

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

На правах рукопису

ЯРЕМИН ХРИСТИНА АНДРІЇВНА
**ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ТРІАНГУЛЯЦІЇ
В ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ
ДЛЯ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ**

Спеціальність: 193 Геодезія та землеустрій
Освітня програма Геодезія та землеустрій
Робота на здобуття першого (бакалаврського) освітнього рівня

Науковий керівник:
Расюн Віктор Леонідович
старший викладач

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ

Протокол №
засідання кафедри геодезії,
землевпорядкування і кадастру
Від . . 2025 р.

Завідувач кафедри
д.т.н., проф. А.В. Уль_____

ЛУЦЬК - 2025

Анотація

Яремин Х.А. Використання методів тріангуляції в геоінформаційних системах для просторового аналізу. Кваліфікаційна робота на правах рукопису. – ВНУ імені Лесі Українки, МОН України, Луцьк, –2025. -64 с.

В дипломній роботі розглянуто алгоритми побудови тріангуляції, зокрема тріангуляції Делоне. Розкрито суть поняття TIN та задач просторового аналізу ГІС, що можуть розв’язуватись за її допомогою. Виконано побудову TIN моделей морфометричних характеристик рельєфу – ізоліній, ухилів, експозиції схилів для Рівненської області та здійснено їх аналіз.

Ключові слова: тріангуляція, ГІС, цифрова модель рельєфу, рельєф, використання земель.

Annotation

Yaremyn Kh.A. Using triangulation methods in geographic information systems for spatial analysis. Qualification work on the rights of the manuscript. - Lesya Ukrainka National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lutsk, -2025. - 64 c.

The thesis examines algorithms for constructing triangulation, in particular Delon triangulation. It reveals the essence of the concept of TIN and the tasks of spatial analysis of GIS that can be solved with its help. TIN models of morphometric characteristics of relief – isoline, slopes, and exposure of slopes – were constructed for the Rivne region and analyzed.

Keywords: triangulation, GIS, digital terrain model, terrain, land use.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ У ГІС.....	7
1.1 Поняття про просторовий аналіз даних.....	7
1.1.1 Функції просторового аналізу.....	12
1.1.2 Класифікація просторового аналізу.....	15
1.2 Алгоритм проведення просторового аналізу.....	17
1.3 Автоматизовані методи аналізу й обробки даних.....	23
РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ТА АНАЛІЗУ ТРІАНГУЛЯЦІЇ.....	26
2.1. Тріангуляція Делоне. Основні визначення.....	26
2.2. Перевірка умови Делоне.....	29
2.2.1. Перевірка через рівняння описаного кола.....	29
2.2.2. Перевірка із задалегідь обчисленим описаним колом.....	31
2.2.3. Перевірка суми протилежних кутів.....	32
2.3. Алгоритми побудови тріангуляції Делоне.....	33
2.4. Ітераційні алгоритми побудови тріангуляції Делоне.....	35
РОЗДІЛ 3. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ГЕОПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТРІАНГУЛЯЦІЇ.....	38
3.1. Місія SRTM як джерело висотних даних.....	38
3.1.1. Побудова тріангуляції TIN в ArcGIS.....	41
3.2. Аналіз поверхонь за допомогою TIN.....	44
3.2.1. Побудова експозиції схилу.....	44
3.2.2. Обчислення ухилу поверхні.....	46
3.2.3. Побудова ізоліній.....	48
3.3. Пошук оптимального місця розташування на поверхі TIN.....	49
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55

ВСТУП

Традиційно тріангуляцією (від лат. *triangulum* – трикутник) називається один із методів створення мережі опорних геодезичних пунктів, а також сама мережа, створена цим методом. Тріангуляція полягає в побудові рядів або мереж трикутників, що примикають один до одного і у визначенні положення їх вершин, тобто у визначенні координат в обраній системі координат. У кожному трикутнику вимірюють всі три кути, а одну з його сторін визначають з обчислень шляхом послідовного розв'язання попередніх трикутників, починаючи від того з них, в якому одна зі сторін отримана з вимірювань. Якщо сторона трикутника отримана з безпосередніх вимірювань, то вона називається базисною стороною.

У термінах ГІС тріангуляція являє собою мережу, складену з симплексів, тобто найпростіших фігур у просторі. Вона застосовується в багатьох прикладних областях таких як геодезія, геоінформатика, архітектура, моделювання тощо. Двовимірна тріангуляція – найпростіший вид тріангуляції, що складається з безлічі трикутників. Побудову двовимірної тріангуляції зазвичай роблять за набором точок на площині. Таким чином, якщо задати кожній точці значення якоїсь функції, то тріангуляція є кусково-лінійною інтерполяцією тривимірної функції. Таке застосування тріангуляції використовується при моделюванні рельєфу місцевості. Також двовимірна тріангуляція допомагає вирішити численні завдання просторового аналізу та завдання на графах. Завдання побудови двовимірної тріангуляції можна вважати вичерпаним, оскільки було запропоновано та реалізовано численні ефективні алгоритми.

Тривимірна тріангуляція використовується для побудови фізичних моделей різних реальних тіл. Узагальнення двовимірної тріангуляції до тривимірної ускладнює як подання та відображення результату, так і самі алгоритми побудови.

Актуальність теми. Геоінформатика і обчислювальна геометрія є одними з областей інформатики, що найбільш стрімко розвиваються. Завдання побудови тріангуляції є одним із базових у обчислювальній геометрії. До нього зводяться багато інших завдань, TIN широко використовується в машинній графіці та ГІС для моделювання поверхонь та розв'язання задач просторового аналізу. Мережі

TIN широко використовуються для моделювання невеликих областей з дуже високою точністю, наприклад, в інженерних додатках, де їх використання дозволяє проводити обчислення планіметричної площі (planimetric area), площі поверхні та об'ємів. Тому питання дослідження можливостей застосування тріангуляції у задачах геопросторового аналізу ГІС є **актуальним**.

Об'єкт дослідження – тріангуляція як модель представлення просторових даних.

Предмет дослідження – алгоритми побудови тріангуляції, що застосовуються у задачах просторового аналізу.

Мета дослідження – виконати аналіз існуючих методів побудови тріангуляції Делоне, зокрема засобами ГІС, дослідити ефективність застосування тріангуляції для вирішення задач просторового аналізу в ГІС.

Для досягнення мети були поставлені й виконані такі **завдання**:

- проаналізувати поняття тріангуляції та області її використання;
- дослідити умову Делоне побудови тріангуляції;
- ознайомитись із існуючими алгоритмами побудови тріангуляції;
- вивчити можливості відображення рельєфу в ГІС за допомогою тріангуляції;
- дослідити можливості застосування тріангуляції для вирішення задач просторового аналізу.

Методи дослідження. У даній роботі було застосовано наступні методи дослідження: *аналізу* – для вивчення теоретичної бази роботи; *картографічний* – для вибору території дослідження та перерахунку просторових даних у робочу систему координат і проекцію UTM 35N еліпсоїд WGS 84; *графічний* – для відображення побудованих тематичних карт; *аналітичний* – для розрахунку морфометричних показників рельєфу; *узагальнення* – для підбиття підсумків виконаної роботи.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше було застосовано модель TIN, побудовану за висотними даними для території Рівненської області, у комбінуванні з даними дистанційного зондування типів земних покривів Copernicus Global Land Cover Layers для розв'язання задачі просторового аналізу, що полягала в знаходженні оптимального місця положення нового об'єкта.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дипломної роботи можуть бути використані при вирішенні різноманітних задач просторового аналізу даних засобами ГІС, при застосуванні ГІС у задачах планування та розвитку територій, при прийнятті управлінських рішень.

Структура і обсяг роботи - Дипломна робота складається із вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 30 найменувань та додатків на 6 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 57 сторінок основного тексту.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ У ГІС

1.1. Поняття про просторовий аналіз даних

В усі часи знання про просторове місце розташування фізичних об'єктів були дуже важливими і корисними для людей. Наприклад, первісні мисливці малювали на скелях шляхи міграції тварин, а життя або смерть дослідників-першопрохідників безпосередньо залежала від знання географії, наявності картографічних зображень. Карта - це дуже ефективний та інформативний спосіб зберігання, подання і передачі географічної інформації, що має просторову прив'язку. Сучасне суспільство також живе, працює і співпрацює ґрунтуючись на інформації про те, хто і де перебуває, що і коли відбувається, з якою частотою, швидкістю тощо. Прикладна географія у вигляді карт та інформації про простір допомагала робити відкриття, сприяла торгівлі, підвищувала безпеку життєдіяльності людства протягом як мінімум минулих 3000 років, а карти були і залишаються одними з найдосконаліших інформаційних документів [25].

Найбільш часто наші знання в галузі географії застосовуються для вирішення повсякденних завдань, таких як пошук потрібної вулиці у незнайомому населеному пункті або обчислення найкоротшого шляху до місця призначення. Просторова інформація допомагає ефективно виробляти сільськогосподарську продукцію і промислові товари, добувати тепло- і електроенергію, влаштовувати розваги в містах тощо.

ГІС і просторові дослідження безпосередньо стосуються абсолютної і відносної локалізації особливостей рельєфу місцевості, властивостей і ознак цих особливостей. Зазвичай реєструється не тільки локалізація важливих географічних об'єктів, наприклад, річок, а також їх розмір, швидкість течії, якість води або вид риби, що живе в них. Дійсно, ці ознаки залежать від просторового розташування "важливих" рельєфних особливостей. ГІС допомагає аналізувати і відображати ці просторові залежності.

Незважаючи на те, що дані, які зберігаються в ГІС, є головною цінністю (часом 70-90 % вартості системи) [16], вони є корисними тільки в процесі розв'язку прикладних задач. Кожна ГІС, разом із з модулями введення й виведення даних,

має засоби, призначені для виконання загальних функцій геопросторового аналізу й вирішення специфічних задач користувача. *Геопросторовий аналіз* - це процес пошуку просторових закономірностей у розподілі географічних даних і взаємозв'язків між об'єктами [21].

До засобів просторового аналізу відносяться різні процедури маніпулювання просторовими й атрибутивними даними, що виконуються при обробці запитів користувача, наприклад, операції накладення графічних об'єктів, засоби аналізу мережових структур або виділення об'єктів за заданими ознаками тощо.

Геопросторовий аналіз являє собою аналіз взаємного просторового розташування різноманітних об'єктів на векторних або растрових зображеннях та аналіз їхньої атрибутивної інформації.

Областю геопросторового аналізу є поверхня Землі, оболонка над нею при аналізі топографії й атмосфери, оболонка під нею при аналізі ґрунтових вод і геології.

Масштаб досліджуваних сутностей геопросторового аналізу простягається від невеликих об'єктів (записи місць археологічних розкопок, де, наприклад, були знайдені уламки керамічних виробів трипільської культури розміром у декілька сантиметрів, або меж приватної власності, виміряних до міліметра) до глобальних (аналіз температури поверхні морів і глобального потепління).

Геопросторовий аналіз може проводитись:

- для минулого часу (історичні дослідження міграції населення, вивчення структури археологічних місць розташувань стоянок первісної людини або детальне картографування руху континентів);
- для реального часу (інвентаризація земель, ведення кадастру, моніторинг тощо);
- для майбутнього часу (прогнозування напрямків і швидкості переміщення ураганів, зміни клімату або динаміки забруднення навколишнього середовища).

Таким чином, методи геопросторового аналізу працюють у низці просторових і часових масштабів.

Геопросторовий аналіз, як базову, використовує географічну інформацію про місце розташування об'єктів, процесів та явищ.

До складу ГІС з розвинутими аналітичними можливостями (ARC/INFO, IDRISI, MGE, PCRaster, ГІС-Карта-2010 та деякі інші) входить декілька десятків різноманітних аналітичних процедур, які в сукупності складають потужний арсенал просторово-часового аналізу і моделювання. При цьому треба відзначити, що набір аналітичних процедур, реалізованих у різних геоінформаційних пакетах, досить близький за складом. Це надає можливість розглядати методи геоінформаційного аналізу, не прив'язуючись до особливості конкретних геоінформаційних пакетів.

Широкий набір розрахункових і аналітичних операцій розширює можливості ГІС, але ускладнює їхній інтерфейс і, відповідно, впливає на складність роботи користувача, особливо новачка. Тому сучасні ГІС мають здебільшого модульний склад. Певна частина операцій включається до базового складу системи, а інші додаються за потреби.

Сучасні програмні оболонки, орієнтовані на “геоінформаційний” стиль, включають програмні інструменти розв’язання оптимізаційних задач на “топологіях” - спеціальних структурах даних [23].

Підсистема геопросторового аналізу - це те, заради чого й існує ГІС. Просторовий аналіз - це серце ГІС [23]. Геопросторовий аналіз є унікальною лінзою, через яку вивчаються об’єкти, події, явища, які відбуваються на землі

або поблизу поверхні нашої планети [10]. В результаті аналізу географічної інформації утворюється якісно нова інформація і виявляються раніше невідомі закономірності.

Будь-яка процедура аналізу даних починається з пошуку і відбору даних з урахуванням запиту користувача. У ГІС підтримується можливість аналізу даних у різних режимах: *модельному, експертному, довідковому та статистичному* (Рис. 1.1).

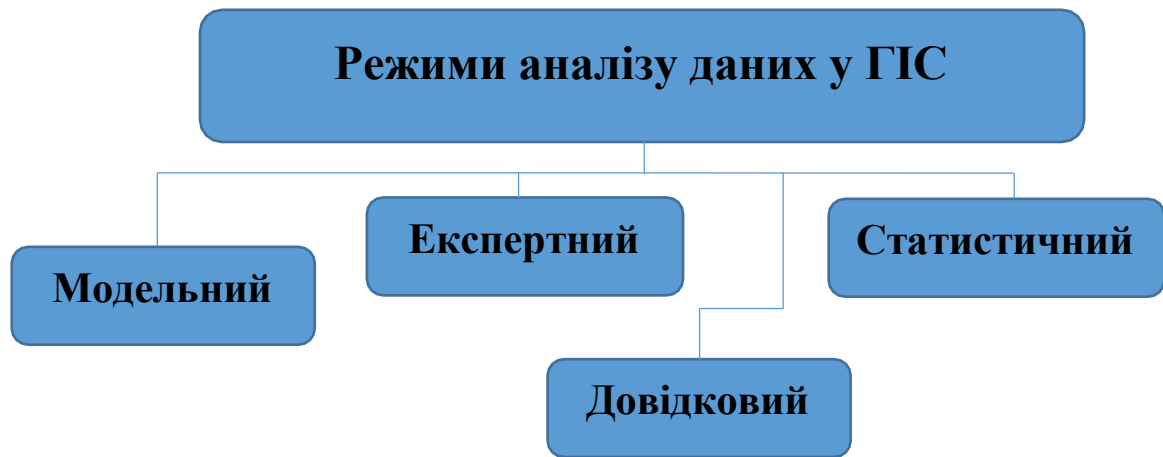


Рис. 1.1. Режими аналізу даних

Сукупність аналітичних процедур, які входять до складу блоків аналізу геоінформаційних пакетів з розвинутими аналітичними можливостями, можна поділити на такі групи (Рис. 1.2):

- візуалізація;
- картометричні операції;
- операції вибору;
- рекласифікація;
- картографічна алгебра;
- статистичний аналіз;
- просторовий аналіз;
- оверлейний аналіз;
- мережевий аналіз;
- аналіз за допомогою штучних нейронних мереж.

Наведена класифікація є умовною, проте вона відображує спектр аналітичних процедур, які входять до складу сучасних інструментальних ГІС.

Крім зазначених, в окрему групу виділяють:

- аналітичні процедури, що базуються на цифровій моделі рельєфу;
- операції просторової інтерполяції, завданням яких є побудова безперервних поверхонь на основі наборів дискретних просторово- координованих даних.



Рис. 1.2. Класифікація аналітичних процедур ГІС

Вибір методів геоінформаційного аналізу насамперед залежить від виду задачі, яка розв'язується, і моделі (формату) даних, що використовується. Для вирішення одних задач зручніше використовувати векторні дані, для вирішення інших - растрові. Часто виникає необхідність спільного використання моделей і форматів, тобто гібридних моделей.

Обмежені можливості людини зі сприйняття й обробки інформації змушують шукати способи більш інтегрованого подання та аналізу даних. Пріоритетною є орієнтація на виявлення глибинних сутнісних зв'язків між різноманітними процесами і явищами навколишнього світу. В слабоформалізованих сферах людської діяльності, до яких відносяться управління територіями, муніципальні служби, містобудування, екологія, природокористування тощо, актуальним є інтегрований аналіз різнорідних просторово-розподілених даних, який дозволяє виявляти приховані зв'язки і отримувати якісно нові дані про досліджувані об'єкти (процеси, явища). Вбудована база даних ГІС дозволяє пов'язувати описову інформацію з об'єктами карти і створювати нові зв'язки, завдячую яким можна отримати уявлення, найбільш придатне для конкретних цілей. ГІС дозволяє інтегрувати інформацію для вирішення надскладних проблем, з якими стикається людство. Серед таких проблем можна назвати знищення лісів, кислотні дощі, прискорюваний процес урбанізації, перенаселеність, вплив змін глобального клімату, численні інші регіональні та локальні проблеми.

1.1.1. Функції просторового аналізу

Функції просторового аналізу призначені для здійснення просторового аналізу та моделюючих операцій над даними.

Характерною рисою будь-якої сучасної ГІС є свій набір функцій для створення запитів даних і набір функцій для опрацювання просторово-атрибутивної інформації. В той же час можна виділити низку основних функцій, притаманних практично кожній ГІС. Це перед усім організація вибору й об'єднання об'єктів згідно із заданими умовами, реалізація операцій обчислювальної геометрії, аналіз накладень, побудова буферних зон, мережевий аналіз тощо.

Копіювання паперових карт в електронній формі за допомогою сканера. Дає можливість переглядати карти на екрані й отримувати копії карт на плоттері з можливістю внесення необхідних змін у графічний компонент.

Комп'ютерний підхід до тематичного картографування. Множинність атрибутів, пов'язаних з одними і тими ж об'єктами, дає можливість для одного і того ж контурування отримувати множину карт різного тематичного вмісту.

Статистичний аналіз за атрибутами та просторовими об'єктами. Дозволяє розглянути ступені рівномірності (випадковості) розподілу об'єктів (процесів, явищ, характеристик) проведення просторових вимірів на об'єктах, побудову карт трендів, здійснювати просторову кореляцію, ступінь порушеності первинного біоценозу, моделювання процесів з побудовою їх математичних моделей.

Інтерактивний перегляд інформації в базі даних з включенням неформальних елементів аналізу її людиною дозволяє формулювати умови й обмеження для пошуку об'єктів та візуалізації знайдених об'єктів.

Вибір об'єктів за запитом. Запити формують вибірку різноманітних об'єктів (у тому числі й просторових) на підставі створених критеріїв. Запити формулюються мовою просторових взаємовідношень.

Заняти можна задавати як за допомогою клавіатури або маніпулятора "миша", виділивши певний об'єкт (кожен об'єкт містить метричну і атрибутивну інформацію), так і за допомогою розвинених аналітичних засобів (запити до СУБД). Прикладом найпростішої форми просторових запитів є отримання характеристик об'єкта, вказавши на нього курсором на екрані, і зворотна операція -

відтворення об'єктів із заданими значеннями атрибутів.

Узагальнення даних може проводитися за рівністю значень певного атрибута, зокрема для зонування території. Ще один спосіб групування - об'єднання об'єктів одного тематичного шару згідно з їх розташуванням усередині полігональних об'єктів інших тематичних шарів.

Геометричні функції. До них відносять виміри довжини прямої між двома заданими точками; вимір довжини кривої між двома заданими точками; вимір периметра полігона; вимір площі полігона; визначення найкоротшої відстані від заданої точки до полігона; визначення найкоротшої відстані між полігонами; розрахунки геометричних характеристик об'єктів або їх взаємного положення у просторі. При цьому використовуються формули аналітичної геометрії на площині і в просторі.

Оверлейні операції (топологічне накладення шарів, map overlay) є одними з найбільш поширених і ефективних засобів ГІС. У результаті накладення тематичних шарів утворюється інший додатковий шар у вигляді графічної композиції вихідних шарів. Враховуючи, що досліджувані об'єкти можуть відноситися до різних типів (точка, лінія, полігон), можливі різні форми аналізу: точка на точку, точка на лінію, точка на полігон. Найчастіше, як свідчить практика, аналізується суміщення полігонів. Оверлейні операції дозволяють вирішувати задачі районування території за комплексом ознак, здійснювати вибір оптимального місця розташування нового об'єкта тощо. ‘

Побудова буферних зон. Одним із засобів аналізу близькості об'єктів є побудова буферних зон. Буферні зони - це райони (полігони), границя яких розташована на певній відстані від межі вихідного об'єкта. Буферна зона як область, що обмежена еквідистантними лініями, може бути побудована при постійному значенні впливу різних факторів (проста буферизація), або в залежності від впливу певного фактора (буферизація із вагою) навколо об'єктів різної просторової локалізації:

- точкового об'єкта (об'єктів);
- лінійного об'єкта (об'єктів);
- площинного об'єкта (об'єктів).

Границі таких зон обчислюються на підставі аналізу відповідних атрибутивних характеристик. При цьому ширина буферної зони може бути як постійною, так і змінною. Наприклад, буферна зона навколо джерела електромагнітного випромінювання буде мати форму кола, а зона забруднення від димової труби заводу з урахуванням рози вітрів буде мати форму, наближену до еліпса.

Мережевий аналіз дозволяє користувачеві проаналізувати просторові мережі зв'язних лінійних об'єктів (дороги, лінії електропередач тощо). Мережевий аналіз слугує для задач пошуку найкоротшого шляху між двома точками мережі (за певним фактором, наприклад, за відстанню, часом, витраченими ресурсами); вибору оптимального (за різними факторами) маршруту на множині точок мережі (задача комівояжера); розподілу ресурсів і розміщення центрів мережі; пошук найближчого сусіда; визначення найбільш економічного шляху, визначення рівня навантаження на мережу, визначення адреси об'єкта або маршруту за певною адресою тощо.

Визначення топологічних характеристик геопростору (просторових відношень об'єктів): перетинання, примикання, вміст, включення, сусідство.

Виконання бульових операцій над об'єктами: об'єднання, перетинання, визначення відмінності (різниці) тощо.

Аналіз поверхонь: обчислення кутів нахилу, визначення ліній стоку; визначення експозиції схилів; побудова ізоліній і генерація профілів заданих перетинів; інтерполяція висот; визначення границь зон видимості/невидимості; моделювання мережі тальвегів і вододілів; обчислення об'ємів відносно заданої площини за моделлю рельєфу; контурування водозбірних басейнів; генерація тривимірних зображень; поєднання тривимірних і двовірних зображень.

Аналіз просторового розподілу об'єктів. Дозволяє здійснювати розстановку, порядок, визначати концентрацію або розосередженість, зв'язність або беззв'язність об'єктів, а також розглядати їх просторово- описові характеристики, наприклад, обчислити середній розмір населених пунктів у межах визначеної території, виконувати картографічне подання результатів.

Класифікація функцій ГІС не є строгим поділом на конкретні прикладні

сфери застосування, хоча певні зв'язки з конкретними задачами безумовно існують.

1.1.2. Класифікація просторового аналізу

Просторовий аналіз проводиться з метою:

- виявлення закономірностей або особливостей розподілу об'єктів та їх характеристик у просторі;
- виявлення взаємозв'язків у просторовому розподілі об'єктів;
- визначення тенденцій розвитку процесів (явищ) у просторі і в часі;
- вибору найбільш ефективного або найбільш раціонального управлінського рішення з урахуванням просторових характеристик.

При проведенні просторового аналізу використовуються тільки ті подання об'єктів реального світу, які можна реалізувати за допомогою моделей даних, закладених у ГІС.

ГІС використовують два підходи до опису простору:

- 1) структурований - виділення просторових об'єктів, зазначення характеру їх локалізації у просторі, границь і в деяких випадках взаємозв'язків з іншими об'єктами;
- 2) неструктурований (досліджуваний простір представляється множиною комірок заданого розміру і форми, у яких визначені усереднені параметри або характеристики, що відповідають цій частині простору).

Аналітичні засоби ГІС включають різноманітний інструментарій для проведення операцій з просторовими об'єктами. Відсутність єдиної класифікації породжує велику кількість різних трактувань і переліків, що відображують розмаїтість поглядів на сутність аналітичного процесу взагалі. Так, відома класифікація О. В. Кошкарьова і В. С. Тіку- нова [16] ранжує існуючі методи обробки просторових даних, дотримуючись звичайної послідовності дій, які виконуються аналітиком. Тобто все розмаїття просторових аналітичних операцій вони поділяють на:

- конвертування даних з формату у формат, з векторної форми у растрову і навпаки;
- трансформацію проекцій та їх перерахування в інші системи координат;
- методи обчислювальної геометрії;

- накладення шарів;
- аналітичні, графоаналітичні методи;
- методи моделювання.

При безперечній усеосяжності наведеної класифікації дещо неприродним здається об'єднання звичайних операцій з підготовки даних з власне аналітичними функціями. Дещо цікавіше сприймається класифікація Енді Мітчела [18], що являє собою не просто перелік аналітичного інструментарію, як попередня класифікація, але й підкреслює призначення кожного методу, причому у досить нетрадиційній, принаймні для нашого ока, формі. Таким чином, Енді Мітчел робить наголос на меті дослідження, а не на інструменті, яким її буде досягнуто. У запропонованому переліку [21] найпростіші методи аналізу в ГІС визначаються таким чином:

- пошук знаходження об'єктів;
- проведення ранжування (де “більше”, де “менше”);
- картографування щільності;
- пошук того, що всередині;
- пошук того, що поруч;
- картографування змін.

Математична обробка даних виконується при зверненні до стандартних пакетів прикладних програм, що входять до складу ГІС. Завдання користувача зводиться до правильного вибору методу (моделі), адекватної завданню, яке вирішується.

Просторовий аналіз дозволяє отримати реальні процеси динаміки об'єктів (явищ, процесів) шляхом розробки та застосування моделей. Моделі дозволяють виявити тенденції змін просторових даних, опрацювати цю інформацію і таким чином виробити нову інформацію. За допомогою ГІС цей процес суттєво удосконалюється, надаючи функції, які можуть комбінуватися різними послідовностями для наступної побудови нових моделей. Ці моделі дозволяють виявляти як нові, так і попередньо не усвідомлені (не виявлені, не знайдені) взаємозв'язки, як всередині наборів даних, так і між ними, удосконалюючи цим знання про реальний об'єкт або навколишнє середовище.

Результати аналізу можуть бути представлені як у вигляді карт, так і у

вигляді певних звітів або їх симбіозом. Як свідчить досвід, карти краще використати для відтворення просторових взаємозв'язків, а звіти для представлення атрибутивних даних і документування будь-яких обчислювальних даних.

Просторовий аналіз класифікують за:

- методами і результатами обробки (якісний і кількісний);
- способами обробки (автоматизований, статистичний, аналіз рядів (статистичних або часових));
- якісним рівнем аналізу даних (системний, узагальнений (іноді структурний), семантичний (змістовний), параметричний (оціночний);
- складністю (простий - виконання простих однокрокових перетворень і комплексний - виконання складного аналізу даних з використанням різних джерел інформації, складних перетворень і алгоритмів).

Розглянуті види аналізу можуть утворювати різні сукупності залежно від впливу або значення аспекту вивчення даних.

1.2. Алгоритм проведення просторового аналізу

1. Постановка задачі

Розв'язання будь-якої проблеми починається з її визначення. Розпочинаючи аналіз, слід визначити, яку саме інформацію необхідно отримати. Частіше це робиться у формі постановки питання, наприклад: “Скільки лісу росте в межах кожного басейну водозбору”?, “Які об'єкти потрапили у 500 метрову зону від магазину”? тощо [25].

Правильна постановка питання найчастіше допомагає визначити, як найкраще підійти до аналізу, який метод ефективніше використати і як найкраще представити результати дослідження. Від характеру проблеми залежить необхідна детальність розв'язання задачі, а це, у свою чергу, визначає витрати на отримання даних, придбання чи оренду програмних засобів та обчислювальних потужностей. Саме на цьому етапі формується відповідність між масштабом проблеми, що виникла, і засобами, необхідними для її розв'язання.

Інші фактори, що впливають на процес проведення аналізу: як і хто буде використовувати його результати. Одна справа, коли в процесі досліджень

зондуються дані, виявляючи особливості їх розподілу або поведінки. Зовсім інша - представлення результатів політичним діячам або для публічної дискусії, наукового огляду або будівництва. В таких випадках методи повинні бути більш досконалими, а результати більш обґрунтованими.

2. Оцінка вихідних даних.

Спеціаліст з ГІТ повинен чітко усвідомлювати, якою інформацією він володіє, а яку потрібно ще отримати або створити. Тип даних і об'єктів, з якими доведеться працювати, визначає специфіку методу, який найкраще використовувати. І навпаки, якщо вирішено використовувати конкретний метод для отримання інформації потрібної якості, необхідно забезпечити адекватний набір вихідних даних. Потрібно добре уявляти, яка інформація є в наявності і що ще необхідно отримати або створити.

Набір даних у ГІС, в тому числі і його атрибутивна частина, повинен володіти як просторовою, так і часовою повнотою. Крім того, набори даних повинні бути сумісними між собою. Наприклад, при накладанні двох карт їхні масштаби повинні бути однаковими, інакше результат такого оверлею буде абсурдним.

Для позначання сумісності дуже важливо використовувати однакові методи отримання, запису і корегування даних. При оцінці якості кожного окремого набору даних треба звертати увагу на його відповідність. Неоднозначність в даних може виникати, наприклад, при використанні різних джерел інформації або при цифруванні карт різними особами.

Придатність даних для вирішення тієї або іншої задачі визначається операціями обробки й аналізу, які повинні застосовуватися до цих даних. Так, дані про висоти рельєфу є абсолютно непридатними для розв'язання задачі інтерполяції за допомогою полігонів Тиссена, оскільки метод передбачає наявність різких стрибків функції, які відсутні у безперервній моделі рельєфу тощо.

Джерела помилок у ГІС поділяють на такі категорії:

- концептуальні помилки;
- помилки, що пов'язані з джерелами даних;
- помилки кодування даних;

- помилки, що пов'язані з корегуванням і перетворенням даних;
- помилки, що виникають на етапі обробки й аналізу даних;
- помилки при виведенні даних.

Концептуальні помилки. Помилки цього типу виникають при інтерпретації та моделюванні просторових об'єктів. Об'єкти можуть неоднаково сприйматися різними людьми і це буде проявлятися у даних. Якою б не була модель, що лежить в основі ГІС, вона є лише спрощеним уявленням реального світу, а отже, в ній містяться помилки, пов'язані з генералізацією об'єктів, неповнотою і частковою суперечливістю даних.

Помилки, що пов'язані з джерелами даних. Кожному джерелу просторових й атрибутивних даних притаманні свої характерні похибки. Наприклад, при польових дослідженнях виникають інструментальні похибки і похибки, пов'язані з людським фактором. У даних дистанційного зондування і на аерофотознімках можуть міститися похибки, пов'язані з неправильною просторовою прив'язкою або невірним дешифруванням. Крім того, джерелом похибки може слугувати мінливість деяких об'єктів у часі.

У найбільш часто використовуваному джерелі даних - картах, містяться як позиційні, так і тематичні похибки. Зазвичай вони виникають через технічні збої, неправильні дії оператора та недосконалість існуючих методів картографії.

Помилки кодування даних. Кодуванням даних називають процес їх перетворення у формат ГІС. Кодування даних є одним з головних джерел помилок. Цифрування карт також відноситься до процедур кодування. Незважаючи на автоматизацію цифрування, вона, як і раніше, включає значну частку ручної праці, що накладає відповідні обмеження і є одним з головних джерел помилок. Наприклад, перетворення плавної кривої на карті в її цифрове представлення пов'язане з вибором точок цифрування.

Помилки також можуть виникати через неточне суміщення аркушів карти або через недостатню розрізненість растрових сканерів, які застосовуються для автоматичного цифрування.

Помилки, що пов'язані з редагуванням і перетворенням даних. Дані, отримані в результаті ручного або автоматичного цифрування неминуче містять помилки, які

необхідно усунути. Пошук помилок - досить складний процес, однак їх можна усунути в процесі ретельної перевірки даних.

При використанні автоматизованих методів пошуку помилок у растрових ГІС виникають проблеми, пов'язані з “шумом” (помилковою класифікацією). Шум може бути регулярним і випадковим. Випадковий шум виявляється значно складніше.

Для усунення шуму використовується фільтрація, результатом якої є повторна класифікація точок растру. При цьому важливо обрати правильний фільтр, який би не порушував значущу інформацію.

Після редагування растрові дані можуть бути перетворені у векторні, а векторні - у растрові. При перетворенні растрових даних у векторні виникають топологічні неоднозначності.

При зворотному перетворенні істотне значення з позиції похибок мають розміри точки растру та метод їх растрування. Наприклад, через генералізацію даних можуть з'явитись помилки, пов'язані з класифікацією точок уздовж контуру векторного полігона, в результаті чого він набуде зубчатого вигляду на растровому зображенні.

Крім топологічних помилок, перетворення векторних карт у растрові веде до втрати невеличких полігонів і появи викривлень, що викликані випадковим зсувом і поворотом растру.

Іноді перетворення даних необхідно для імпорту в іншу систему. В таких випадках переведення бази даних ГІС з одного програмного пакета в інший може призвести до появи технічних помилок.

Помилки, що виникають на етапі обробки й аналізу даних. Перед тим, як приступити до обробки й аналізу даних у ГІС, необхідно переконатися в тому, що:

- дані відповідають меті дослідження;
- використовувані набори даних є сумісними між собою;
- обрана правильна методика аналізу даних.

У процесі обробки даних у ГІС помилки найчастіше виникають при виконанні класифікації даних, поєднанні або поділу площинних об'єктів, накладанні декількох шарів карти. Наприклад, при накладанні двох полігонів

уздовж їхніх границь можуть з'являтися “осколки” - невеличкі полігони, що виникають через неповне суміщення двох карт. Причиною утворення “осколків” можуть бути помилки, пов'язані з різним часом цифрування карт і помилками вхідних даних.

Помилки при виведенні даних. Неточності вихідних даних є неминучим наслідком тих похибок, які містяться у базі даних, і помилок, що виникають при обробці й аналізі даних. Ступінь цих неточностей залежить від того, наскільки ретельно виконувалась робота на кожному етапі створення бази даних ГІС (від її проектування до аналізу даних).

Час, що витрачається на аналітичне дослідження й оцінку вихідних даних, складає від 40 % до 80 % бюджету аналітичного процесу [17, 25]. Недостатній аналіз вихідних даних здатний завдати серйозних неприємностей досліднику, який не врахував їх. Саме тому оцінка вихідних даних є одним із найважливіших етапів аналітичного процесу.

Таким чином, тип даних і параметрів, доступних для проведення певного дослідження, значною мірою визначає як досягну точність, так і специфіку методу, який буде використаний. З іншого боку, потрібно забезпечити відповідний рівень вихідних даних.

3. Вибір методу аналізу.

Як свідчить досвід використання ГІС, майже завжди є декілька альтернативних способів отримання необхідної інформації. Найчастіше один метод є більш швидким, але дає дуже приблизну інформацію, інші методи вимагають більш детальних даних, значних зусиль і часу на обробку, але забезпечують при цьому більш точні результати. Компроміс полягає у тому, що необхідно обирати метод аналізу, виходячи з поставленої проблеми, витрат на неї і того, як будуть використовуватись у майбутньому результати аналізу. Наприклад, виконується оперативний аналіз розбійних нападів у місті для виявлення неблагополучних мікрорайонів. Можна просто оцінити ситуацію, відобразивши на карті окремі злочини. Якщо ж інформація готується як доказ для слідства або суду, то доведеться більш точно обґрунтувати місця, де напади в конкретний період часу траплялися частіше.

Більша детальність вихідних даних, необхідних для аналізу, означає збільшення витрат зусиль і часу на їх перевірку й обробку. Таким чином, завжди виникає дилема: оперативність або точність.

Оперативність - це мінімум вихідних параметрів, максимальна доступність і простота алгоритмів розрахунку (з перевагою власних функцій ГІС). Як наслідок, невисока точність результатів, отримання загальних характеристик досліджуваного процесу.

Точність, зазвичай, потребує істотних витрат часу і коштів на:

- отримання достовірної та повної вихідної інформації;
- адаптацію спеціалізованих систем моделювання або їхніх блоків;
- навчання персоналу роботі із спеціалізованими системами;
- спеціальні дослідження, спрямовані на перевірку адекватності створеної моделі.

4. Обробка даних

Як тільки метод аналізу буде обраний, необхідно вибудувати ланцюжок його реалізації засобами ГІС.

По-перше, треба визначити модель даних, яка буде застосовуватись для зображення тих або інших шарів вихідної інформації (прийняти рішення, які дані будуть використовуватись у векторній формі, а які - у растровій). Сучасні ГІС дозволяють інтегрувати в процесі аналізу обидва типи цих даних. У разі необхідності перетворення можна конвертувати растрові дані у векторні та навпаки за допомогою вбудованих у ГІС функцій переформатування.

Векторні дані та їх використання. Векторні дані зображують географічні явища у вигляді точкових, лінійних і полігональних об'єктів, для яких визначено місце розташування й межі. Векторні дані є найбільш зручними, коли необхідно зберігати точне місце розташування вихідного об'єкта, моделювати лінійну мережу або працювати з такими межами, як кордон між двома країнами.

Растрові дані та їх використання. Растрові дані зображують просторові об'єкти (процеси, явища) за допомогою дискретних комірок, у яких зберігаються значення вихідного об'єкта. Комірки утворюють сітку, яка у кожній комірці має числове значення. Точне місце розташування кожної комірки визначається

порядковим номером її рядка та стовпчика у сітці, розміром комірок і координатами початкової точки.

По-друге, після обрання типу даних необхідно вибрати засоби їх обробки. Іноді можна обмежитися власними засобами ГІС, а при їх нестачі - звернутися до зовнішніх проблемно-орієнтованих модулів.

1.3. Автоматизовані методи аналізу й обробки даних

На сьогодні ГІС широко використовуються в усіх сферах життєдіяльності держави, суспільства, науки, при виникненні надзвичайних ситуацій (НС), у військовій сфері, в органах влади, нафтогазовій галузі, геології, екології, соціології. Особливо необхідні технології ГІС при НС: повенях, лісових пожежах, розливах нафти на морі і на суші, вибухах, терактах тощо. ГІС дозволяє оперативно створювати карти місцевості, де відбулася НС, оптимізувати використання сил і засобів з ліквідації наслідків НС, забезпечуючи надання необхідної просторової інформації для проведення рятувальних і реабілітаційних робіт, моделювання наслідків НС тощо.

Не менш важливе значення ГІС має для адміністративного управління містом, областю, регіоном, державою. Середовище ГІС дозволяє контролювати оперативну обстановку, життєдіяльність об'єкта за обраними показниками, які визначають тематичні шари карти, наприклад, санітарно-епідеміологічну обстановку, екологічні і надзвичайні ситуації, об'єктове господарство, суспільний порядок та безпеку громадян, дорожньо-транспортну обстановку, протипожежну безпеку, стан торгівлі, побутового обслуговування тощо, за якими на керованому об'єкті можуть виникнути проблеми.

Інтеграція технологій ГІС із сучасними системами управління базами даних, технологією сховищ даних значно підвищує якість систем підтримки прийняття рішень в усіх сферах діяльності. Така інтеграція дає можливість створення потужних аналітичних інструментів для роботи як з просторовими, так і непросторовими даними. Візуальне подання просторових даних на електронній карті дає можливість відразу побачити цілісну картину, сформовану за даними з бази даних чи сховища даних. Та якщо маємо сукупність взаємозв'язаних об'єктів, то відображення цих об'єктів на карті, надання у реальному часі інформації про

кожне із них з бази даних за різними показниками (у вигляді діаграм, таблиць, графіків тощо) дає можливість оцінити ефективність роботи цих об'єктів. На базі інформації, яка зберігається у сховищах даних, ГІС може оперативно виявити тенденції змін показників у часі, визначити динаміку розвитку характеристик об'єктів. При такому підході ГІС не зберігає предметно-орієнтовану інформацію, а є лише процесором централізованого зберігання й управління просторовою інформацією. А це дозволяє досягти гармонійного використання двох систем: СУБД і ГІС, усунути надлишок інформації та запобігти конфліктним ситуаціям, пов'язаних із невідповідністю даних.

Отже, використання ГІС у системах підтримки прийняття рішень, у тому числі і в ситуаційних центрах (СЦ), надає нові можливості, що зменшують інтелектуальне навантаження на користувача і внаслідок цього підвищують ефективність роботи системи.

Однією із сучасних тенденцій розвитку ГІС є підвищення інтелектуальності як ГІС, так і ГІТ. Перспективність застосування ГІТ для підвищення інтелектуальності ГІС визначається можливостями:

- ГІС на сьогодні є новим напрямом інформаційних технологій і досвід їх використання немає негативних наслідків;
- ГІС дозволяє у наочній формі відобразити стан і поведінку об'єктів;
- ГІС надає інформацію та засоби її обробки у доступній природній формі у вигляді схем, карт, зображень з можливістю виконувати просторовий вибір об'єктів і використовувати оригінальні методи аналізу;
- ГІС надає можливість у зручному для користувача вигляді показати просторовий розподіл об'єктів, ситуацію на об'єкті чи місцевості у різних масштабах, максимально наближених до реального світу;
- ГІС надає можливості інтерпретації інформації через візуальне зображення (подання);
- ГІС підтримує всі сучасні інформаційні інновації: розподілені обчислення, високу інтерактивність, відкриті системи.

Таким чином, ГІС додає нову якість опису об'єктів і надає користувачу нові функції для роботи з ними, а саме:

- інформацію про просторове положення об'єктів;
- просторові зв'язки об'єктів, які відображаються через їх топологічні зв'язки;
- віддалене (із зовнішніх БД) подання інформації про об'єкти, яке може змінюватися залежно від зміни параметрів об'єктів;
- просторовий аналіз;
- облік і паспортизацію об'єктів - опис їх точного місцезнаходження, просторових, технологічних та інших характеристик;
- оцінку стану об'єктів;
- швидкий пошук об'єктів по карті і швидкий доступ до інформації про них.

РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ТА АНАЛІЗУ ТРІАНГУЛЯЦІЇ

2.1. Тріангуляція Делоне. Основні визначення

Вперше завдання побудови тріангуляції Делоне було поставлено у 1934 р. у роботі радянського математика Б.М. Делоне [34].

Тріангуляцією називається планарний граф, всі внутрішні області якого є трикутниками (Рис. 2.1). **Опуклою тріангуляцією** називається така тріангуляція, для якої мінімальний багатокутник, що охоплює всі трикутники, буде опуклим. Тріангуляція, яка не є опуклою, називається **неопуклою**.

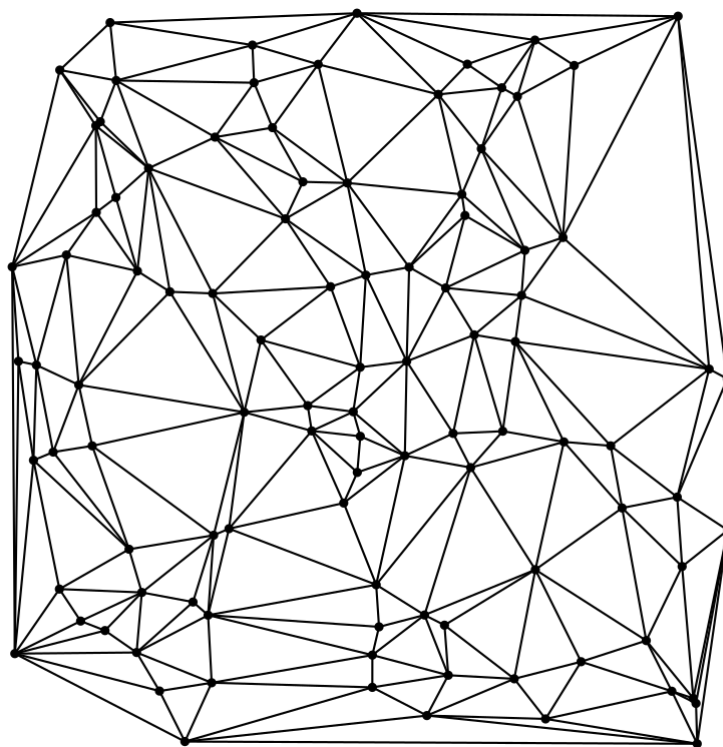


Рис. 2.1. Приклад тріангуляції

Завданням побудови тріангуляції по заданому набору двовимірних точок називається завдання з'єднання заданих точок відрізками, що не перетинаються так, щоб утворилася тріангуляція. Завдання побудови тріангуляції за вихідним набором точок є неоднозначним, тому виникає питання, яка з двох різних тріангуляцій краща? **Тріангуляція називається оптимальною**, якщо сума довжин всіх ребер мінімальна серед усіх можливих тріангуляцій, побудованих за тими самими вихідними точками.

Одним із перших було запропоновано наступний алгоритм побудови тріангуляції, що називається «жадібним». Опишемо його покроково.

Крок 1. Генерується список всіх можливих відрізків, що з'єднують пари вихідних точок, який сортується за довжинами відрізків.

Крок 2. Починаючи з найкоротшого, послідовно виконується вставка відрізків у триангуляцію. Якщо відрізок не перетинається з іншими раніше вставленими відрізками, він вставляється, інакше він відкидається.

Триангуляція називається «жадібною», якщо вона побудована за «жадібним» алгоритмом. У зв'язку з великою трудомісткістю даний алгоритм практично майже не застосовується. Крім оптимальної і жадібної триангуляції, також широко відома *триангуляція Делоне*, що має низку практично важливих властивостей [15, 16].

Триангуляція задовольняє **умові Делоне**, якщо всередину кола, описаного навколо будь-якого побудованого трикутника, не потрапляє жодна із заданих точок триангуляції. Триангуляція називається **триангуляцією Делоне**, якщо вона є опуклою і задовольняє умові Делоне (Рис. 2.2).

Пара сусідніх трикутників триангуляції задовольняє умові Делоне, якщо цій умові задовольняє триангуляція, складена лише з двох трикутників. Трикутник триангуляції задовольняє умові Делоне, якщо цій умові задовольняє триангуляція, складена тільки з цього трикутника та трьох його сусідів (якщо вони існують).

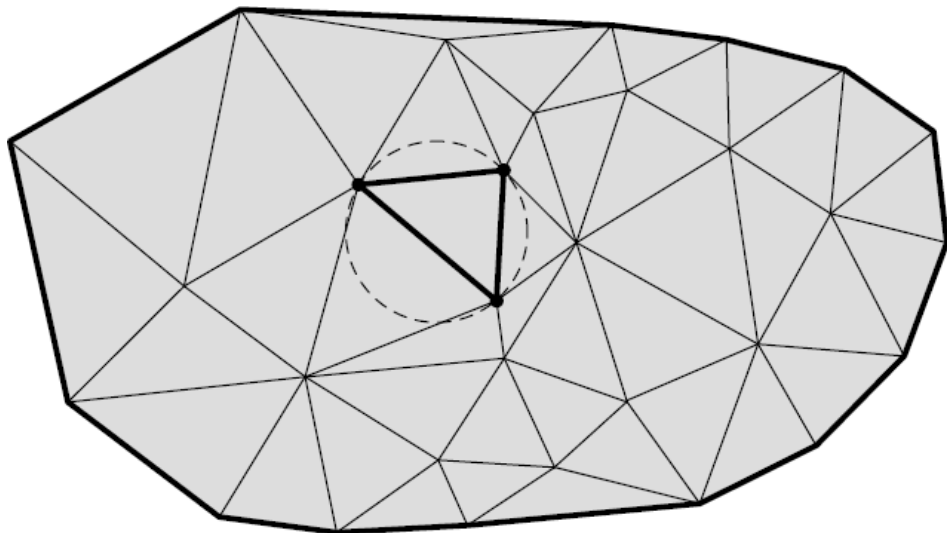


Рис. 2.2. Триангуляція Делоне з відображенням умови Делоне

Триангуляція Делоне вперше з'явилася у науковому світі як граф, двоїстий до *діаграми Вороного* – одній з базових структур обчислювальної геометрії.

Сукупність багатокутників Вороного утворює розбиття площини, що

представляє векторну мережу. *Діаграмою Вороного* заданої множини точок $P_1, \dots, P_N$ називається сукупність всіх багатокутників Вороного цих точок (Рис.2.3, а). Діаграми Вороного також іноді називають *розбиттям Тіссена та осередками (комірками) Діріхле*. Однією з основних властивостей діаграми Вороного є її двоїстість триангуляції Делоне [28]. Зокрема, з'єднавши відрізками ті вихідні точки, чий багатокутники Вороного стикаються хоча б кутами, ми отримаємо триангуляцію Делоне (Рис. 2.3, б).

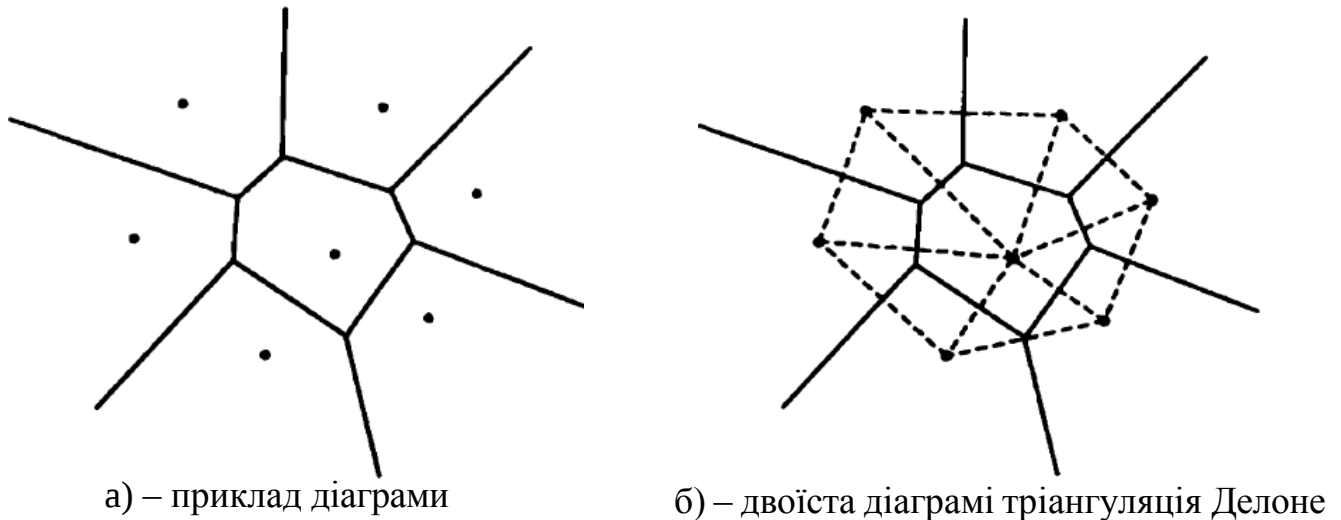


Рис. 2.3. Діаграми Вороного

Багато алгоритмів побудови триангуляції Делоне використовують наступну теорему [13].

Теорема 1: триангуляцію Делоне можна отримати з будь-якої іншої триангуляції за тією ж системою точок, послідовно перебудовуючи пари сусідніх трикутників ABC і BCD , що не задовольняють умові Делоне, у пари трикутників ABD і ACD (Рис. 2.4). Така операція перебудови також часто називається *фліпом*.

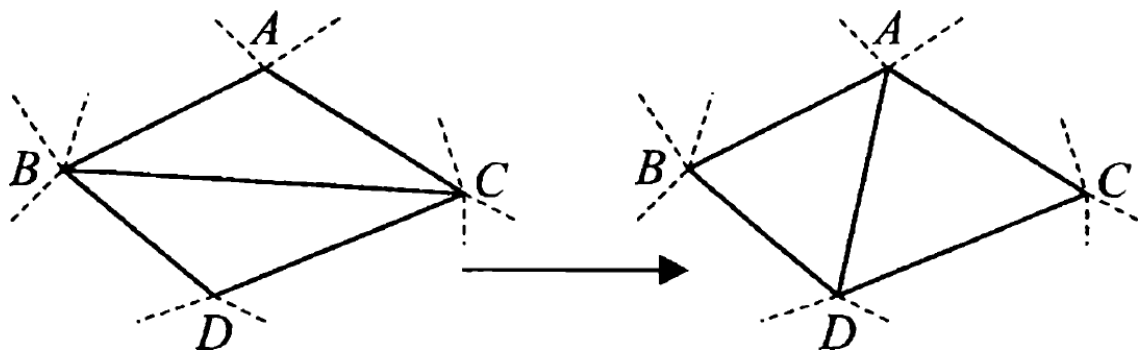


Рис. 2.4. Перебудова трикутників, які не задовольняють умові Делоне

Наведена теорема дозволяє будувати триангуляцію Делоне послідовно,

побудувавши спочатку деяку триангуляцію, та послідовно покращуючи її до виконання умови Делоне. При перевірці умови Делоне для пар сусідніх трикутників можна використовувати безпосередньо вищенаведене визначення умови Делоне, але іноді застосовують інші способи, що ґрунтуються на наступних теоремах [13, 14, 18].

Теорема 2. Триангуляція Делоне має максимальну суму мінімальних кутів всіх своїх трикутників серед усіх можливих триангуляцій.

Теорема 3. Триангуляція Делоне має мінімальну суму радіусів кіл, описаних навколо трикутників, серед усіх можливих триангуляцій.

У цих теоремах фігурує сумарна характеристика всієї триангуляції (сума мінімальних кутів або сума радіусів), оптимізуючи яку в парах суміжних трикутників, можна отримати триангуляцію Делоне.

2.2. Перевірка умови Делоне

Однією з найважливіших операцій, що виконуються під час побудови триангуляції, є перевірка умови Делоне для заданих пар трикутників. На основі визначення триангуляції Делоне і теореми 2 практично зазвичай використовують кілька способів перевірки:

1. Перевірка через рівняння описаного кола.
2. Перевірка із заздалегідь обчисленим описаним колом.
3. Перевірка суми протилежних кутів.
4. Модифікована перевірка суми протилежних кутів.

2.2.1. Перевірка через рівняння описаного кола

Рівняння кола, що проходить через точки $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, можна записати у вигляді:

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 + y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$\text{або як } (x^2 + y^2)a - x \cdot b + y \cdot c - d = 0,$$

де

$$a = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad b = \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & y_3 & 1 \end{vmatrix},$$

$$c = \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad d = \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}.$$

Тоді умова Делоне для будь-якого заданого трикутника

$((x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3))$ виконуватиметься лише тоді, коли для будь-якого вузла (x_0, y_0) триангуляції буде більше рівне 0, тобто коли (x_0, y_0) не потрапляє всередину кола, описаного навколо трикутника. Для спрощення обчислень можна помітити, що якщо трійка точок $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ є правою (тобто обхід їх у трикутнику виконується за годинниковою стрілкою), то завжди $\text{sgn } a = -1$ і навпаки, якщо трійка ця ліва, то $\text{sgn } a = 1$. Тут визначена Signum-функція:

$$\text{sgn } a = \begin{cases} 1, & a > 0 \\ 0, & a = 0 \\ -1, & a < 0 \end{cases}.$$

Безпосередня реалізація такої процедури перевірки вимагає 29 операцій множення та зведення в квадрат, а також 24 операцій складення та віднімання. Цю схему обчислень можна удосконалити. Перемістимо систему координат на x та y по горизонталі та вертикалі відповідно. Тоді рівняння кола перепишеться у вигляді:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 & x_1 - x & y_1 - y & 1 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 & x_2 - x & y_2 - y & 1 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 & x_3 - x & y_3 - y & 1 \end{vmatrix} = 0,$$

що рівносильно такому запису:

$$\begin{vmatrix} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 & x_1 - x & y_1 - y \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 & x_2 - x & y_2 - y \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 & x_3 - x & y_3 - y \end{vmatrix} = 0.$$

Перевірка на основі цієї модифікованої формули вимагає вже лише 15 операцій множення та зведення в квадрат, а також 14 операцій складання та віднімання.

2.2.2. Перевірка із заздалегідь обчисленим описаним колом

Попередній варіант перевірки потребує значної кількості арифметичних операцій. У більшості алгоритмів триангуляції кількість перевірок умови багаторазово (у різних алгоритмах це число коливається від 2 до 25 і більше) перевищує загальну кількість різних трикутників, які були присутні у триангуляції на різних кроках її побудови. Тому основна ідея алгоритму перевірки через заздалегідь обчислені кола полягає в попередньому обчисленні для кожного побудованого трикутника центру і радіуса описаного навколо нього кола, після чого перевірка умови Делоне буде зводитись до обчислення відстані до центру цього кола та порівняння результату з радіусом.

Реалізація такої процедури перевірки вимагає для кожного трикутника 36 операцій множення, зведення в квадрат і поділу, а також 22 операцій складання та віднімання. На етапі безпосереднього виконання перевірок потрібно лише 2 зведення в квадрат, 2 віднімання, 1 додавання та 1 порівняння. Тепер зауважимо, що для кожного трикутника знати параметри описаного кола і не обов'язково. Перевірка умови Делоне завжди виконується для певної пари трикутників, а тому достатньо знати коло лише одного з цих трикутників. Тоді обчислюватимемо параметри описаного кола лише в тому випадку, якщо в парі трикутників, що аналізуються, ще не обчислено жодне коло. При такому підході в середньому на (25-45) % (залежно від алгоритму триангуляції, що використовується) зменшується кількість трикутників, для яких необхідно обчислити описані кола.

Таким чином, в середньому на один трикутник потрібно 22–27 операцій типу множення та 13–17 операцій типу додавання. Якщо прийняти, що алгоритм триангуляції витрачає в середньому по 5 перевірок на кожен трикутник, то в

середньому цей спосіб перевірки вимагає близько 6-7 операцій типу множення та 6 операцій типу додавання. Якщо алгоритм витрачає в середньому по 12 перевірок на кожен трикутник, то відповідно по 4 тій та іншій операції. Точна ж оцінка середньої кількості операцій має виконуватися для конкретного алгоритму тріангуляції та типових видів вихідних даних.

2.2.3. Перевірка суми протилежних кутів

У роботі [17, 18] показано, що умова Делоне для даного трикутника буде виконуватися тільки тоді, коли для будь-якої іншої точки (x_0, y_0) тріангуляції $\alpha + \beta \leq \pi$.

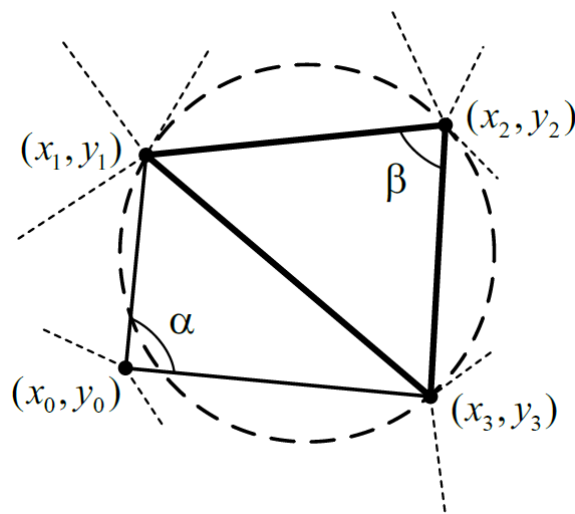


Рис. 2.5. Перевірка умови Делоне за сумою протилежних кутів

Ця умова еквівалентна рівності $\sin(\alpha + \beta) \geq 0$, тобто: $\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \geq 0$. Значення синусів та косинусів кутів можна обчислити через скалярні добутки векторів:

$$\cos \alpha = \frac{(x_0 - x_1)(x_0 - x_3) + (y_0 - y_1)(y_0 - y_3)}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2}},$$

$$\cos \beta = \frac{(x_2 - x_3)(x_2 - x_1) + (y_2 - y_3)(y_2 - y_1)}{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}},$$

$$\sin \alpha = \frac{(x_0 - x_1)(y_0 - y_3) - (x_0 - x_3)(y_0 - y_1)}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2}},$$

$$\sin \beta = \frac{(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}},$$

Підставивши формули (2.7)-(2.10) у формулу (2.6) і скоротивши знаменники дробів, отримаємо таку формулу перевірки:

$$\begin{aligned} & \left((x_0 - x_1)(y_0 - y_3) - (x_0 - x_3)(y_0 - y_1) \right) \cdot \left((x_0 - x_1)(y_0 - y_3) - (x_0 - x_3)(y_0 - y_1) \right) + \\ & + \left((x_0 - x_1)(x_0 - x_3) - (y_0 - y_1)(y_0 - y_3) \right) \cdot \left((x_2 - x_3)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3) \right) \geq 0 \end{aligned}$$

Безпосередня реалізація такої процедури перевірки вимагає 10 операцій множення, а також 13 операцій додавання та віднімання.

2.3. Алгоритми побудови тріангуляції Делоне

На даний час відома значна кількість різних алгоритмів побудови тріангуляції Делоне. Наведено класифікацію основних із них. Крім цих алгоритмів, існують і інші, менш відомі, але вони мають гірші характеристики.

1. Ітеративні алгоритми.

1.1. Простий ітеративний алгоритм.

1.1.1. Ітеративний алгоритм «Видаляй і будуй».

1.2. Ітеративні алгоритми з індексуванням пошуку трикутників.

1.2.1. Ітеративний алгоритм із індексуванням трикутників R-деревом.

1.2.2. Ітеративний алгоритм із індексуванням центрів трикутників 2D-деревом.

1.2.3. Ітеративний алгоритм із індексуванням центрів трикутників квадро деревом.

- 1.3. Ітеративні алгоритми з кешуванням пошуку трикутників.
 - 1.3.1. Ітеративний алгоритм зі статичним кешуванням пошуку.
 - 1.3.2. Ітеративний алгоритм з динамічним кешуванням пошуку.
- 1.4. Ітеративні алгоритми зі зміненим порядком додавання точок.
 - 1.4.1. Ітеративний смуговий алгоритм.
 - 1.4.2. Ітеративний квадратний алгоритм.
 - 1.4.3. Ітеративний алгоритм із пошаровим згущенням.
 - 1.4.4. Ітеративний алгоритм із сортуванням вздовж кривої, що заповнює площину.
 - 1.4.5. Ітеративний алгоритм із сортуванням за Z-кодом.
2. Алгоритми злиття.
 - 2.1. Алгоритм «Поділяй і володарюй».
 - 2.2. Рекурсивний алгоритм із розрізанням по діаметру.
 - 2.3. Смугові алгоритми злиття.
 - 2.3.1. Алгоритм опуклого смугового злиття.
 - 2.3.2. Алгоритм неопуклого смугового злиття.
3. Двопрохідні алгоритми.
 - 3.1. Двопрохідні алгоритми злиття.
 - 3.1.1. Алгоритм "Поділяй і володарюй".
 - 3.1.2. Рекурсивний алгоритм із розрізанням по діаметру.
 - 3.1.3. Алгоритм опуклого смугового злиття.
 - 3.1.4. Алгоритм неопуклого смугового злиття.
 - 3.2. Модифікований ієрархічний алгоритм.
 - 3.3. Лінійний алгоритм.
 - 3.4. Вієрний алгоритм.
 - 3.5. Алгоритм рекурсивного розщеплення.
 - 3.6. Стрічковий алгоритм.
4. Покрокові та інші алгоритми.
 - 4.1. Покроковий алгоритм.
 - 4.2. Покрокові алгоритми із прискоренням пошуку сусідів Делоне.
 - 4.2.1. Покроковий алгоритм із 2D-деревом пошуку.

4.2.2. Клітковий покроковий алгоритм.

4.3. Алгоритм побудови через тривимірні опуклі оболонки.

У цілому нині з усієї безлічі представлених алгоритмів з досвіду найкраще зарекомендував себе алгоритм динамічного кешування. Приблизно так само добре працює алгоритм пошарового згущення. Що важливо, обидва ці алгоритми відносно легко програмуються.

2.4. Ітераційні алгоритми побудови тріангуляції Делоне

Усі ітераційні алгоритми мають у своїй основі дуже просту ідею послідовного додавання точок до частково побудованої тріангуляції Делоне. Суть полягає в наступному.

Дано безліч N точок.

Крок 1.

На перших трьох початкових точках будуємо один трикутник (передбачається, що точки не лежать на одній прямій, інакше треба вибрати інші точки).

Крок 2. У циклі по n для решти точок виконуємо кроки 3-5.

Крок 3. Чергова n -на точка додається до вже побудованої структури тріангуляції наступним чином. Спочатку проводиться локалізація точки, тобто знаходиться трикутник (побудований раніше), до якого попадає чергова точка. Або якщо точка не потрапляє всередину тріангуляції, знаходиться трикутник на межі тріангуляції, найближчий до чергової точки.

Крок 4. Якщо точка потрапила на раніше вставлений вузол тріангуляції, то така точка зазвичай відкидається, інакше точка вставляється в тріангуляцію у вигляді нового вузла. При цьому якщо точка потрапила на деяке ребро, воно розбивається на два нових, а обидва суміжні з ребром трикутника також діляться на два менших. Якщо крапка потрапила строго всередину якогось трикутника, він розбивається на три нових. Якщо точка потрапила поза тріангуляцією, то будується один чи більше трикутників.

Крок 5. Проводяться локальні перевірки новостворених трикутників на відповідність умові Делоне та виконуються необхідні перебудови. Кінець алгоритму.

Складність даного алгоритму складається з трудомісткості пошуку трикутника, в який на черговому кроці додається точка, трудомісткості побудови нових трикутників, а також трудомісткості відповідних перебудов структури триангуляції в результаті незадовільних перевірок пар сусідніх трикутників отриманої триангуляції.

При побудові нових трикутників можливі дві ситуації, коли крапка, що додається, потрапляє або всередину триангуляції, або поза нею. У першому випадку будуються нові трикутники і число виконуваних алгоритмом дій фіксовано. У другому необхідна побудова додаткових зовнішніх до поточної триангуляції трикутників, причому їх кількість може в гіршому випадку дорівнювати $n - 1$, де n – число точок у поточній триангуляції. Однак, за всі кроки роботи алгоритму буде додано не більше $3N$ трикутників, де N – загальна кількість початкових точок.

Щоб дещо спростити алгоритм, можна взагалі позбутися другого випадку, попередньо додавши до триангуляції кілька таких додаткових вузлів, що побудована ними триангуляція свідомо накриє всі вихідні точки триангуляції. Така структура зазвичай називається *суперструктурою*. На практиці для суперструктури зазвичай вибирають варіанти, показані на Рис. 2.6.

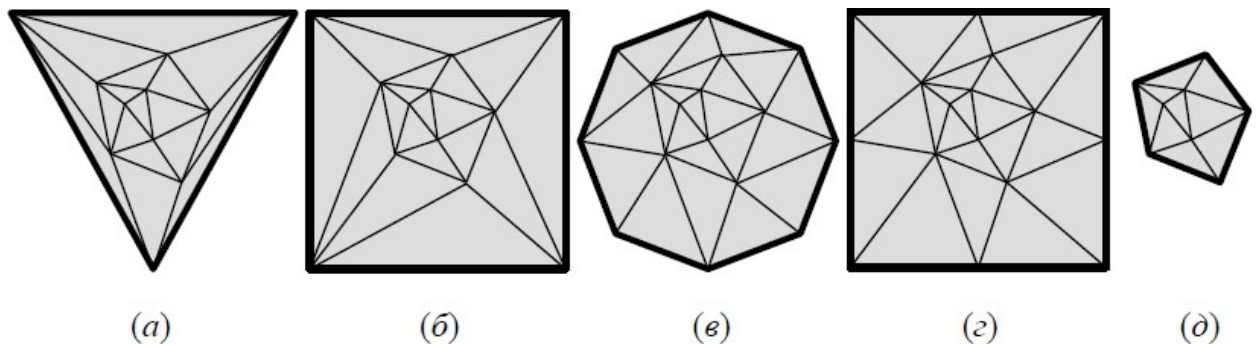


Рис. 2.6. Варіанти суперструктур: а – трикутник; б – квадрат; в – точки на колі; г – крапки на квадраті; д – опукла оболонка

Будь-яке додавання нової точки до триангуляції теоретично може порушити умову Делоне, тому після додавання точки зазвичай одразу проводиться локальна перевірка триангуляції на умову Делоне. Ця перевірка повинна охопити всі новостворені трикутники і сусіди з ними. Кількість таких перебудов у гіршому випадку може бути дуже великою, що, по суті, може призвести до повного перебудови всієї триангуляції.

Найбільший внесок у трудомісткість ітераційного алгоритму дає процедура пошуку чергового трикутника. Саме тому всі ітеративні алгоритми побудови триангуляції Делоне відрізняються майже процедурою пошуку чергового трикутника.

РОЗДІЛ 3. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ГЕОПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТРІАНГУЛЯЦІЇ

3.1. Місія SRTM як джерело висотних даних

Для використання тріангуляції у задачах геопросторового аналізу необхідно вибрати предметну область (територію дослідження) та висотні дані, за якими будуватиметься TIN.

В якості території дослідження виберемо Рівненську область, а в якості джерела висотних даних – дані ДЗЗ місії SRTM.

SRTM – місія космічного корабля багаторазового використання Endeavor (США) за багатодетальною радарною зйомкою рельєфу Землі між 54° південної широти і 60° північної широти на початку 2000 р. [3]. Розглянемо більш детально цю місію.

У лютому 2000 року Національним управлінням США з аеронавтики та дослідження космічного простору (NASA) було проведено радарну топографічну зйомку більшої частини території Землі, за винятком найпівнічніших (> 60), найпівденніших широт (> 54), а також океанів. За допомогою проекту SRTM було зібрано висотні дані про у різних областях Землі. Дані ДЗЗ SRTM доступні у вільному доступі в Інтернеті [20]. Вони мають свій власний формат .hgt, який підтримується декількома поширеними пакетами ГІС. Вихідні дані розповсюджуються квадратами розміром $1^\circ \times 1^\circ$, при максимальній доступній розрізненості 1 арксекунда. Файли мають назву відповідно до їхнього географічного розташування – значення широти та довготи градуса. Кожен квадрат складається з даних регулярної ґратки – точок через кожні 30 м зі значеннями висоти в кожній з них [11].

Таким чином, маючи вхідні дані матриці висот (широти, довготи, висоту) стає реально здійсненням завдання створення максимально наближеної до дійсності ЦМР. Ця модель являтиме собою регулярну мережу висот, тобто сітку GRID, яка має свої недоліки. Насамперед, це великий обсяг даних. Чим менший обраний крок, тим точніше ЦМР – вище просторова розрізненість моделі, але тим

більше кількість вузлів сітки, отже, більше часу потрібно на розрахунок ЦМР [29]. TIN, яка розглядається в даній роботі, вирішує цю проблему. В нерегулярній триангуляційній мережі TIN вузлам та ребрам трикутної мережі відповідають вихідні та похідні атрибути цифрової моделі. При побудові TIN- моделі дискретно розташовані точки з'єднуються лініями, що утворюють трикутники. Кожен трикутник задається висотами трьох його вершин, зазвичай представляється як площина і крім інформації про висоту має атрибути кута нахилу та експозиції, що дозволяє швидко побудувати на базі однієї моделі TIN декілька тематичних карт – гіпсометричну, ухилів, експозицій [19].

Перехід від однієї моделі, тобто SRTM GRID, до іншої, тобто TIN, вирішує один із головних недоліків – «надмірність» інформації. У мережі TIN на рівнинах можна прибрати точки, що мають близьке значення висоти, і, таким чином, плоскі ділянки моделюватимуться невеликою кількістю величезних трикутників, а на ділянках крутих уступів, там, де необхідно детально показати всі межі рельєфу, залишається більше точок (а іноді навіть і додають) і поверхня відображається багаточисельними маленькими трикутниками ближче до дійсності.

Для території дослідження завантажуюмо дані ДЗЗ SRTM, що являють собою ЦМР території дослідження у форматі регулярної сітки GRID. Для цього використовуємо сайт Геологічної служби США [20], (Рис. 3.1).

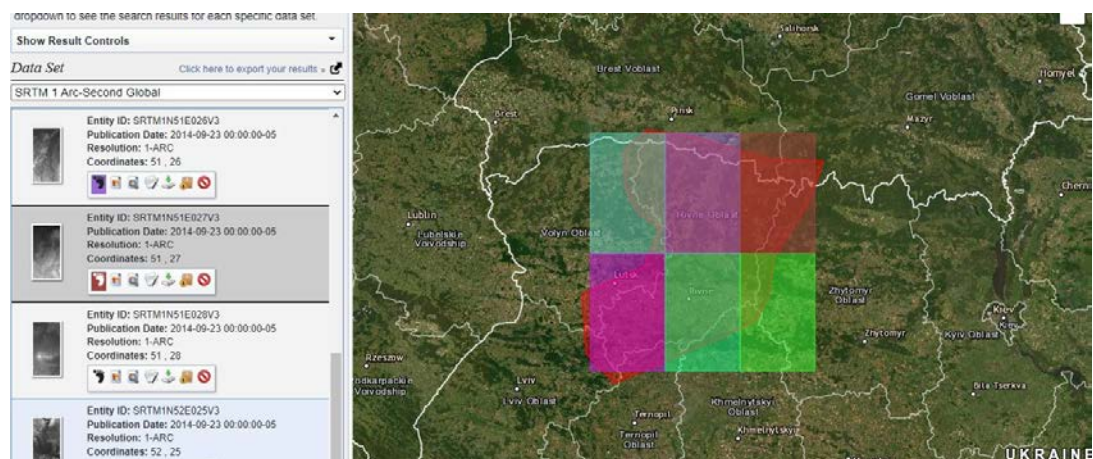


Рис. 3.1. Завантаження даних SRTM на територію Рівненської області

Для обробки просторових даних і роботи з TIN будемо використовувати програмне забезпечення ArcGIS 10.8.

З сайту [20] було завантажено 6 фрагментів (тайлів, tiles) SRTM у форматі GEOTIFF, у СК WGS 1984, перелік яких подано в Таблиця 3.1.

Вихідні тайли SRTM

Entity ID	Координати центру (широта, довгота)	Розмір комірки	Глибина пікселя
SRTM1N50E025V3	50 , 25	1×1 arcsec	16 біт signed (зі знаком)
SRTM1N50E026V3	50 , 26		
SRTM1N50E027V3	50 , 27		
SRTM1N51E025V3	51 , 25		
SRTM1N51E026V3	51 , 26		
SRTM1N51E027V3	51 , 27		

Після завантаження даних і додавання файлів у документ карти ArcGIS (Рис. 3.2), наступними операціями є створення мозаїки (інструмент «Мозаїка в новий растр») з вирівнюванням по тону всіх початкових растрів (опція MATCH мозаїки). При застосуванні опція MATCH мозаїки при складанні мозаїки приймаються до уваги всі кольорні карти тайлів. Якщо всі можливі значення вже використані (по бітовій глибині), додаткові значення будуть замінені максимально близькі кольору з доступних.

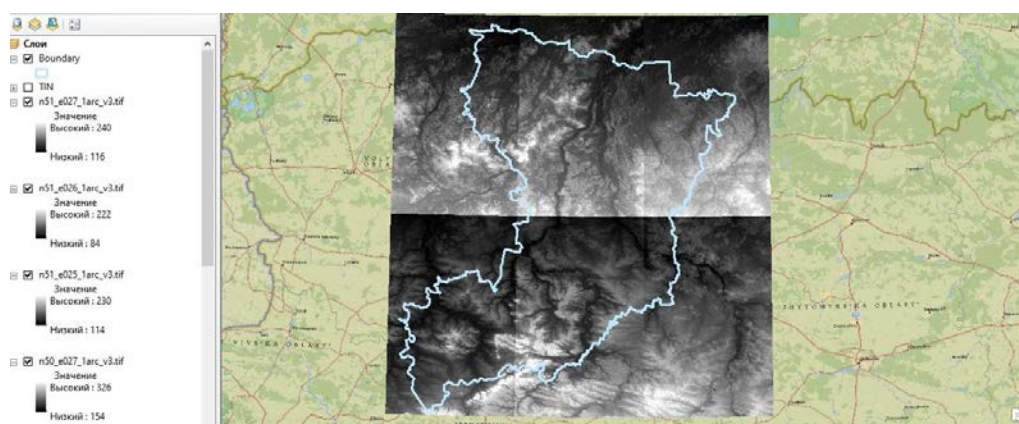


Рис. 3.2. Тайли SRTM

Просторові об'єкти у форматі .shp завантажуюмо з сайту [19].

Далі виконуємо обрізання растру мозаїки полігональним просторовим об'єктом, що відповідає території дослідження, та перерахунок в СК проекції UTM 35N, датум WGS 84.

На сайті [20] вказано, що дані про висоти SRTM представлені із заповненими порожнинами з розрізненністю 1 кутова секунда (30 метрів), але деякі плитки можуть все ще містити порожнечі. Тому наступним кроком є заповнення можливих локальних порожнин («фіктивних депресій»). Для цього використаємо

інструмент ArcGIS «Заповнити (Fill)». Цей інструмент застосовується під час створення ЦМР із заповненням локальних понижень, видалення помилок і неточностей, властивих вихідним даним. Локальні зниження (і піки) часто являють собою невеликі помилки, що виникають через розрізненість даних або округлення висот до найближчого цілого значення.

Після цих операцій дані ДЗЗ SRTM на територію Рівненської області виглядають так, як показано на Рис. 3.3.

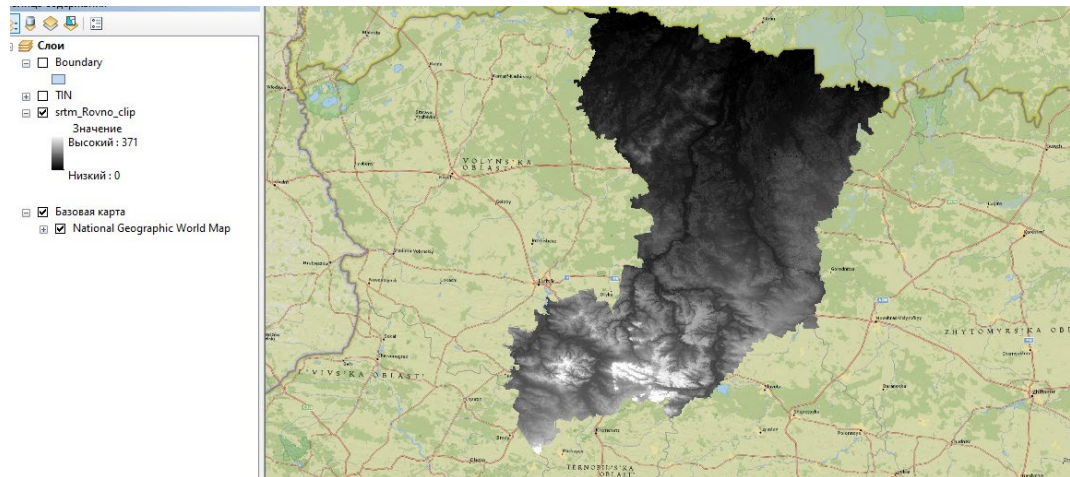


Рис. 3.3. SRTM на територію Рівненської області в програмі ArcGIS

Просторові дані, показані на Рис. 3.3, є початковими даними для подальшої побудови TIN і використанні її в задачах геопросторового аналізу.

3.1.1. Побудова тріангуляції TIN в ArcGIS

Отже, з отриманої на попередньому кроці ЦМР Рівненської області за даними SRTM побудуємо TIN. Для цього використаємо інструмент Растр в TIN (Raster To TIN) модуля 3D Analyst програмного забезпечення ArcGIS 10.8.

Інструмент Растр в TIN (Raster To TIN), роботу якого схематично показано на Рис. 3.4, призначений для створення нерегулярної тріангуляційної мережі, поверхня якої не відхиляється від вихідних растрових даних більше, ніж на зазначений допуск Z. Інструмент геообробки Растр в TIN (Raster To TIN) часто використовується для конвертації растру ЦМР, отриманого Геологічною службою США (USGS DEM), у поверхню TIN [1].

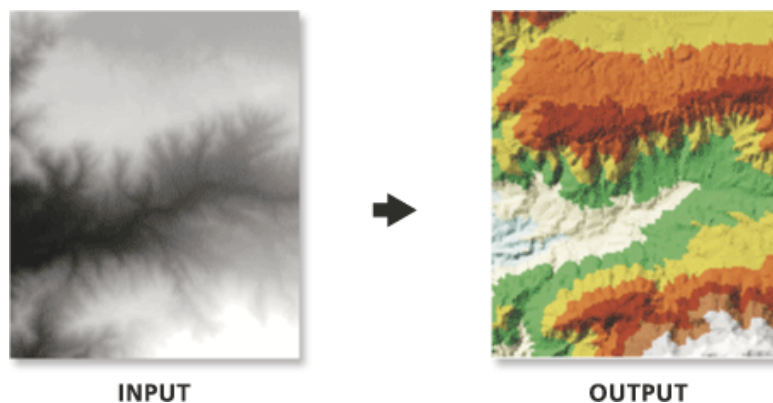


Рис. 3.4. Інструмент Растр в TIN (Raster To TIN)

Інструмент Растр в TIN (Raster To TIN) спочатку створює поверхню TIN з використанням деякої кількості початкових точок, які відповідають центрам пікселів, повністю покриваючи растрову поверхню. Після цього поверхня TIN поступово покращується, доки не буде досягнуто вказаного значення допуску Z (Рис. 3.5). Це відбувається за рахунок додавання додаткових центрів пікселів по мірі необхідності.

Зона інтерполяції вхідного растру використовується у вихідній поверхні TIN. Полігональне представлення зони інтерполяції вирізається з растру разом зі значеннями Z , а потім додається до поверхні TIN як полігон плавного відсікання. Кількість вибраних командою точок є функцією від заданого Допуску Z (Z tolerance) та згладженості вхідного растру. При вказівці маленького Допуску Z або у разі використання топографічно грубої або складної растрової поверхні для побудови TIN потрібно більше точок.

Вказавши максимальну кількість точок, можна встановити обмеження розміру поверхні TIN. Інструмент припинить роботу та поверне помилку, якщо Допуск Z не досягнутий при досягненні максимальної кількості вузлів мережі TIN. Це число є зразковим, що дозволяє створювати поверхню TIN, що містить дещо більше вузлів. При цьому рекомендується будувати поверхні TIN, що містять кілька мільйонів точок – не більше. Використання вхідних растрів великого розміру та невеликого значення допуску Z може призвести до перевищення цього числа. Якщо потрібно дуже багато точок, рекомендується обробляти масив даних частинами чи користуватися інструментом геообробки Растр в мультиточки (Raster To Multipoint) з наступним побудовою набору даних terrain [1].

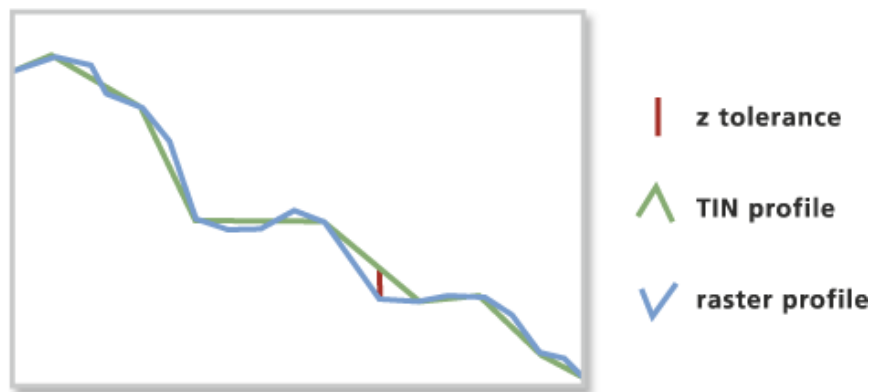


Рис. 3.5. Ілюстрація допуску Z

Коефіцієнт Z (Z factor) використовується для перетворення Z-одиниць (наприклад, з футів на метри). Вихідні значення висот TIN будуть помножені на цей коефіцієнт з метою їхнього перетворення.

Допуск Z (Z tolerance) визначається в одиницях Z вихідної поверхні TIN. Наприклад, якщо одиницями виміру Z вхідного растру є фути і використовується коефіцієнт Z, що дорівнює 0,3048, для конвертації їх у метри у вихідній поверхні TIN Допуск Z також повинен бути вказаний у метрах.

Максимально допустима різниця за умовчанням між висотою початкового растру та вихідною мережею TIN становить 1/10 діапазону z вхідного растру. Тобто якщо розмір пікселя ЦМР 30 м, ця різниця буде становити 3 м.

У той час, як максимальний розмір мережі TIN може становити від 15 до 20 мільйонів вузлів, рекомендується обмежити цей розмір кількома мільйонами. Вхідні растри великого розміру та невеликі параметри z-допуску можуть перевищити його.

Отримана після роботи інструменту Растр в TIN (Raster To TIN) поверхня TIN показана на Рис. 3.6.

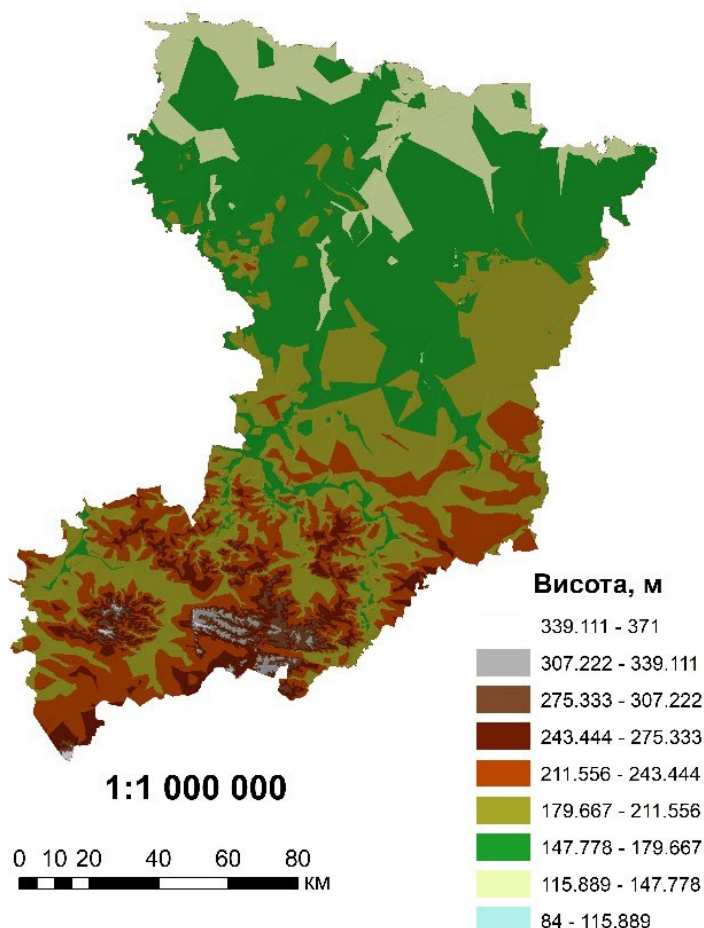


Рис. 3.6. TIN території Рівненської області

3.2. Аналіз поверхонь за допомогою TIN

Розглянемо використання TIN для задач аналізу поверхонь у ГІС.

3.2.1. Побудова експозиції схилу

Завдання розрахунку експозицій схилів зазвичай використовується для аналізу освітленості Землі. У зв'язку з цим нерідко виникає потреба додаткового врахування поточного положення Сонця, тобто експозиція обчислюється як напрямок між нормаллю до трикутника та напрямком на Сонце.

Експозиція (Aspect) – це напрямок ухилу. Визначає найкрутіший низхідний напрямок у точці на поверхні. Експозицію можна подати як напрямок або азимут ухилу біля пагорба. Експозиція обчислюється для кожного трикутника в TIN і для кожного осередку в растрах.

В ArcGIS це є створення полігональних об'єктів, що являють собою вимірювання експозиції, отримані з поверхні TIN. Експозиція є горизонтальною орієнтацією поверхні і визначається в одиницях градусів. Кожній грані поверхні присвоюється значення, в якому закодовано напрямок нахилу поверхні зі сторін

світу; дотичні області з однаковим кодовим значенням поєднуються в один об'єкт. За умовчанням визначено схему класифікації, подану в Таблиця 3.2.

Таблиця 3.2

Схема класифікації експозиції в ArcGIS

Код	Напрямок ухилу	Діапазон кута експозиції
-1	Плоский	Немає ухилу
1	Північ	0° – 22.5°
2	Північний схід	22.5° – 67.5°
3	Схід	67.5° – 112.5°
4	Південний схід	112.5° – 157.5°
5	Південь	157.5° – 202.5°
6	Південний захід	202.5° – 247.5°
7	Захід	247.5° – 292.5°
8	Північний захід	292.5° – 337.5°
9	Північ	337.5° – 360°

Експозиція вимірюється проти годинникової стрілки у градусах від 0 (північ) до 360 (знову північ), проходячи повне коло (Рис. 3.7). Значення кожної комірки у сітці експозиції вказує на напрямок ухилу комірки. Плоскі ухили не мають напрямку і набувають значення -1 і набувають значення -1.

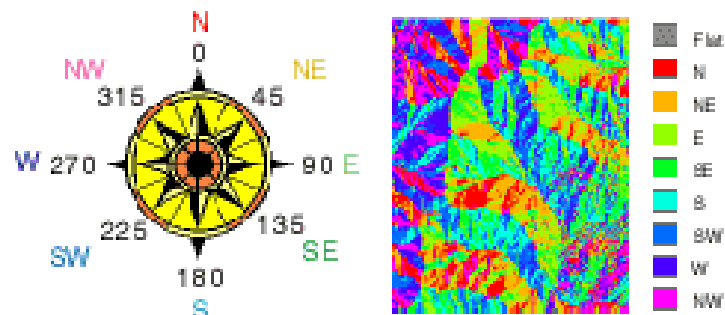


Рис. 3.7. Вимірювання експозиції

Експозиція використовується у наступних задачах [1]:

- знайти усі спрямовані на північ ухили на горі як частину пошуку найкращих ухилів для лижних трас;
- обчислити сонячне освітлення кожної осередки району як частину дослідження визначення різноманітності життя кожному ділянці;

- знайти всі південні ухили в гірських районах для виявлення тих місць, де сніг тоне раніше, у рамках дослідження з метою визначити місця, які першими постраждають від потоку;
- визначити області плоскої поверхні, щоб знайти область для посадки літака у разі надзвичайної ситуації.

Експозиція окремої грані визначається кутом β як напрямком проекції нормалі на горизонтальну поверхню відносно напрямку на північ (Рис. 3.8). Кут обчислюється за формулою [14, 12]:

$$\beta = \arccos\left(\frac{p_c}{\sqrt{p_a^2 + p_b^2}}\right),$$

де p_a, p_b, p_c – координати нормалі до грані трикутника TIN.

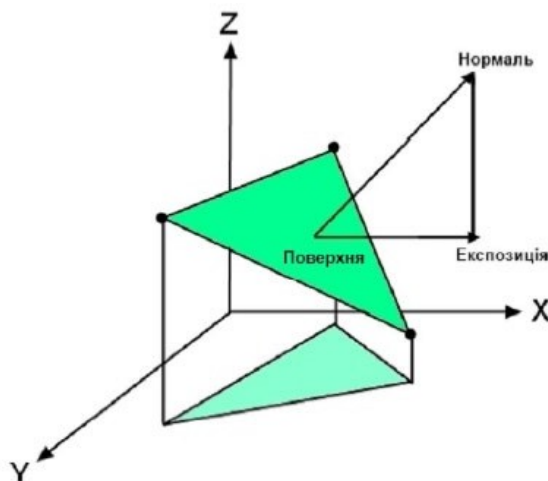


Рис. 3.8. Відображення експозиції схилів

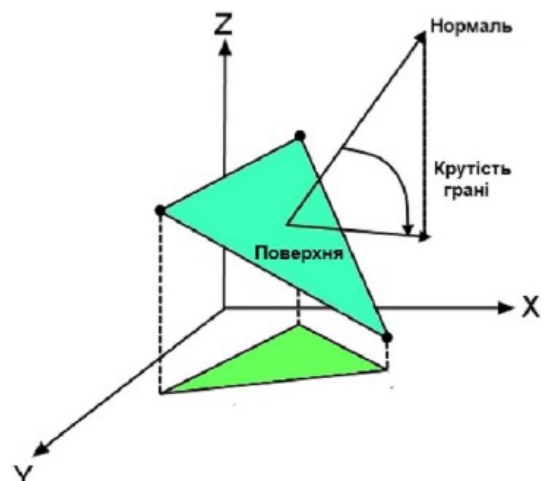


Рис. 3.9. Відображення крутості грані (ухилу)

Розрахунок експозиції схилів для території дослідження показано в додатку А.

3.2.2. Обчислення ухилу поверхні

Ухил (Slope) представляє швидкість зміни висоти для кожної комірки ЦМР. Це є перша похідна ЦМР.

У результаті обчислень створюються полігональні об'єкти, що становлять діапазон значень ухилу для тріангульованої поверхні (Рис. 3.10).

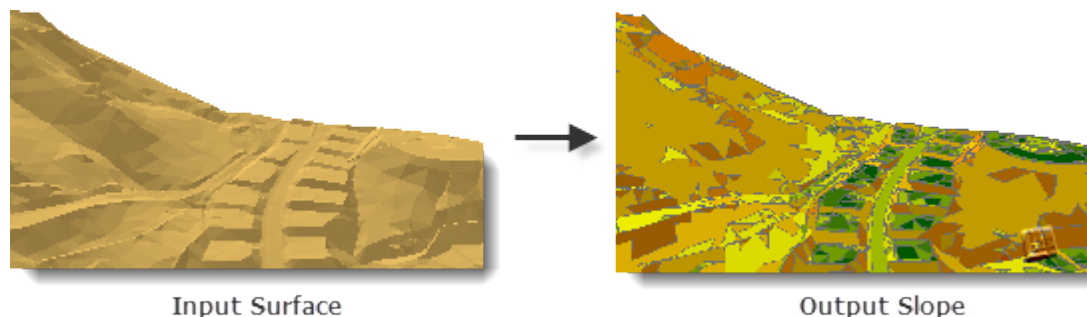


Рис. 3.10. Визначення ухилу поверхні

Кожен вихідний полігон представляє діапазон значень ухилу з урахуванням розбиття на класи, що використовується при запуску відповідного інструменту геообробки ArcGIS. За умовчанням класифікація поділяє вимірювання нахилу на дев'ять груп, які описані в Таблиця 3.3.

Таблиця 3.3

Схема класифікації ухилів у ArcGIS

Код ухилу	Відсоток	Градусний діапазон
1	0.00 — 1.00	0.00 — 0.57
2	1.00 — 2.15	0.57 — 1.43
3	2.15 — 4.64	1.43 — 2.66
4	4.64 — 10.0	2.66 — 5.71
5	10.00 — 21.50	5.71 — 12.13
6	21.50 — 46.40	12.13 — 24.89
7	46.40 — 100.0	24.89 — 45.00
8	100.0 — 1000.0	45.00 — 84.29
9	> 1000.0	84.29 — 90.0

Нормаль поверхні кожного трикутника, задана векторним добутком двох ребер трикутника, використовується для визначення ухилу у відсотках чи градусах. Відсотковий ухил описує відношення зміни висоти до горизонтальної проекції нормалі поверхні. Ухил у градусах є кутом відхилення нормалі від горизонтальної площини.

Ухил представляється кутом нахилу нормалі до горизонтальної лінії. Він визначається як доповнення до 90° кута α (Рис. 3.9) [26]:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{p_c}{\sqrt{p_a^2 + p_b^2 + p_c^2}} \right)$$

Розрахунок ухилів для території дослідження показано в додатку Б.

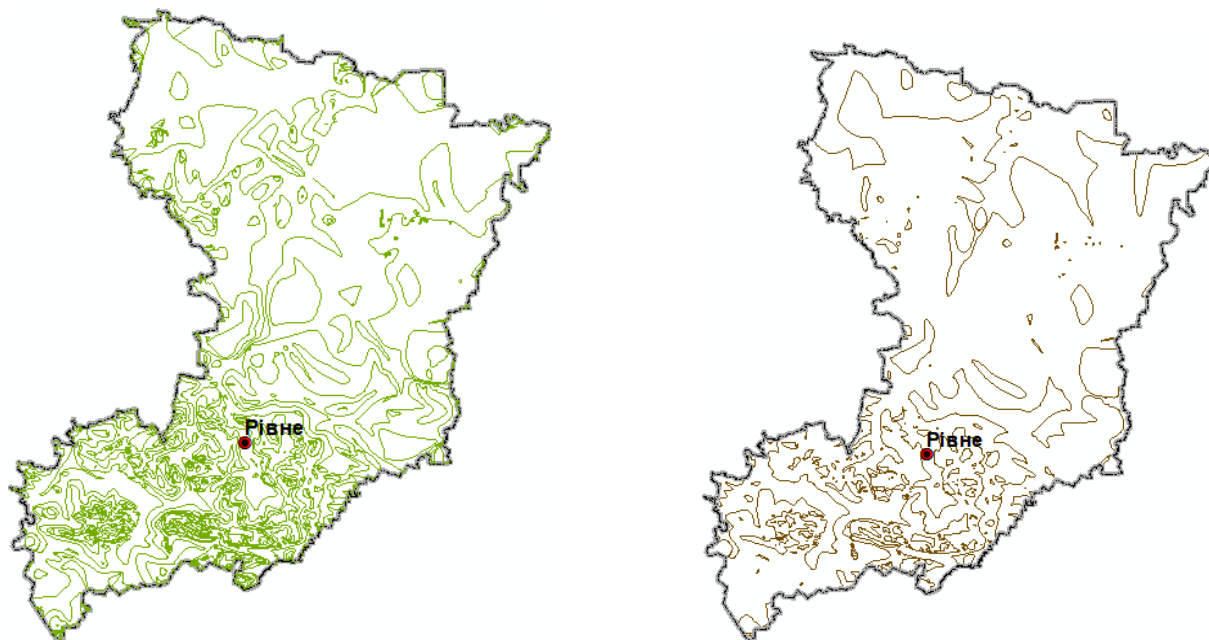
3.2.3. Побудова ізоліній

Реалізується інструментом Ізолінії поверхні (Surface Contour), що використовує вхідний набір даних TIN для обчислення ізоліній, які записуються у вихідний клас об'єктів. Інструмент створює 2D клас об'єктів поліліній, висоти ізоліній у якому зберігаються як атрибути.

Ізолінії генеруються безпосередньо за набором даних TIN у межах зони інтерполяції. Використовується метод лінійної інтерполяції. За цим методом кожен трикутник обробляється як площа. Ділянки окремих ізоліній, що знаходяться в межах трикутника, є прямими. Будь-яка зміна напрямку відбувається лише при переході ізолінії з одного трикутника до іншого. Цей спосіб побудови ізоліній дозволяє створювати ізолінії інженерної якості, що представляють точну лінійну інтерпретацію моделі поверхні [1].

Отримані ізолінії будуть не згладжені, тому переважно не використовуються для створення високоякісних карт. Тому після використання даного інструмента було застосовано інструмент Згладити лінію. У цьому інструменті було вибрано поліноміальну апроксимацію з використанням експоненційного ядра (РАЕК) (РАЕК в Python). Кожна згладжена лінія може мати більше вершин, ніж вихідна.

Оскільки наша TIN являє собою поверхню висот, то отримані ізолінії є лініями рівних значень висоти, тобто ізогіпсами або горизонталями (Рис. 3.11).



а) висота перерізу рельєфу 20 м б) висота перерізу рельєфу 50 м

Рис. 3.11. Ізолінії, побудовані за TIN

3.3. Пошук оптимального місця розташування на поверхні TIN

Розглянемо вирішення задачі пошуку оптимального місця розташування нового просторового об'єкта – нового готелю на території Рівненської області, використовуючи поверхню TIN.

В якості початкових даних будемо використовувати:

- TIN Рівненської області;
- шар доріг Рівненської області;
- шар водних об'єктів Рівненської області;
- класифікований растр земного покриття Рівненської області;
- координати місць розташування архітектурно-історичні пам'яток Рівненської області;
- координати місць розташування баз відпочинку та готелів Рівненської області.

В якості класифікованого растру земного покриття Рівненської області використаємо дані Copernicus Global Land Cover Layers: CGLS-LC100 Collection 3, завантажені з платформи Google Earth Engine [6]. Динамічна карта земного покриття з роздільною здатністю 100 м (CGLS-LC100) є новим продуктом у портфолію CGLS і забезпечує глобальну карту земного покриття з просторовою роздільною здатністю

100 м. Продукт CGLS Land Cover забезпечує первинну схему покриття землі. Поряд із цими дискретними класами продукт також включає безперервні польові шари для всіх основних класів ґрунтового покриття, які забезпечують пропорційні оцінки для рослинності/ґрунтового покриття для типів ґрунтового покриття. Ця безперервна класифікаційна схема може відображати ділянки гетерогенного ґрунтового покриття краще, ніж стандартна схема класифікації, і, як така, може бути адаптована для застосування (наприклад, моніторинг лісів, моніторинг врожаю, біорізноманіття та збереження, моніторинг навколишнього середовища та безпеки в Африці, моделювання клімату, тощо).

Ці узгоджені карти земного покриття (версії 3.0.1) надаються на період 2015-2019 років по всій земній кулі, отримані з часового ряду PROBA-V 100 м, бази даних високоякісних навчальних майданчиків земного покриття та кількох допоміжних наборів даних, що досягають точності 80 % на рівні 1 протягом багатьох років. Планується надавати щорічні оновлення з 2020 року за допомогою часового ряду Sentinel. Карту земного покриття Рівненської області показано в додатку В.

Координати місць розташування архітектурно-історичні пам'яток [4] баз відпочинку і готелів Рівненської області [18] із формату геодезична широта / геодезична довгота перетворюємо в шари точкових просторових об'єктів у ArcGIS.

Шар доріг і шар водних об'єктів Рівненської області завантажуюмо з ресурсу [8] та обрізаємо полігоном кордону Рівненської області.

Розташування початкових векторних об'єктів на території дослідження показано в додатку Г.

Нам необхідно виконати задачу пошуку оптимального місця положення для нового готелю, який би знаходився якомога далі від існуючих готелів і баз відпочинку, поблизу доріг та якомога ближче до архітектурно-історичних пам'яток, враховуючи при цьому рельєф місцевості (його параметри братимемо з TIN) та типи земних покриттів.

Опис типів земних покривів Copernicus Global Land Cover Layers

Код	Опис типу покриву	Код	Опис типу покриву
	Невідомо. Супутникових даних немає або недостатньо.	113	Закритий ліс, листяний хвойний лист
20	Чагарники	114	Закритий ліс, широколистяний
30	Трав'яниста рослинність	115	Закритий ліс, мішаний.
40	Культивована рослинність	116	Закритий ліс, який не відповідає жодному з інших визначень.
50	Забудовані землі	121	Відкритий ліс, вічнозелений голчастий лист
60	Гола або розріджена рослинність. Землі з відкритим ґрунтом, піском або камінням	122	Відкритий ліс, вічнозелений широкий лист
70	Сніг і лід	123	Відкритий ліс, листяний хвойний лист
80	Постійні водойми	124	Відкритий ліс, широколистяний
90	Трав'яниста водно-болотна місцевість	125	Відкритий ліс, змішаний.
100	Мох і лишайник.	126	Відкритий ліс, який не відповідає жодному з інших визначень.
111	Вічнозелений хвойний лист	200	Океани, моря. Можуть бути як прісні, так і солоні водойми.
112	Закритий ліс, вічнозелений широкий лист		

Будуємо растр відстаней від зон відпочинку та від архітектурно - історичних пам'яток за допомогою інструменту Евклідова відстань (Euclidean Distance). Евклідова відстань обчислюється з центру комірок джерел до центру кожної комірки. Для кожної комірки відстань до кожної комірки джерела обчислюється шляхом обчислення гіпотенузи, при цьому катетами є значення x_{max} і y_{max} . Це обчислення дає справжню Евклідову відстань, а не відстань між комірками. Визначається найкоротша відстань до джерела, і якщо вона менша, ніж задана максимальна відстань, місцезнаходженню на вихідному растрі присвоюється значення. Вихідні значення для растра Евклідова відстань – це значення відстаней,

виражені числами з плаваючою комою. Якщо комірка розташована на однаковій відстані від двох або декількох джерел, вона буде віднесена до того джерела, яке було першим знайдено в процесі сканування. Побудовані растри показано в додатку Д.

Наступним кроком є перекласифікація (Reclassify) растрів ухилу та евклідових відстаней на шкалу 0, 1, ..., 10 методом рівних інтервалів, де значення 0 означитиме відсутність впливу, 10 – максимальний вплив. Наприклад, значення 10 означитиме інтервал найменших значень ухилів, 10 для растру евклідових відстаней пам'яток – найменший інтервал до існуючих пам'яток (оскільки новий готель повинен бути розташований до них якнайближче), але 10 для растру евклідових відстаней готелів – найбільший інтервал.

Тепер просторові дані готові для виконання комбінування, щоб знайти найбільш підходяще розташування для нового готелю. Значення розрахункових даних, тобто ухил, відстань до архітектурно-історичних пам'яток і зон відпочинку, перекласифіковані на єдину шкалу (найбільш відповідні комірки мають найвищі значення).

Далі було виконано зважування та комбінування наборів даних за допомогою інструмента Зважене накладання (Weighted Overlay). Даний інструмент накладає кілька растрів з використанням загальної шкали вимірів, при цьому зважуючи кожен шар відповідно до його значущості. Виключаємо з розрахунків останні два значення ухилів, а також невідомі, водні об'єкти та болота, іншим типам земних покривів надаємо наступні значення:

- чагарники, трава – 5;
- гола або розріджена рослинність – 10;
- забудована територія – 3;
- культивована рослинність – 9;
- ліс – 4.

Також для кожного з перерахованих растрів впливу призначаємо відсотки впливу на підставі значущості (або ваги) растра, яку може мати растр для заключної карти придатності:

- перекласифікований ухил: 13;

- перекласифікована відстань до готелів: 25;
- перекласифікована відстань до пам'яток: 50;
- перекласифіковані типи земних покривів: 12.

Результатом роботи є растр, на якому по шкалі 0...10 показано ділянки, які є найбільш придатними для будівництва за вищенаведеними критеріями. На отриманому растрі найбільшими значеннями є 9.

Придатні розташування зони повинні включати кілька пікселів зі значенням 9, з'єднаних разом, тому наступним кроком було виділення оптимальних груп пікселів за допомогою інструментів Умова (Con) і Фільтр більшості (Majority Filter). Після цього перетворюємо пікселі оптимальної ділянки у векторний формат за допомогою інструмента Растр у полігони (Raster to Polygons).

Далі за допомогою інструмента «Вибрати за положенням» вибираємо ті оптимальні ділянки, які перетинають шар доріг, і експортуємо їх в окремий просторовий об'єкт. Результат наведено в додатку Е.

ВИСНОВКИ

Завдання побудови тріангуляції є одним із базових у обчислювальній геометрії. До нього зводяться багато інших завдань, TIN широко використовується в машинній графіці та ГІС для моделювання поверхонь та розв'язання задач просторового аналізу.

1. Розкрито суть поняття TIN та задач просторового аналізу ГІС, що можуть розв'язуватись за її допомогою.

2. Проаналізовано алгоритми побудови та аналізу тріангуляції. Наведено умови Делоне, описано способи перевірки виконання умови Делоне в тріангуляції.

3. Описано алгоритми побудови тріангуляції Делоне, особливу увагу приділено ітераційним алгоритмам побудови тріангуляції Делоне.

4. За допомогою програмного забезпечення ArcGIS виконано побудову тріангуляції TIN за даними супутникової місії SRTM для Рівненської області. Виконано побудову за TIN морфометричних характеристик рельєфу— ізоліній, ухилів, експозиції схилів.

5. На основі моделі TIN території Рівненської області за допомогою інструментів ГІС виконано просторовий аналіз геоданих території дослідження, у результаті якого виділено ділянки на TIN, найбільш придатні для будівництва нового готелю / бази відпочинку з врахуванням типів земних покривів, рельєфу, дорожньої мережі, розташованих на території області архітектурно-історичних пам'яток та існуючих баз відпочинку і готелів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ArcGIS Desktop. Режим доступу: <https://desktop.arcgis.com/>
2. Архітектурно - Історичні пам'ятки Рівненська область. Режим доступу: https://ua.igotoworld.com/ua/poi_catalog/2301-211-historical-architectural-rivne-oblast.htm?page=4
3. Buchin K., Costa Sousa M., Dollner J., Samavati F., Walther M. Illustrating terrains using direction of slope and lighting // In Proc. 4th ICA Mountain Cartography Workshop, 2004, pp. 259-269.
4. Copernicus Global Land Cover Layers: CGLS-LC100 Collection 3. Режим доступу: <https://earthengine.google.com/>
5. David DiBiase, Michael DeMers, Ann Johnson, Karen Kemp, Ann Taylor Luck, Brandon Plewe, and Elizabeth Wentz. - Geographic Information Science & Technology. Body of Knowledge [Electronic Resource].
6. DIVA-GIS. Режим доступу: diva-gis.org
7. Evans I. S. The selection of class intervals. Trans. Inst. Br. Geogr. (N. S.), 1977, 2, p. 98-124.
8. Global Elevation Data Now Available in Esri Maps– ArcNews, Spring, 2007.
9. Іщук О. О., Коржнев М. М., Кошляков О. Є. Просторовий аналіз в ГІС : навчальний посібник / за ред. акад. Д. М. Гродзинського. – Київ: ВПЦ Київський університет, 2003. – 195 с.
10. Lawson C. Transforming triangulations // Discrete Mathematics. 1972. N 3. P. 365-372.
11. Lee D. Proximity and reachability in the plane // Tech. Rep. N. R-831, Coordinated Sci. Lab. Univ. of Illinois at Urbana. 1978.
12. Lingas A. The Greedy and Delaunay triangulations are not bad // Lect. Notes Comp. Sc. 1983. Vol. 158. P. 270-284.
13. Manacher G., Zobrist A. Neither the Greedy nor the Delaunay triangulation of planar point set approximates the optimal triangulation // Inf. Proc. Let. 1977. Vol. 9. N LP. 31-34.
14. Manacher G., Zobrist A. Neither the Greedy nor the Delaunay triangulation of planar point set approximates the optimal triangulation // Inf. Proc. Let. 1977. Vol. 9. N

LP. 31-34.

15. Sibson R. Locally equiangular triangulations // Computer Journal. 1978. Vol. 21. N. 3. P. 243-245.

16. The Humanitarian Data Exchange. Режим доступу: <https://data.humdata.org/>

17. U.S. Geological Survey (USGS) Earthexplorer. Режим доступу: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

18. Voronoi G. Nouvelles applications des parameters continues a la theorie des formes quadratiques. Deuxieme Memoire: Recherches sur les paralleloedres primitifs // J. reine angew. Math. 1908. N. 134. P. 198- 287.

19. Zamirets O. Accuracy investigations of digital terrain models / Olga Zamirets // The Zhukovsky National Aerospace University Conference. – 2012.

20. Zamirets O. Building triangulation irregular network model based on regular GRID data / Olga Zamirets // Science looks ahead. – 2012. –

№11 – P. 12.

21. Бурачек В. Г., Железняк О. О., Зацерковний В. І. Геоінформаційний аналіз просторових даних : монографія. - Ніжин : ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. - 440 с.

22. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.

23. Геоінформаційні системи в науках про Землю : монографія / В. І. Зацерковний, І. В. Тішаєв, І. В. Віршило, В. К. Демидов. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 510 с.

24. Дані SRTM Eurasia/Shuttle radar topographic mission [Електронний ресурс]. Режим доступу:

http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia. –12.11.2011.

25. Конституція України, прийнята на п'ятій сесії Верховної Ради України 28 червня 1996 р. [Електронний ресурс] // Відомості Верховної Ради України.

26. Про основні напрями державної політики України у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки :

Постанова Верховної Ради України від 5березня 1998 року № 188/98-ВР.

27. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23 травня 2017 року № 2059-VIII.

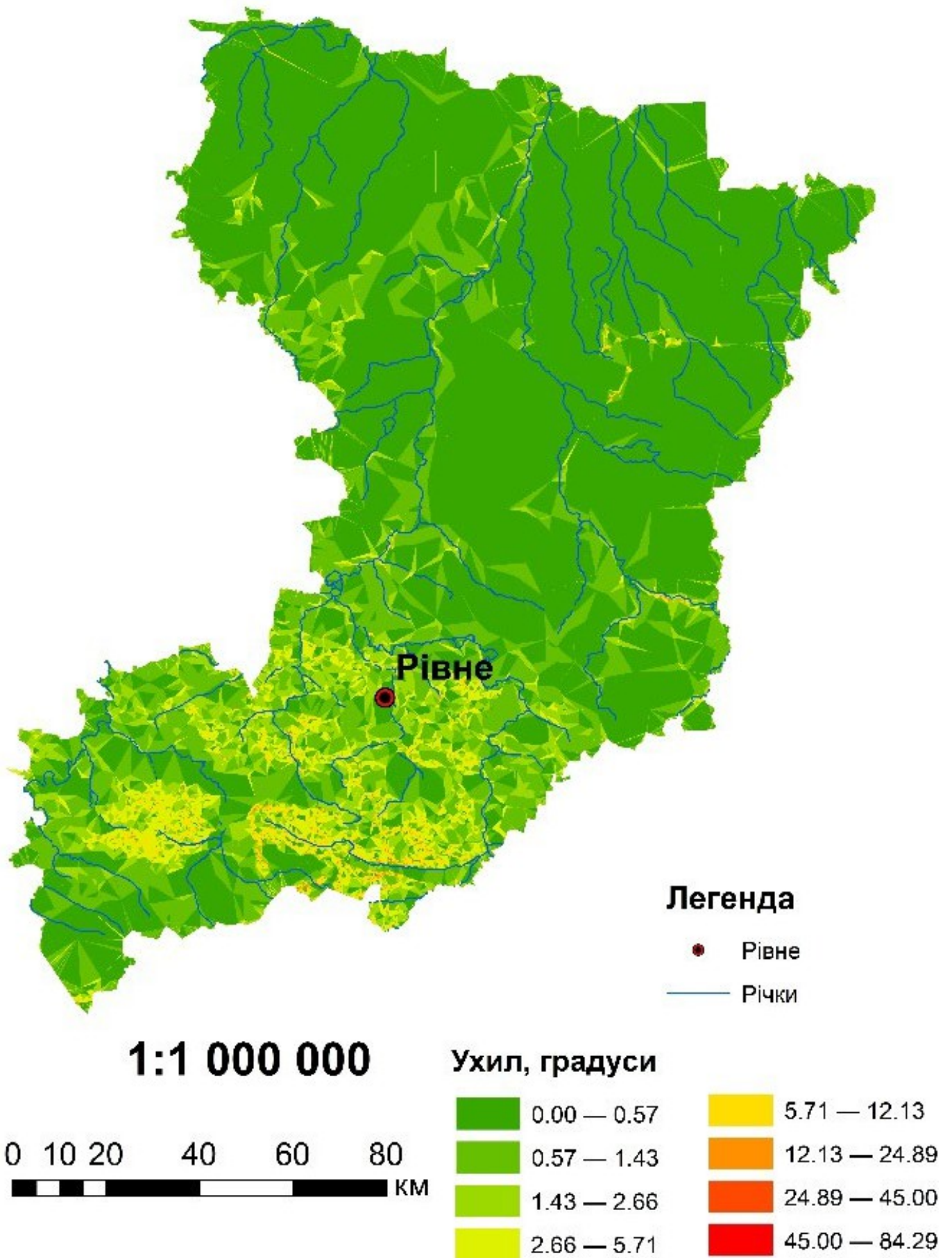
28. Черваньов І. Г., Костріков С. В., Воробйов Б. Н. Флювіальні геоморфосистеми: дослідження й розробки Харківської геоморфологічної школи / наук. ред. І. Г. Черваньов. - Харків : РВВ Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, 2006. - 320 с.

29. Шипулін В. Д. Основні принципи геоінформаційних систем : навч. посіб. / В. Д. Шипулін ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 313 с.

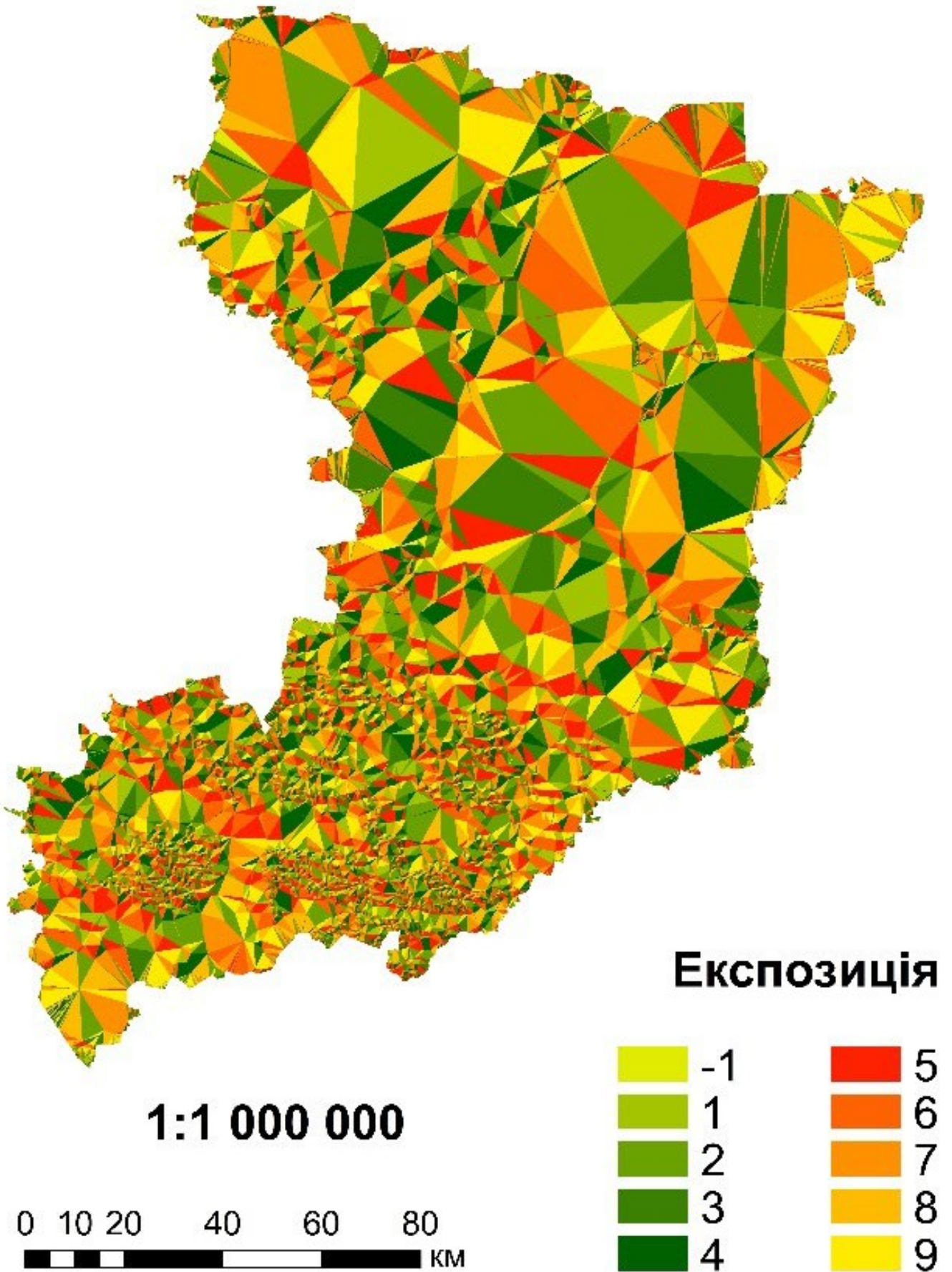
30. Шипулін В. Д., Кучеренко Є. І. Планування і управління ГІС- проектами. - Харків : ХНАМГ, ХНУРЕ, 2009. - 158 с.

Додатки

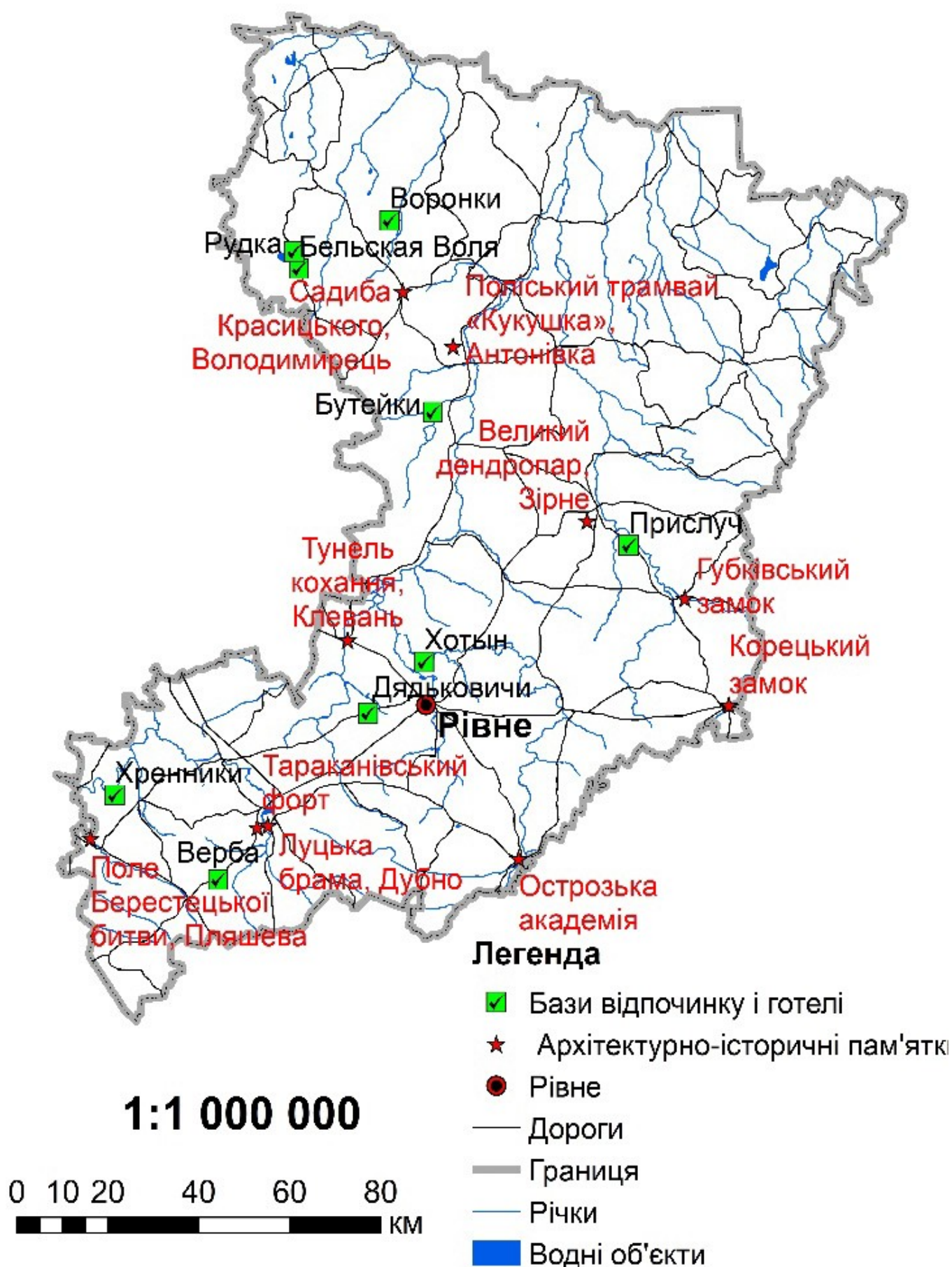
Ухил схилів TIN Рівненської області



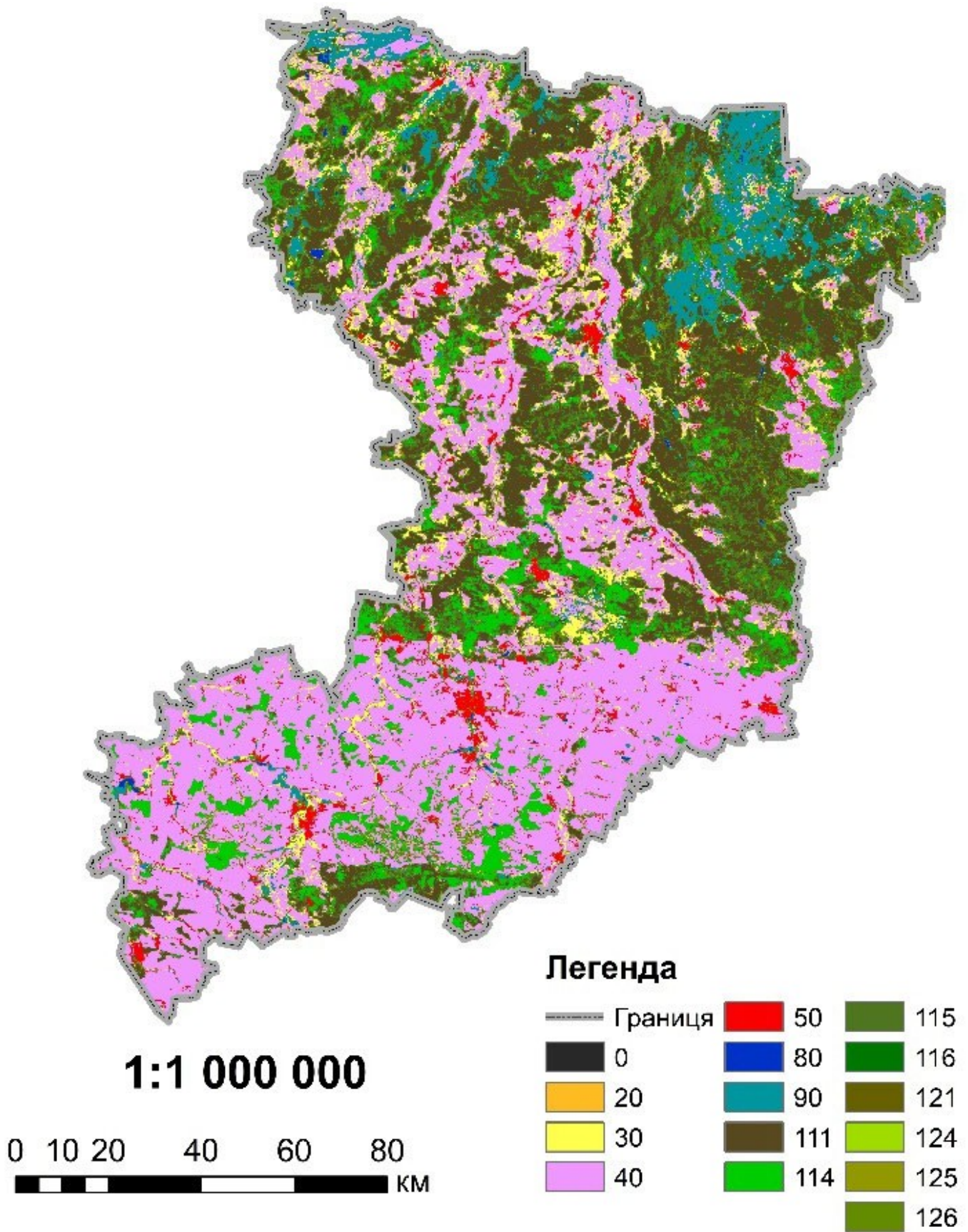
Експозиції схилів TIN Рівненської області



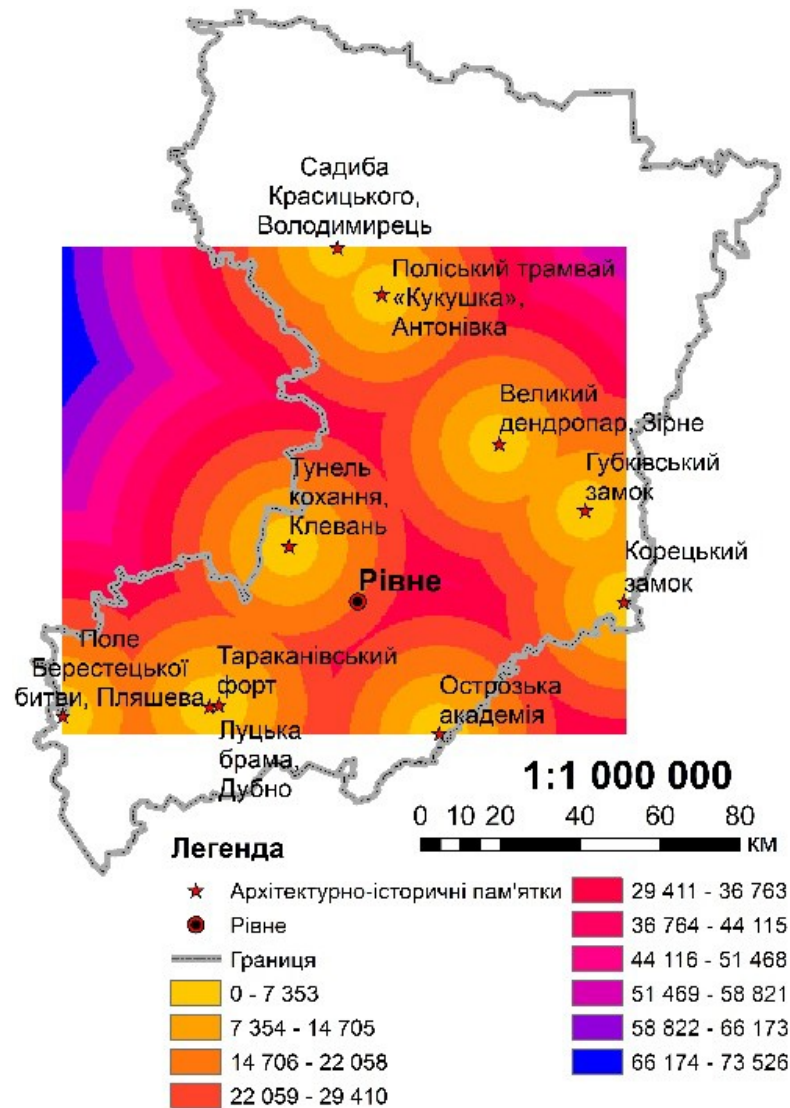
Карта векторних об'єктів Рівненської області



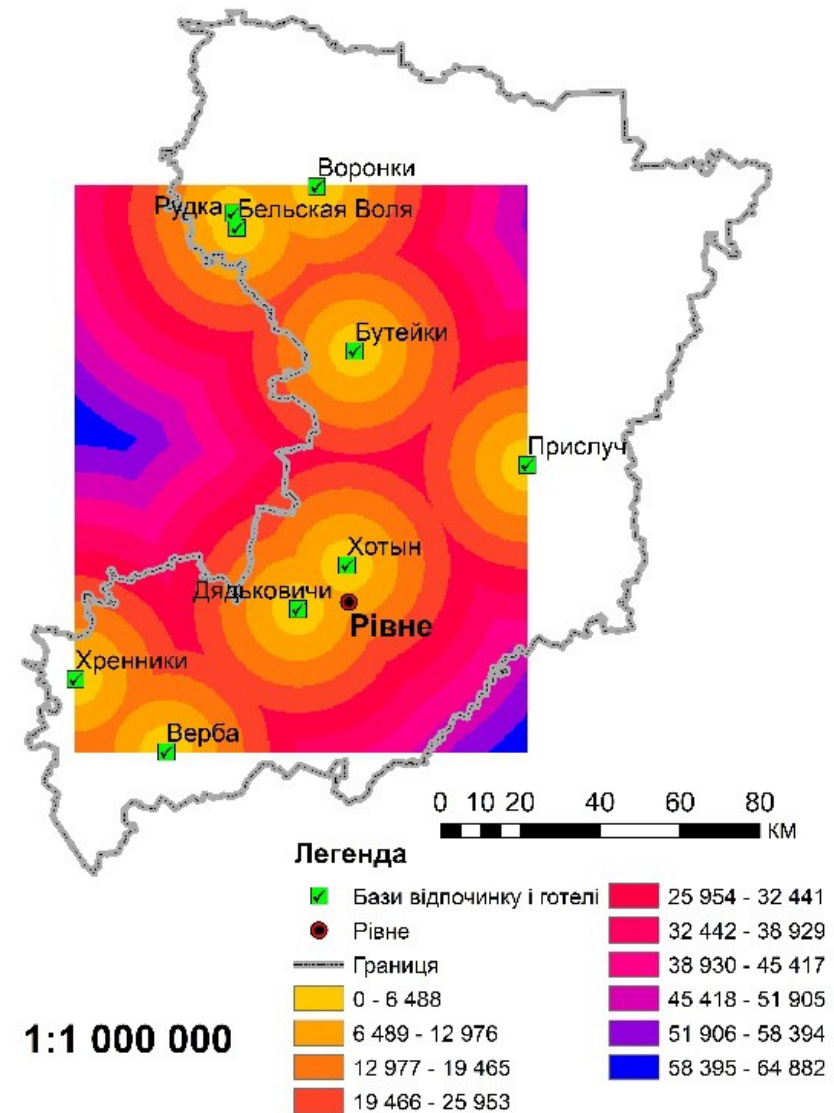
Карта земельного покриття Рівненської області



Растри евклідових відстаней



а) – архітектурно-історичні пам'ятки



б) – бази відпочинку і готелі

Розташування оптимальної ділянки для будівництва

