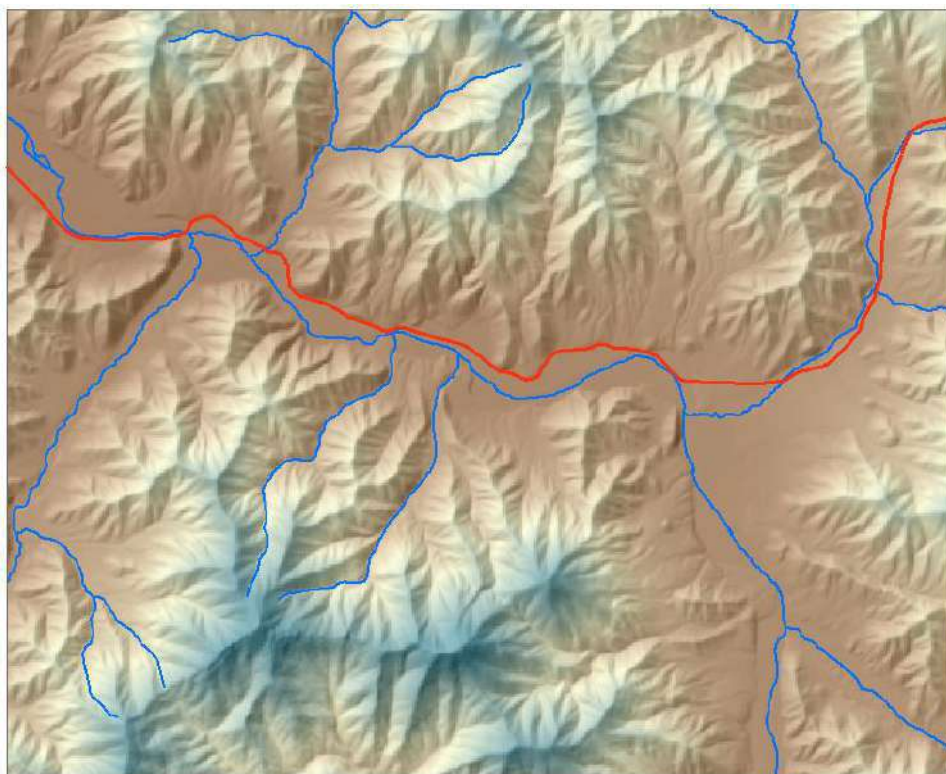


Рис. 2.5. Територія дослідження.

Розглянемо перший критерій: ухили понад 20 градусів. Це вимагає створення растру ухилів на основі растру абсолютних висот та виконання класифікації ухилів за категоріями придатності на основі цього критерію. Карта ухилів наведена на рисунку 2.6, де червоним кольором показані ділянки крутих ухилів, а зеленим – ділянки, які відображають рівнинні території. Надалі виконується перекласифікація неперервного растру ухилів на ділянки, які є придатними (так або 1) та не придатними (ні або 0), граничною величиною між цими двома категоріями є 20 градусів. Таким чином створюється перша булева карта критеріїв (рис. 2.7). Кольори булевої карти критеріїв довільні, однак у цьому прикладі придатні ділянки показані темнішим кольором, а не придатні – світлішим.

Логіка булевого моделювання придатності полягає у створенні подібної бінарної карти для кожного критерію.

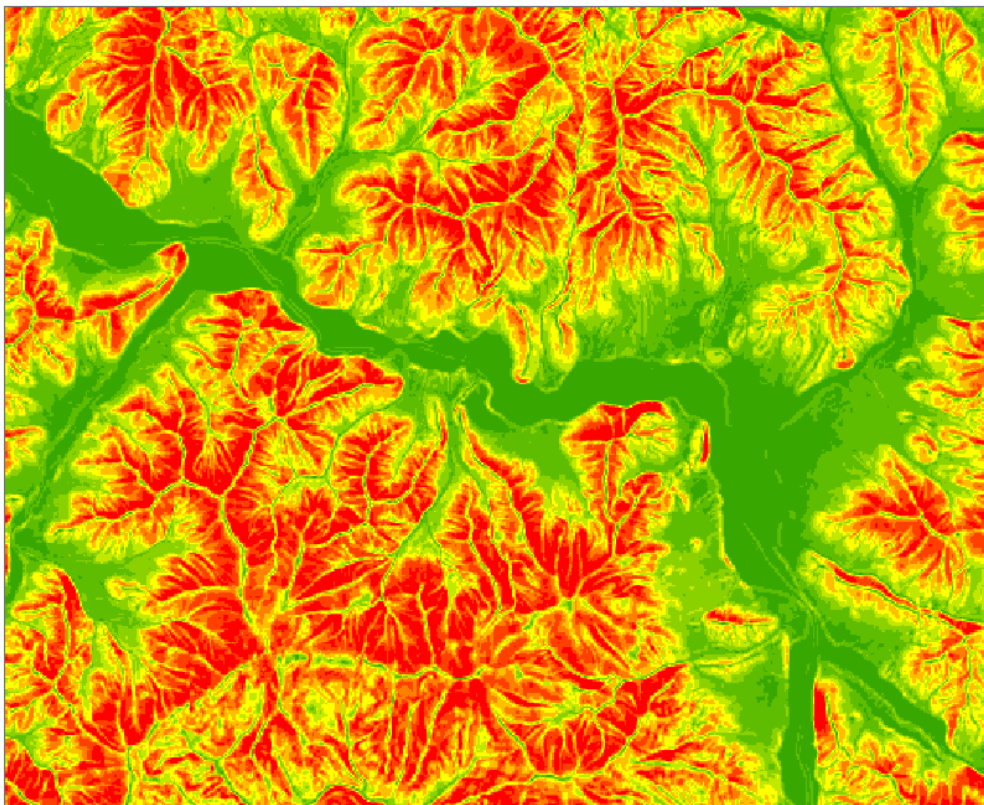


Рис. 2.6. Карта ухилів.

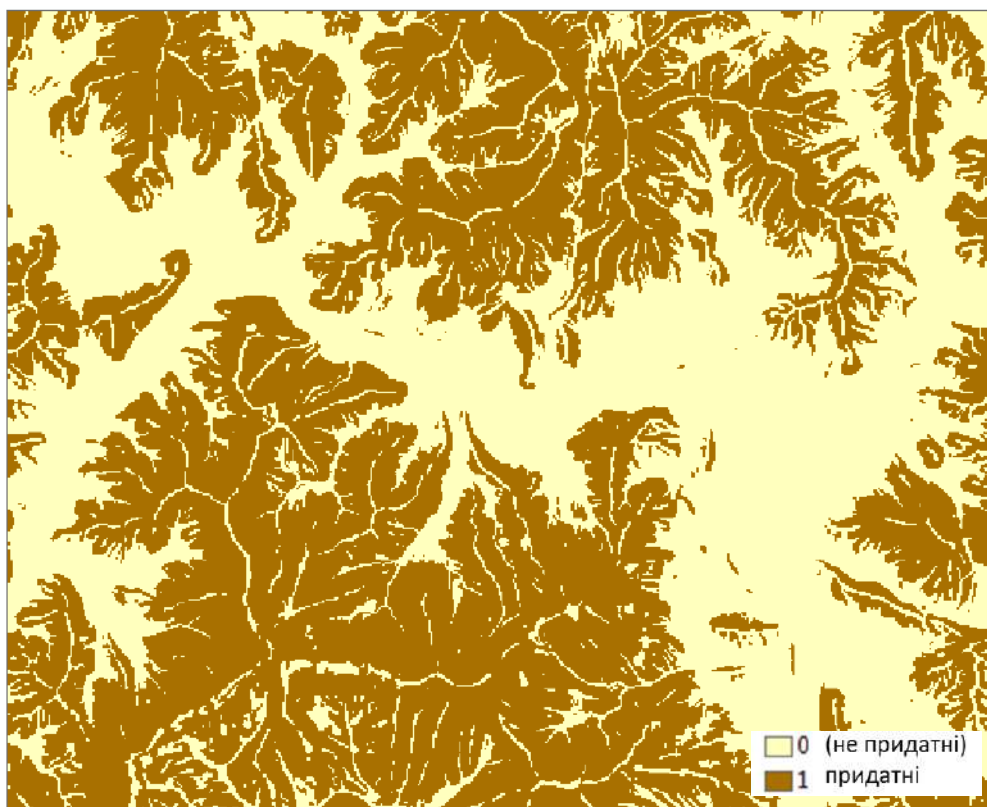


Рис. 2.7. Карта придатності за ухилом.

Другим критерієм є лісовий покрив. Це вимагає застосування растру землекористування для території дослідження, на якому червоним кольором

відображені урбанізовані території, жовтим та коричневим кольорами – сільськогосподарські території, бежевим – території вкриті трав'янистим покривом та чагарниками, а зеленим – лісові території (рис. 2.8).

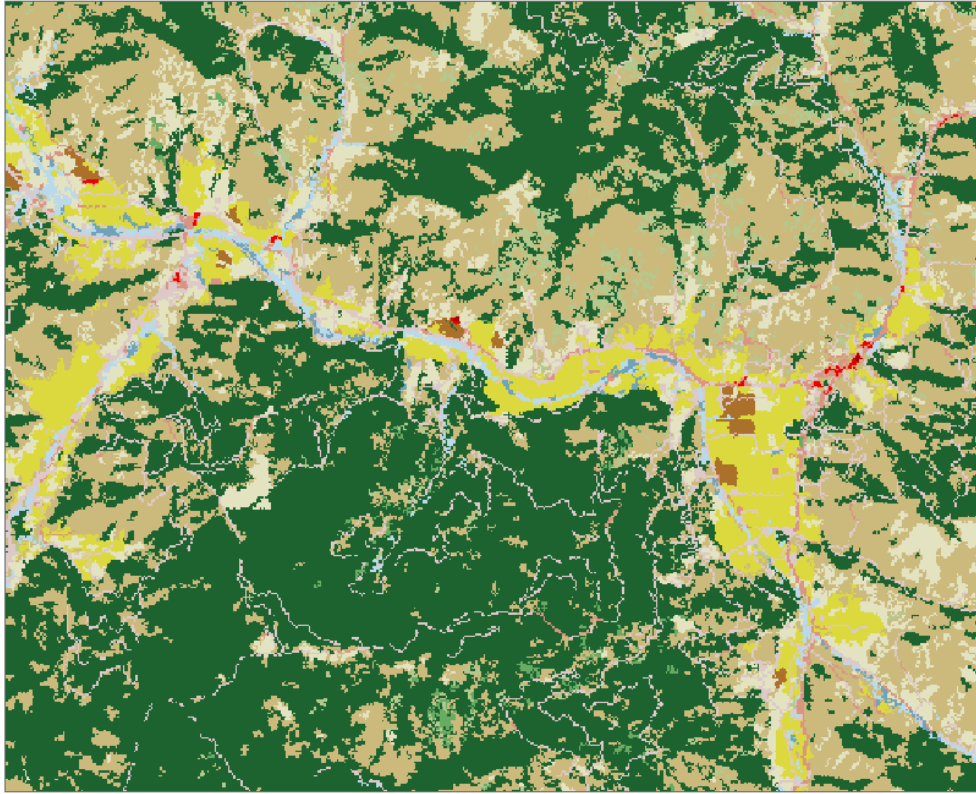


Рис. 2.8. Растр землекористування для території дослідження.

Надалі виконується перекласифікація растру землекористування на придатні (залісені) та непридатні (усі інші типи землекористування) території. Результат наведено на рисунку 2.9.

Третій критерій: відстань до 1 км від річки. Це вимагає створення растру відстаней до річок та його перекласифікацію на основі граничного значення відстані. На рис. 2.10 наведено растр відстаней від річок, які відображені синіми лініями, а значення відстаней відображені кольоровим градієнтом від нульової відстані (світлий) до кількох кілометрів (темний).

Надалі виконується перекласифікація растру відстаней на придатні (в межах 1 км) та непридатні (віддалені понад 1 км) території. Результат перекласифікації наведено на рис. 2.11.

Четвертий і останній критерій: відстань понад 1 км від автомагістралей.

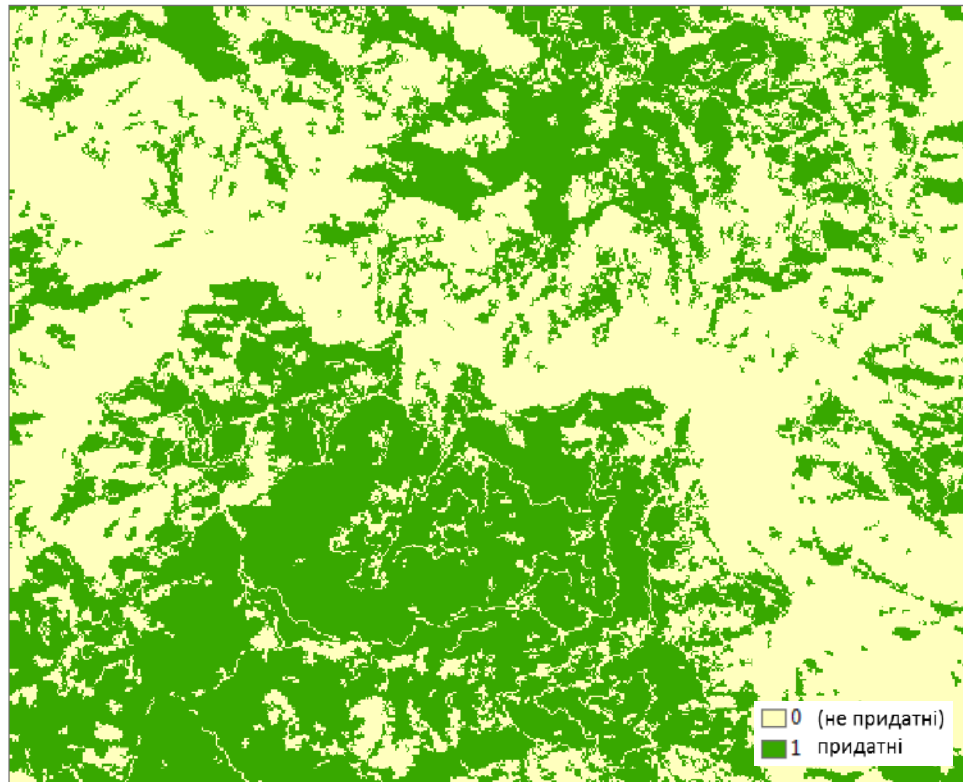


Рис. 2.9. Результат перекласифікації растру землекористування.

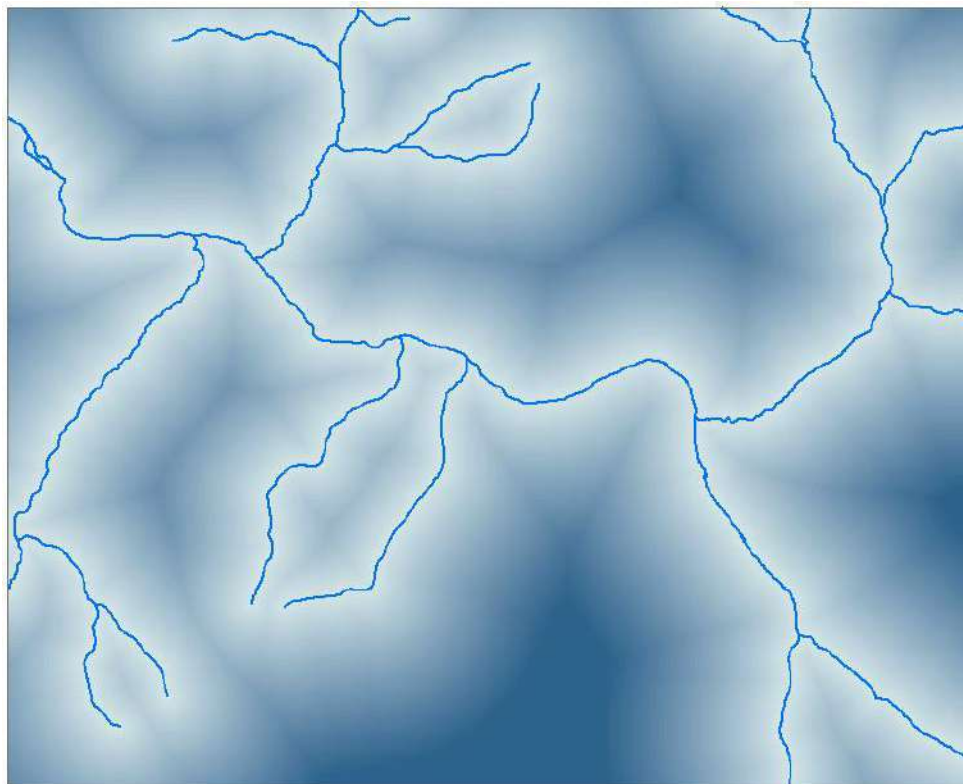


Рис. 2.10. Растр відстаней від річок.

Це вимагає побудови растру відстаней від автомагістралей та його перекласифікації на основі граничного значення відстані. На рис. 2.12 наведено растр відстаней від автомагістралей, що відображені червоними

лініями, та значеннями цих відстаней, які відображені кольоровим градієнтом від нульової відстані (світлий) до кількох кілометрів (темний).

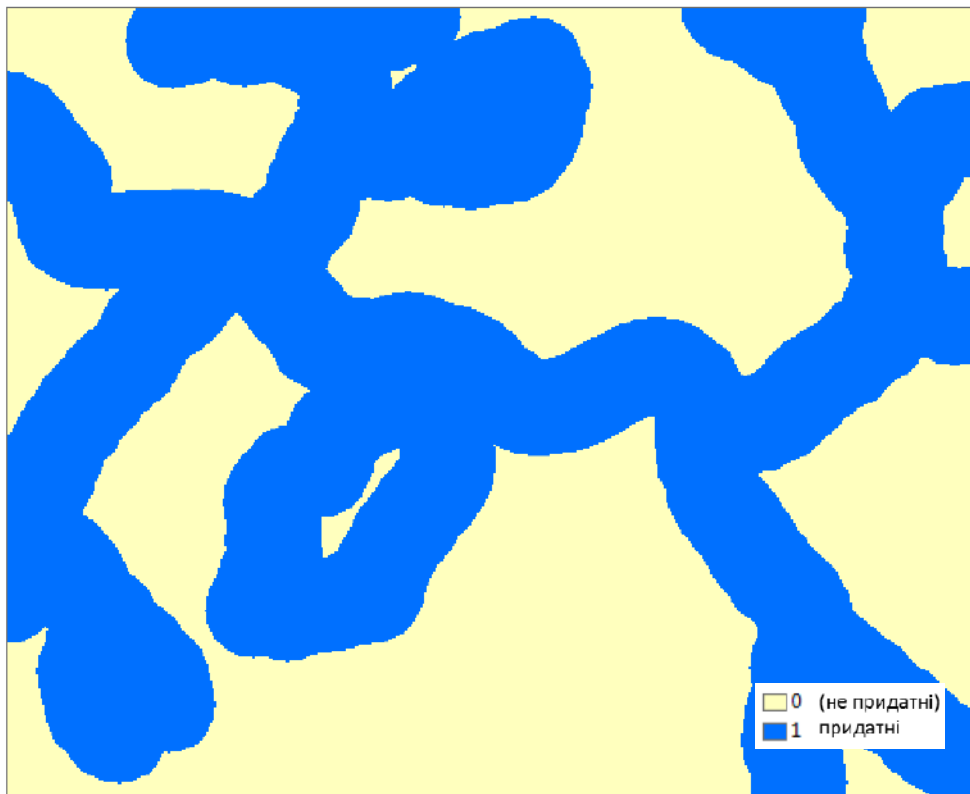


Рис. 2.11. Результат перекласифікації растру відстаней від річок.

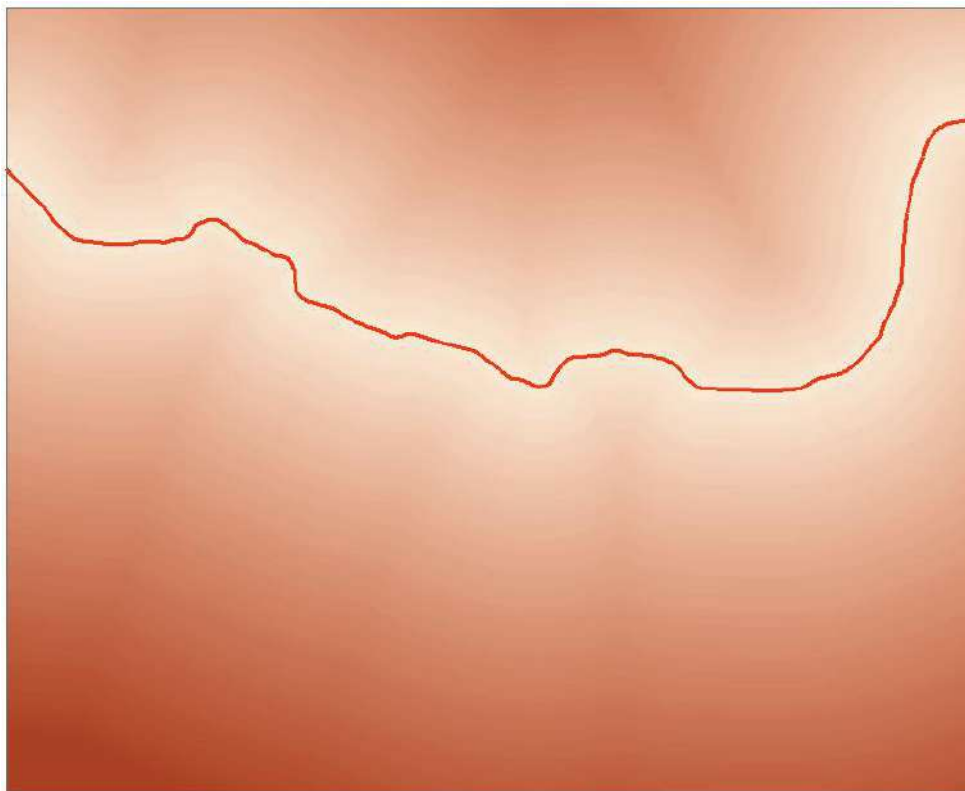


Рис. 2.12. Растр відстаней від автомагістралі.

Надалі виконується перекласифікація растру відстаней на придатні (віддалені понад 1 км) та непридатні (до 1 км) території. Результат наведено на рисунку 2.13.

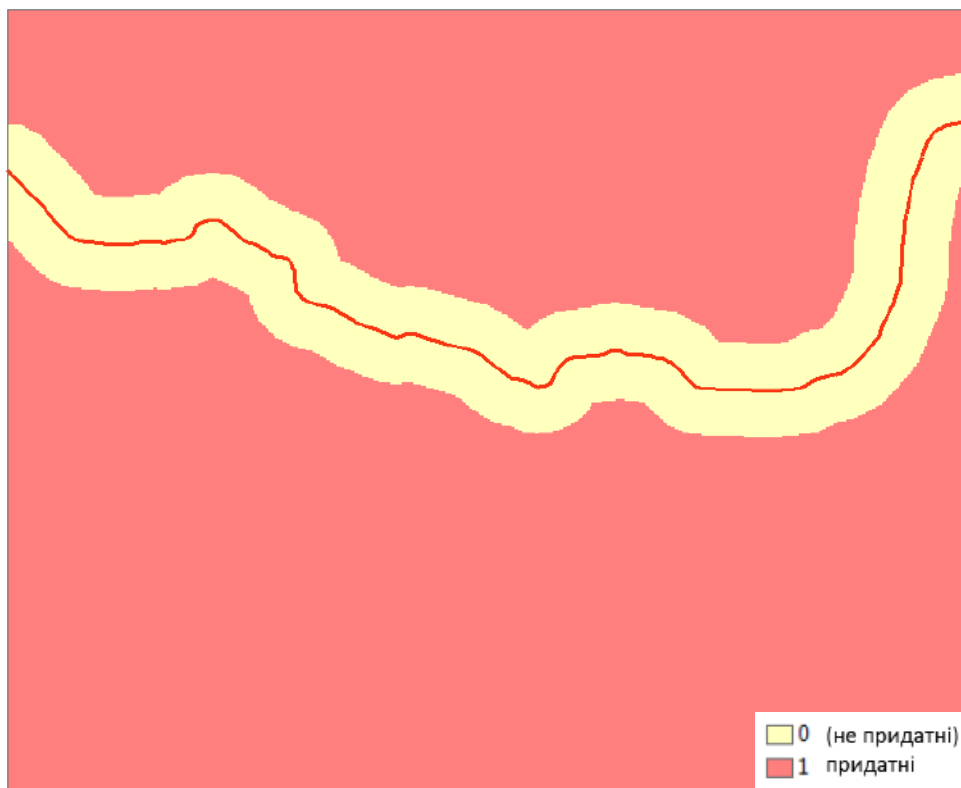


Рис. 2.13. Результат перекласифікації растру відстаней від автомагістралей.

Треба звернути увагу на те, що підходи до критеріїв відстаней до річок та автомагістралей є дуже подібними, однак у випадку з річками, придатними є території наближені до них, тоді як у випадку автомагістралей – придатні території є віддаленими від них. Отже, ця частина моделювання придатності застосовує однакові аналітичні інструменти в геоінформаційній системі, але інтерпретація критеріїв дещо відрізняється. Значна увага має бути приділена тому, щоб не інтерпретувати ці критерії навпаки.

Коли створено карти окремих критеріїв, заключним кроком булевої моделі придатності є поєднання окремих критеріїв змістовним чином. Найпростішим способом є застосування булевого оператора AND. По суті, це означає, що результуючими придатними територіями є ті, що відповідають всім критеріям. В геоінформаційній системі передбачається накладання

чотирьох окремих бінарних карт (1/0) та виявлення територій зі значеннями, що дорівнюють 1. Результат цього накладання наведено на рисунку 2.14.

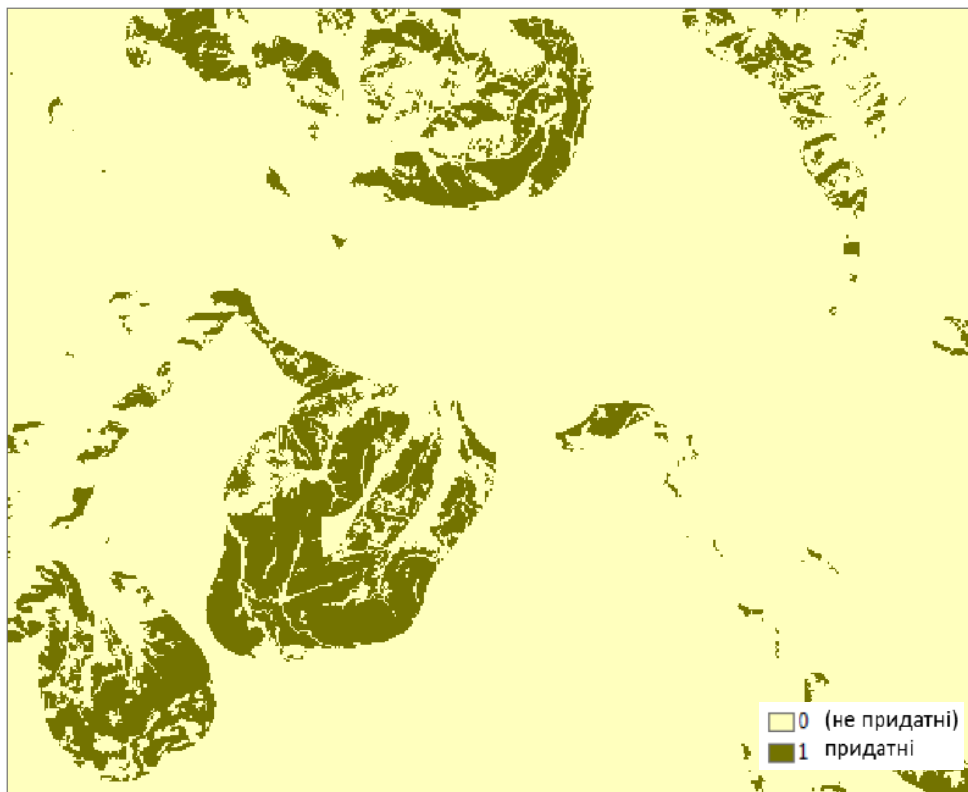


Рис. 2.14. Результуючі придатні території.

Результуючі придатні території розташовані на крутих схилах, вкриті лісом, наближені до річок та віддалені від автомагістралей.

Одним з альтернативних різновидів булевої моделі придатності є визначення не лише ділянок, які відповідають усім критеріям, а визначення скільком критеріям відповідає кожне місцеположення. Це є визначенням суми окремих бінарних карт (рис. 2.15). Результат свідчить, що декілька ділянок не відповідають жодному з критеріїв, однак більшість території відповідає одному або більше критеріям. Результат відповідності усім чотирьом критеріям точно співпадає з попередніми результатами, що базуються на поєднанні чотирьох критеріїв.

2.3.2. Переваги та недоліки булевої придатності.

Булевий підхід до моделювання придатності є простим, але потужним. Переваги цього підходу включають:

- модель придатності є дуже простою, що робить простим пояснення концептуального процесу іншим;
- простота моделі робить процедуру досить легкою для виконання у програмному середовищі геоінформаційної системи, використовуючи векторні і растрові дані та інструменти аналізу.

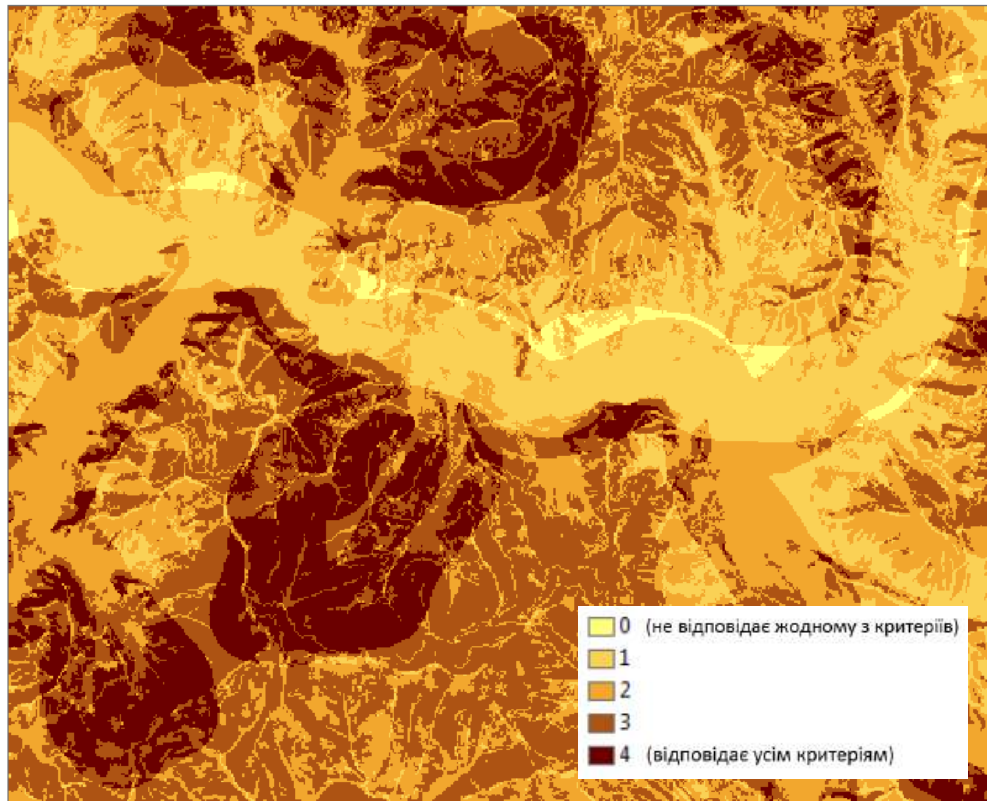


Рис. 2.15. Визначення суми окремих бінарних карт.

Недоліками цього підходу є:

- багато критеріїв не дозволяють виконати однозначну класифікацію на прості категорії і вимагають застосування більш тонкого підходу;
- результати дуже чутливі до рішень стосовно граничних значень для окремих критеріїв;
- з результатів не завжди очевидно, який критерій або критерії призвели до виключення конкретної території;
- усі критерії мають однаковий вплив на модель і немає механізму для застосування ваги критеріїв;
- результати можуть містити дуже малу кількість результуючих територій або взагалі жодної, залежно від суворості критеріїв.

Незважаючи на недоліки, простота булевої моделі придатності зробила її однією з просторових аналітичних методик, що найбільш широко застосовуються.

2.3.3. Моделювання придатності з використанням балів або рейтингів.

Другим підходом до моделювання придатності є застосування балів або рейтингів. За цим підходом кожен критерій представлений на карті діапазоном значень, від дуже низької до дуже високої придатності з кількома значеннями між ними. При такому підході окремі критерії мають діапазон значень. Придатність подається в вигляді безрозмірної величини, що надалі дозволяє безпосередньо порівнювати різні критерії. Алгебра карт використовується для поєднання карт критеріїв і при цьому критерії можуть бути по-різному зважені. Кінцевим результатом є карта, яка показує діапазон значень різної придатності.

Моделювання придатності з використанням балів розпочинається з визначення задачі, яка має бути вирішена, та встановлення критеріїв, які визначають найбільш придатні території. Для того, щоб перевести критерії на карти, для кожного критерію виконується перекласифікація до спільних балів – це також називають *градуванням*. Тоді як в булевому моделюванні придатності є лише дві категорії (так чи ні), то у даному випадку є більше категорій, що представлені балами, тобто безрозмірними числами. Теоретично можуть використовуватись різні діапазони значень, типовим є застосування балів від 1 до 3, 1 до 5, або від 1 до 9. Зазвичай, ступінь детальності залежить від конкретних знань, якими ми володіємо стосовно критерію. Яка б система ранжування не була обрана, одним із ключових елементів моделювання придатності є те, що кожен критерій використовує однаковий діапазон чисел. Іншими словами, усі критерії повинні бути класифіковані за однаковою шкалою, тобто від 1 до 3 для ухилів та від 1 до 5 для землекористування. Найчастіше найменше число представляє найменшу придатність, а найбільше – найвищу придатність. Однак, дійсні бали не мають жодного значення поза моделлю придатності.

Наприклад, у випадку моделі середовища існування пуми замість класифікації схилів на категорії так (понад 20 градусів) та ні (менше 20 градусів), з використанням балів класифікація може виглядати наступним чином: 1 бал (низька придатність) для ділянок з ухилом менше 10 градусів, 2 бали (середня придатність) для ділянок від 10 до 20 градусів та 3 бали (висока придатність) для ділянок з ухилом понад 20 градусів.

Другим кроком є поєднання карт перекласифікованих критеріїв змістовним чином. Це виконується із застосуванням накладання окремих карт критеріїв. Сума балів або середній бал використовуються, зазвичай, для одержання кінцевого балу придатності. Наприклад, якщо модель придатності враховує 4 критерії, кожен з яких класифікований від 1 до 3, то кінцева модель придатності, використовуючи суму, може мати значення від 4 до 12, тоді як використовуючи середнє значення, вони будуть в межах від 1 до 3. Зрештою, можуть бути застосовані додаткові обмеження, які ефективно додають можливість введення також критеріїв булевого типу. Наприклад, припустимо, що є водні об'єкти, які не повинні розглядатися, як частина придатності для середовищ існування, їм слід надати 0 балів, незалежно від балів інших критеріїв у цьому місці.

2.3.4. Зважені фактори.

Іншим підходом є застосування зважених факторів. Замість визначення загальної суми або середнього значення балів для різноманітних критеріїв, може бути застосоване зважене середнє. По суті, загальна сума або середнє неявно передбачають, що всі критерії мають однакову вагу, однак це може бути нереалістичним представленням. Наприклад, у випадку середовища існування пуми, можливо, наявність лісового покриву є набагато важливішим за відстань до магістралей.

Значення ваги можуть бути застосовані для відображення передбачуваного впливу кожного критерію. Типовий підхід полягає у використанні відсотку для кожного критерію таким чином, щоб сума відсотків становила 100%. Сума значень ваги має становити 100, оскільки це

відсотки. Відсоток показує частку впливу, яка свідчить як кожен шар впливає на результат. Надаючи шару вагу 50, визначається, що цей шар становить 50% від аналізу, і тому є дуже важливим. Сума значень ваги решти шарів має становити 50, оскільки сума всіх значень ваги повинна дорівнювати 100%.

У наведеному нижче прикладі кожному шару надано вагу для виконання аналізу (рис. 2.16). Експозиція отримала 35%, засвідчуючи, що це найбільш впливовий шар. Абсолютні висоти та ухил також є відносно важливими, тому вони мають вищу вагу, ніж шар відстані, який є найменш впливовим для цього аналізу.

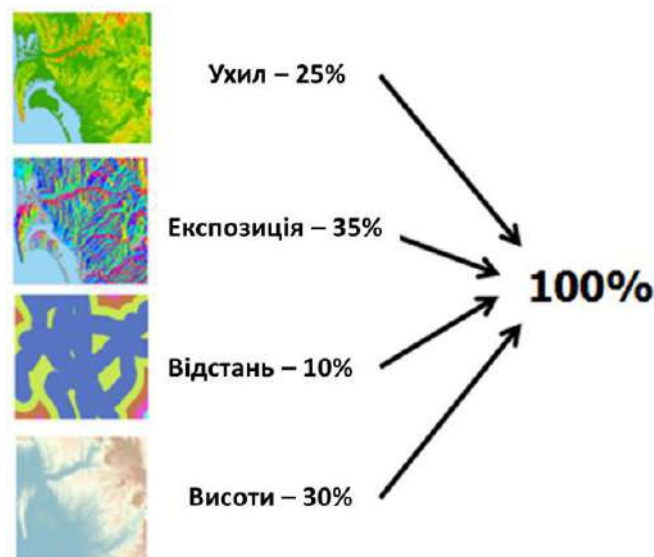


Рис. 2.16. Надання ваги шарам для виконання аналізу.

Цей підхід до моделювання придатності вбудовано в геоінформаційну систему ArcGIS у формі інструменту Зваженого накладання (Weighted Overlay) (рис. 2.17). Вихідними даними є окремі карти критеріїв в їх первинній формі, або перекласифіковані.

Інструмент дозволяє:

- визначити бали, які ви хочете застосувати, наприклад від 1 до 3, або від 1 до 5;
- конвертувати кожен критерій в єдину шкалу;
- застосувати зважені фактори;
- розрахувати кінцеву придатність.

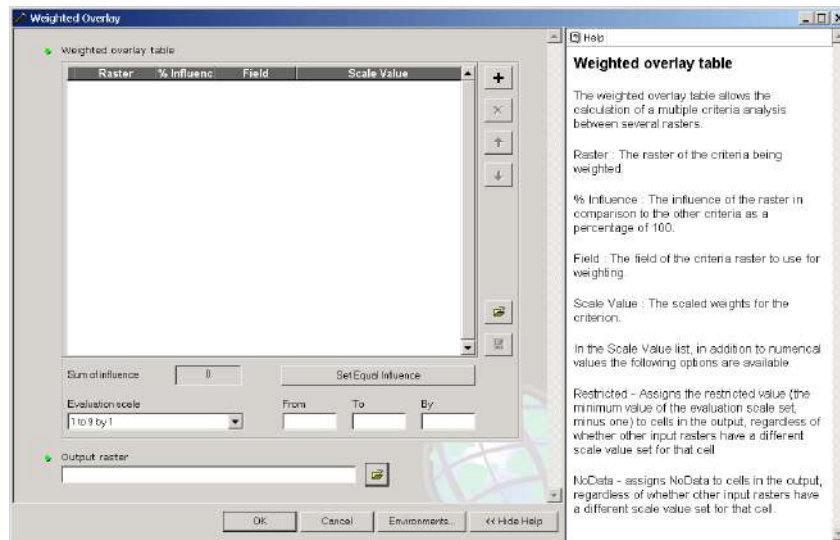


Рис. 2.17. Інструмент Зваженого накладання (Weighted Overlay).

Є багато інших способів виконання моделювання придатності в геоінформаційній системі ArcGIS, однак цей конкретний інструмент поєднує багато кроків.

2.3.5. Приклад моделювання придатності з використанням балів.

Використання зважених балів в моделюванні придатності проілюструємо на прикладі. Сценарій прикладу стосується моделювання потенційних розташувань для нової житлової забудови. Мають бути враховані наступні критерії:

- землекористування – ділянки, які вимагають менше звільнення земель, є більш придатними;
- ґрунти – ґрунти, які придатні для будівництва є більш придатними;
- ухили – ділянки на пологих схилах є більш придатними;
- водотоки – ділянки далі від водотоків є більш придатними;
- дороги – ділянки ближче до доріг є більш придатними.

Кожен критерій пов'язаний з конкретним набором даних і кожен набір даних має бути конвертований у карти, що відображають критерії. Для цього прикладу бали придатності визначені в діапазоні від 1 (найменша придатність) до 5 (найбільша придатність) – тобто кожен критерій використовує ці безрозмірні числа за однаковою шкалою.

Першим критерієм є землекористування. Наступна таблиця перекласифікації відображає, як створити бали на основі первинних класів землекористування.

Категорія землекористування	Бал придатності
Сільське господарство	5
Ліс	2
Луки	5
Чагарники	4
Забудова	1
Вода, болота	1

Такі перекласифікації є дещо суб'єктивними, однак намагаються вловити найкращу доступну інформацію щодо відносин між критерієм (землекористування) та придатністю (ділянки, які вимагають менше звільнення земель, є більш придатними).

Ця таблиця перекласифікації надалі буде застосована до первинних даних землекористування (рис. 2.8). Її результатом є карта реалізації першого критерію (рис. 2.18).

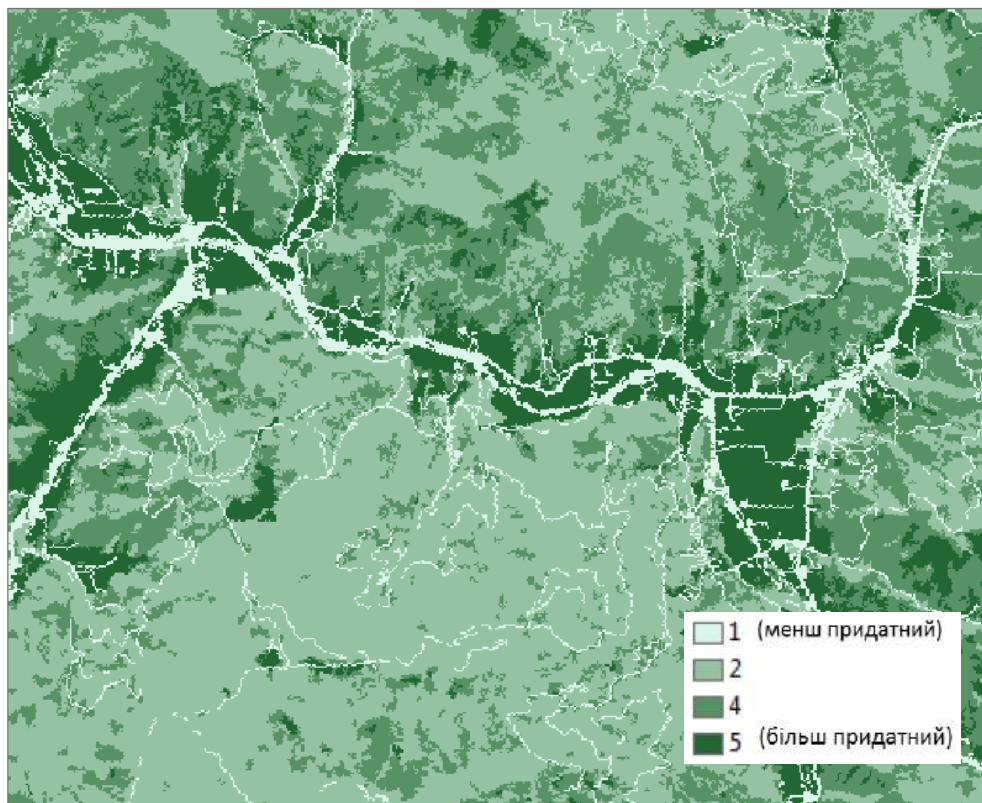


Рис. 2.18. Результат перекласифікації шару землекористування.

У цьому прикладі використовуються не всі можливі бали, оскільки бал 3 насправді не має місця на карті критерію. Це, зазвичай, не трапляється з безперервними (континуальними) наборами даних (такими, як ухили або відстань), однак є звичним для категорійних даних (таких, як землекористування у даному випадку).

Наступним критерієм є ґрунти. Перевага віддається ґрунтам, які забезпечують кращий дренаж, тобто піщаним ґрунтам віддається перевага відносно мулистих або глинистих ґрунтів. Наступна таблиця перекласифікації відображає, як створити бали на основі первинних класів ґрунтів.

Клас ґрунту	Бал придатності
Найкращий дренаж	5
Хороший дренаж	3
Середній дренаж	2
Поганий дренаж	1

Ця таблиця перекласифікації зазвичай застосовується до первинних даних ґрунтів і результатом її є карта реалізації другого критерію (рис. 2.19).

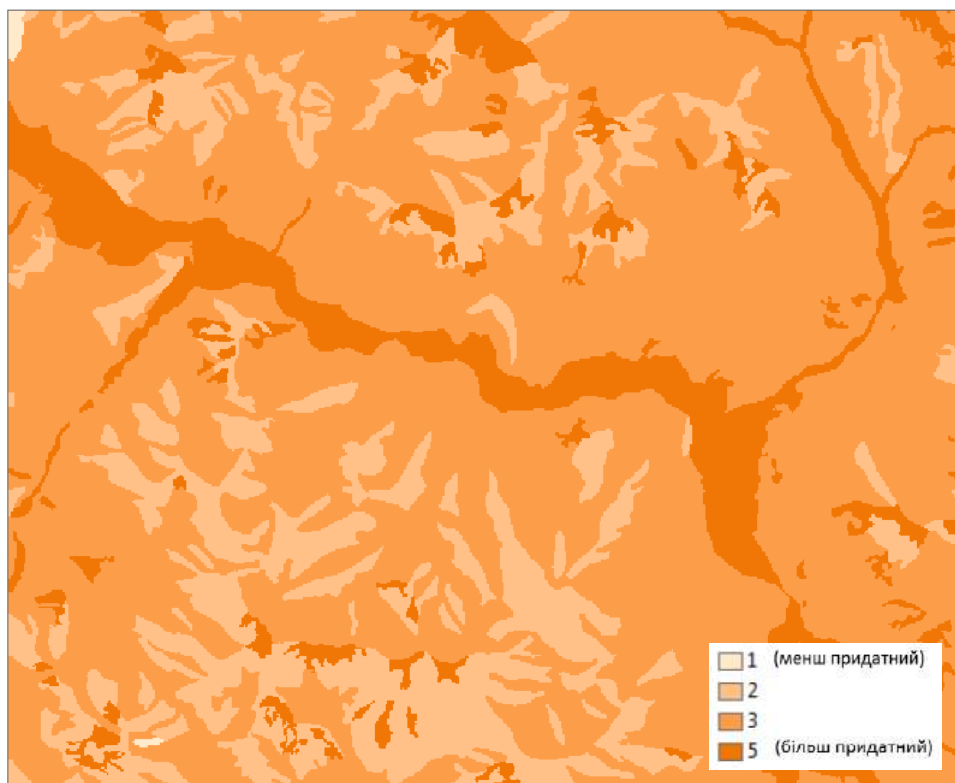


Рис. 2.19. Результат перекласифікації шару ґрунтів.

Наступним критерієм є ухил. Ділянки з пологими схилами є більш придатними, оскільки будівництво на більш крутих схилах коштує більше. Наступна таблиця перекласифікації відображає, як створити бали на основі ухилу.

Категорія ухилу (градуси)	Бал придатності
0 – 2,0	5
2,0 – 5,0	4
5,0 – 8,0	3
8,0 – 12,0	2
> 12,0	1

Ця таблиця перекласифікації надалі застосовується до карти ухилів (рис. 2.6). А результатом третього критерію є карта перекласифікації ухилів (рис. 2.20).

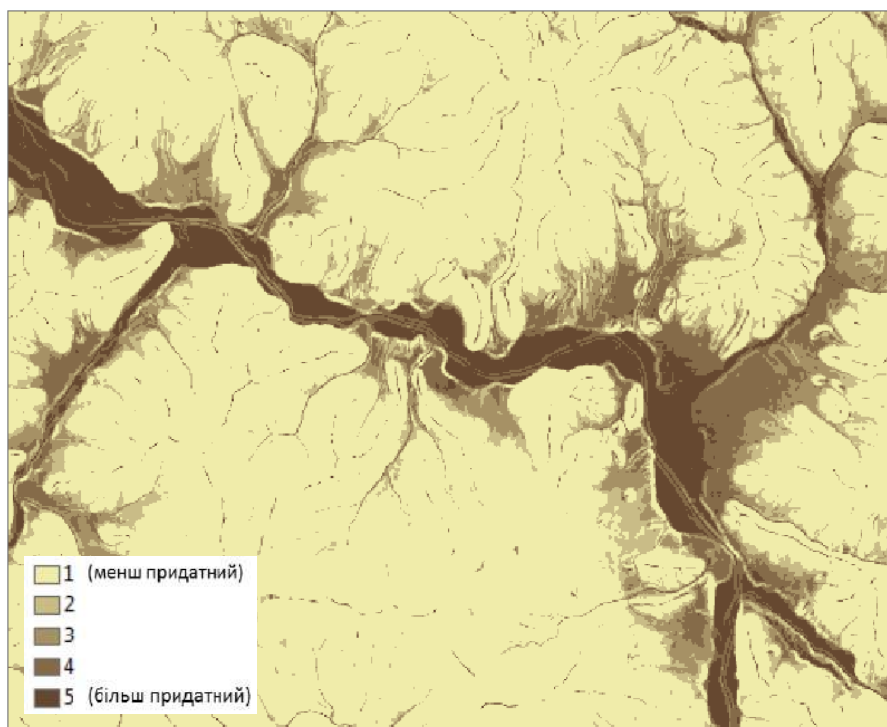


Рис. 2.20. Результат перекласифікації шару ухилів.

Наступним критерієм є відстань до водотоків. Ділянки, що більш віддалені від струмків є більш придатними, щоб знизити небезпеку їх затоплення паводковими водами. Наступна таблиця перекласифікації відображає, як створити бали на основі відстані до водотоків.

Відстань до водотоків	Бал придатності
0 – 300 м	1
> 300 м	5

Ця таблиця перекласифікації надалі застосовується до карти відстані до водотоків (рис. 2.10) і її результатом є карта реалізації четвертого критерію (рис. 2.21).

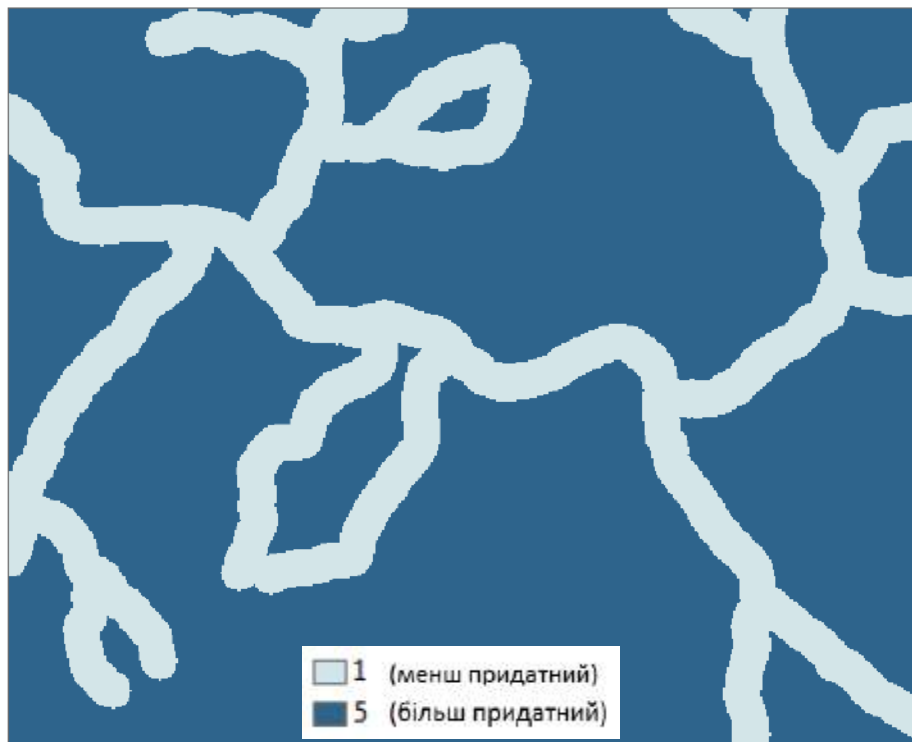


Рис. 2.21. Результат перекласифікації відстані до водотоків.

Треба звернути увагу, що наведені результати виглядають як булевий критерій, однак значення придатності для менш придатних – 1, а для більш придатних – 5, не 0 та 1. Отже, застосовується єдина гранична величина, як при булевому моделюванні придатності, однак карта критерію масштабована, щоб відповідати діапазону інших критеріїв.

Останнім критерієм є відстань до доріг. Ближчі до існуючих доріг ділянки є більш придатними, оскільки знижують вартість під'єднання дороги до існуючої транспортної мережі. Наступна таблиця перекласифікації відображає, як створити бали на основі відстані до доріг.

Відстань до доріг (метри)	Бал придатності
0 – 400	5
400 – 800	4
800 – 1200	3
1200 – 1600	2
> 1600	1

Ця таблиця перекласифікації застосовується до карти відстаней до доріг (рис. 2.22). Результатом є карта реалізації п'ятого критерію (рис. 2.23).

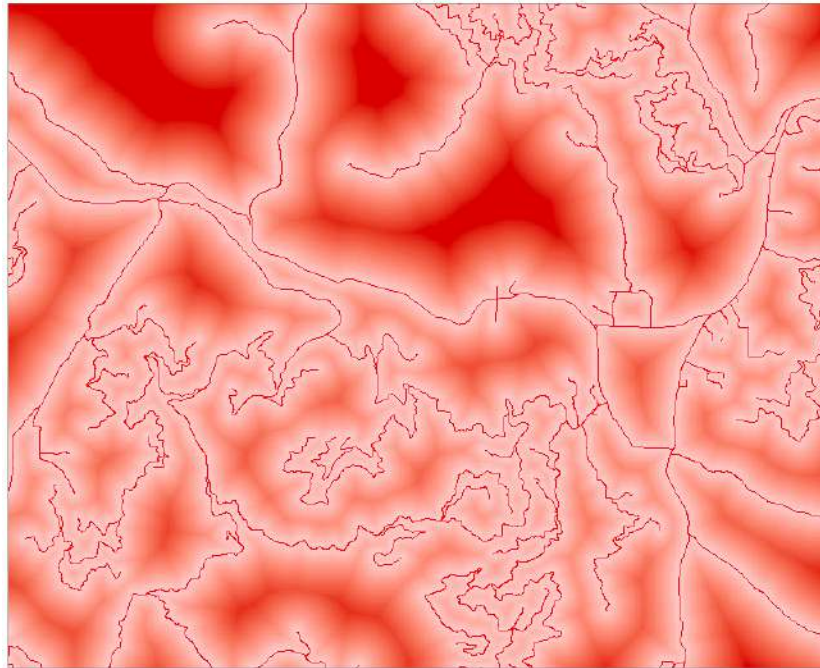


Рис. 2.22. Карта відстаней до доріг.

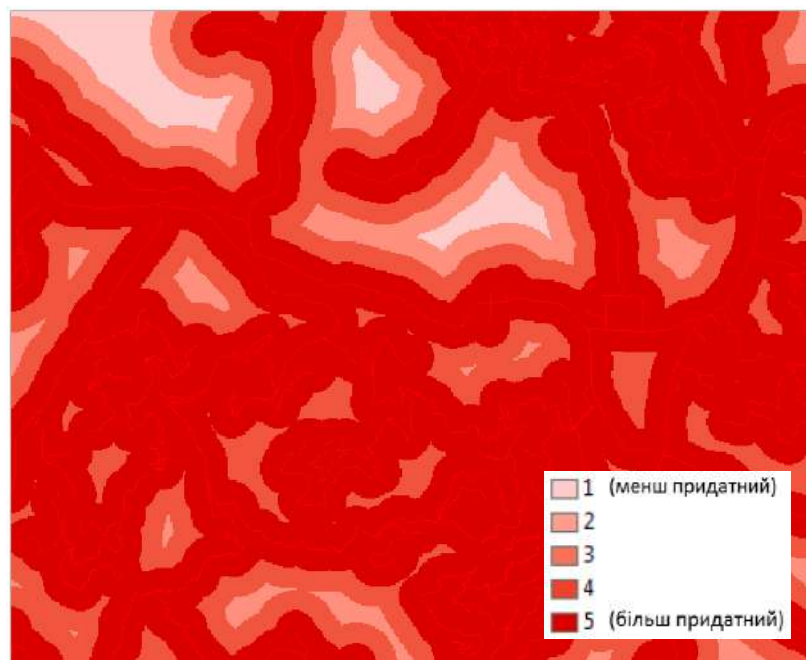


Рис. 2.23. Результат перекласифікації відстані до доріг.

Щоб одержати кінцеві бали придатності, поєднуються п'ять окремих карт критеріїв. Можливими є кілька підходів, але інструмент Зважене накладання (Weighted Overlay) створений із закладеною до нього конкретною процедурою. У наведеному нижче прикладі значення ваги, що надані критеріям, є рівними, тобто по 20% надається кожному (рис. 2.24).

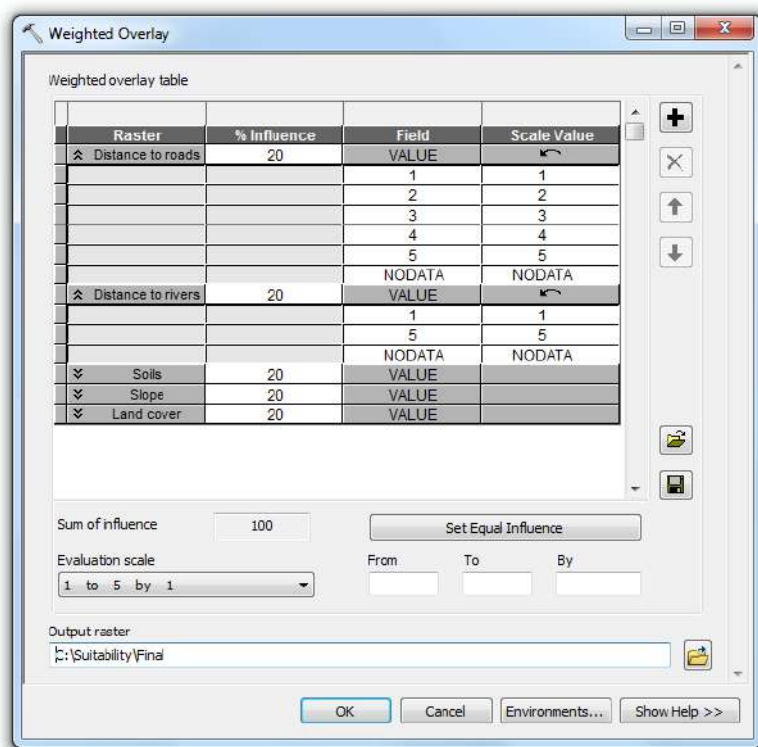


Рис. 2.24. Інструмент Зважене накладання.

Результатом накладання є кінцева карта придатності (рис. 2.25). Процедура зваженого накладання є, по суті, зваженою сумою плюс округлення, тобто кожна карта критерію помножена на частку (0,2 у даному випадку) і значення карт критеріїв складені разом, а потім застосоване округлення. Це в результаті дає кінцевий бал придатності, який відповідає первинним діапазонам балів. Однак, внаслідок наявності різних комбінацій не всі значення можуть бути представлені в результаті. У цьому прикладі найнижчий бал 1 не представлений, що означає, що немає територій з дуже низькими балами усіх критеріїв. З іншого боку, є лише невелика кількість ділянок, з кінцевим балом 5, тобто ділянок з високими балами для всіх критеріїв (але не обов'язково 5 балів для всіх критеріїв, оскільки на кінцевий результат впливає округлення).

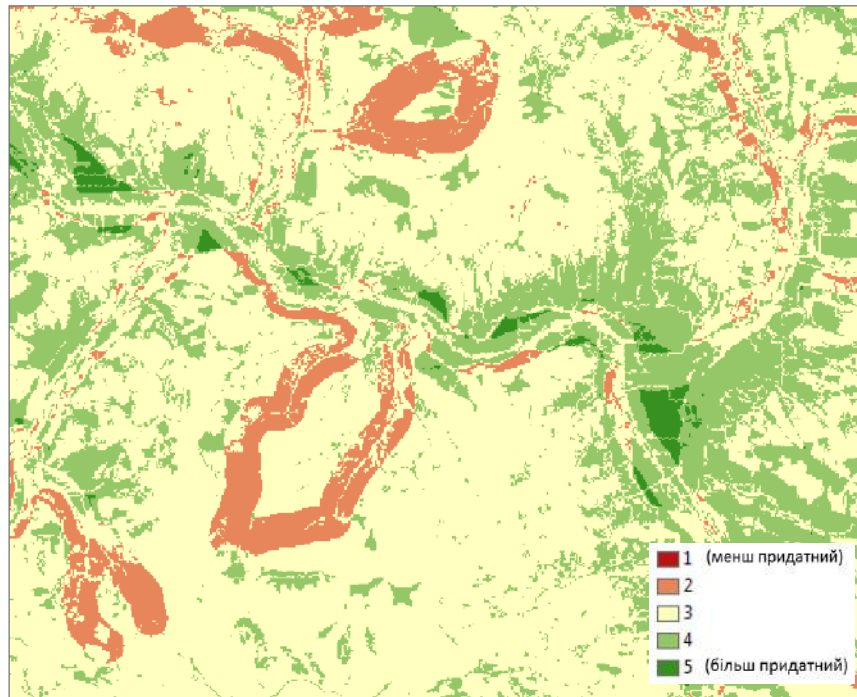


Рис. 2.25. Кінцева карта придатності.

Альтернативні значення ваги призводять до різних результатів. Наприклад, застосування значно більшої ваги для ухилів і землекористування дає в результаті наступну карту придатності (рис. 2.26).

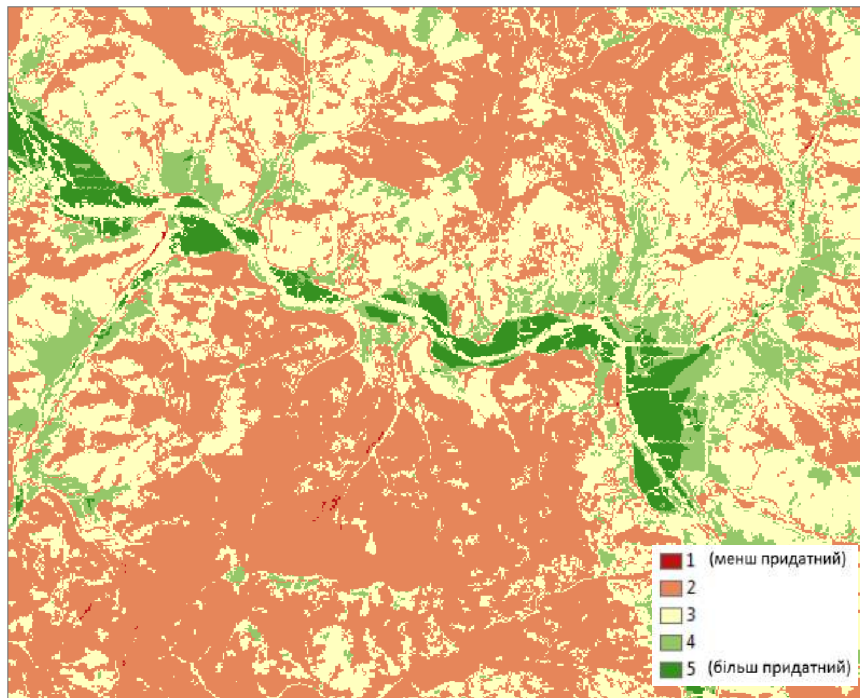


Рис. 2.26. Застосування значно більшої ваги для ухилів і землекористування.

Хоча результати спочатку виглядають дуже різними, існує відносно добре узгодження між двома результатами стосовно найбільш придатних ділянок (кінцеві бали 4 та 5).

2.3.6. Переваги та недоліки моделювання придатності з використанням балів.

Зважений аналіз придатності зазвичай використовується для вирішення багатокритеріальних задач, коли:

- потрібно визначити рейтинг придатності комірок у растровому наборі даних;
 - необхідні варіанти наступних після найкращих (майже найкращих) місць, замість поділу комірок на придатні або ні;
 - потрібно контролювати вплив шару на результати аналізу.
- Наприклад, коли відомо, що один критерій є більш важливим для успішного аналізу, ніж інші, можна застосувати більшу вагу до нього.

Типові приклади вміщують:

- знаходження кращих місць для винограднику на основі ухилів, абсолютних висот, експозиції, відстані до автомагістралей;
- знаходження кращих місць для гірськолижного курорту на основі висоти снігового покриву, ухилів, експозиції, відстані до міст;
- знаходження кращих місць для нової житлової забудови на основі типів ґрунтів, землекористування, ухилів, експозиції.

Деякими перевагами моделювання придатності з використанням балів є:

- використання безрозмірних балів дозволяє порівнювати критерії у різних системах вимірювання, наприклад, ухили в градусах та категорії землекористування;
- рівень детальності може контролюватися вибором найбільш придатного масштабу, наприклад, від 1 до 3 або від 1 до 9;
- застосування значень ваги надає можливість контролювати вплив окремих критеріїв.

Деякими недоліками моделювання придатності з використанням балів є:

- бали придатності самі по собі не мають дійсного значення, окрім наданого в моделі, тобто це не вимірювана величина, яка може бути визначена у просторі;

- складність процедури робить менш очевидним питання, чому конкретне місцеположення отримує певний бал, тобто для визначення, чому місцеположення одержало бал 4, а не 3 або 5, необхідно детально розглянути окремі вхідні критерії;

- таблиця перекласифікації вимагає ретельного розгляду і часто потребує інформації від експертів в предметній сфері;

- кінцевий результат є хорошим лише настільки, наскільки хороші первинні вхідні дані, тобто кінцевий результат, як правило, не дає жодних пропозицій стосовно критеріїв, які, могли б були упущені.

Незважаючи на ці недоліки, моделювання придатності з використанням балів дуже широко застосовується та відносно просте у виконанні із застосуванням програмного забезпечення геоінформаційної системи.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. A GIS-based multicriteria spatial decision support system for planning urban infrastructures. *Decision Support Systems*, 51(3), 720-726.
2. Chang, Kang-Tsung .2013. *Introduction to Geographic Information Systems*, New York: McGraw-Hill. Coutinho-Rodrigues, J., Simão, A., & Antunes, C.H. 2011.
3. Curtin, Kevin M. 2007. Network analysis in geographic information science: Review, assessment, and projections. *Cartography and Geographic Information Science* 34.2 (2007): 103-111.
4. De Smith, M.J., Goodchild, M.F., & Longley, P. 2015. *Geospatial analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Winchelsea Press. – Chapter 7 on Network and Location Analytics, freely accessible here: <http://www.spatialanalysisonline.com/>
5. Esri. 2016. ArcGIS Desktop Help pages.
<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/>
6. Fischer, M.M. 2006. GIS and network analysis. *Spatial Analysis and GeoComputation: Selected Essays* (2006): 43-60.
7. Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726.
8. Mitchell, A. 2012. *The Esri Guide to GIS Analysis Volume 3: Modeling Suitability, Movement and Interaction*. Esri Press, Redlands, CA.
9. Store, R., & Kangas, J. 2001. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and urban planning*, 55(2), 79-93.
10. Wolfgang Kainz. *Fuzzy Logic and GIS*. Department of Geography and Regional Research University of Vienna, Austria. 2008. – 21 p.
11. Zadeh L.A., *Fuzzy Sets. Information and Control*, Vol. 8, 1965, pp. 338 – 353.

- 12.ArcGIS. Network Analyst. Руководство пользователя. ESRI, 2001, Пер. с англ. DATA+, Ltd. – 36 с.
- 13.ArcGIS. Spatial Analyst. Руководство пользователя. ESRI, 2001, Пер. с англ. DATA+ Ltd. – 216 с.
- 14.Інвестиційні інструменти проектного менеджменту / Бушуєв С.Д., Гурін Е.А. – К.: Укрінтеї, 1998. – 184 с.
- 15.Хаксхолд В.Е. Введение в городские географические информационные системы. – М.: Дата+, 1999. - 320 с.
- 16.Энди Митчел. Руководство по ГИС-анализу. Ч.1. Модели пространственного распределения и взаимосвязи.- Киев: ЭКОММ, 2000. – 179 с.
- 17.Цветков В.Я. Географические информационные системы и технологии.- М.: Финансы и статистика, 1998. – 288 с.
- 18.ДеМерс М. Н. Географические информационные системы, основы.: Пер.с англ. - М.:Изд. Дата+, 1999. - 491 с.
- 19.Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов. М.: Наука, 1990. – 384 с.
- 20.Берж К. Теория графов и ее применения. М.:Иностранная литература, 1962. – 319 с.
- 21.Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. Тбилиси: Мецниереба, 1974. – 234 с.
- 22.Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1968. – 352 с.