КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ТА УПРАВЛІННЯ ТЕРИТОРІЯМИ

Кафедра Інженерної геодезії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ БАКАЛАВРА

на тему:

Побудова цифрової моделі рельєфу для інженерного аналізу ділянки (на основі супутникових даних)

Digital terrain model building for engineering analysis of the area (based on satellite-derived data)

Костенко Іван Миколайович

Київ 2025 р.

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ТА УПРАВЛІННЯ ТЕРИТОРІЯМИ

Кафедра Інженерної геодезії

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____
„___” _____20___ року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ БАКАЛАВРА

Побудова цифрової моделі рельєфу для інженерного аналізу ділянки (на основі супутникових даних)
(назва)

Я як здобувач вищої освіти КНУБА розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Здобувач Костенко Іван Миколайович
(прізвище, ім’я та по батькові повністю)

193 – Геодезія та землеустрій
(спеціальність)

Геодезія
(освітня програма)

Група ГДз-20
Керівник Нестеренко О.В.
(прізвище та ініціали)

Доцент, кандидат технічних наук
(вчене звання, науковий ступінь)

Рецензент Медведський Юрій Вікторович
(прізвище та ініціали)

Київ 2025р.

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Факультет: факультет геоінформаційних систем та управління територіями
Випускова кафедра: кафедра інженерної геодезії
Ступінь вищої освіти: бакалавр
Спеціальність: 193 – Геодезія та землеустрій
Освітня програма: геодезі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____

„___”_____20___ року

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ БАКАЛАВРА

Костенко Іван Миколайович
(прізвище, ім’я та по батькові здобувача)

1. Тема роботи Побудова цифрової моделі рельєфу для інженерного аналізу ділянки (на основі супутникових даних)
затверджена наказом ректора КНУБА № __ від «__»_____20___року
2. Керівник роботи
Нестеренко Олена Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім’я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Термін подання здобувачем роботи до захисту _____
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:
Р. 1. Теоретичні основи
Р. 2. Матеріали та методи дипломної роботи
Р. 3. Результати та їх обговорення

5. Графічний матеріал за розділами
Р. 1. Карта 1 – цифрова модель рельєфу
Р. 2. Карта 2 – карта крутизни схилів
Р. 3. Карта 3 – карта експозиції схилів

6. Консультанти розділів кваліфікаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			

7. Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1.	
Розділ 2.	
Розділ 3.	
Остаточне оформлення роботи	
Направлення роботи для перевірки на плагіат	
Попередній захист роботи на випусковій кафедрі	
Направлення роботи на рецензування	

8. Дата видачі завдання _____

Керівник _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Здобувач _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Київ-2025

План:

Вступ:

- **Структура роботи**
- **Актуальність теми**
- **Мета роботи**
- **Завдання роботи**
- **Об'єкт дослідження**
- **Предмет дослідження**
- **Практичне значення**

Розділ 1. Теоретичні основи

1.1. Поняття про рельєф та його значення в інженерній геодезії

1.2. Цифрові моделі рельєфу (ЦМР): класифікація, джерела та використання

1.3. Морфометричний аналіз рельєфу та його показники

1.4. Геоінформаційні системи (ГІС) та їх роль в аналізі рельєфу

1.5. Природні та інженерно-геодезичні умови району дослідження (Яремче)

Розділ 2. Матеріали та методи диплонтої роботи

2.1. Характеристика досліджуваної території

2.2. Вихідні дані

2.3. Програмне забезпечення та інструменти

2.4. Методика побудови та обробки ЦМР

2.4.1. Завантаження та імпорт вихідних даних у QGIS

2.4.2. Попередня обробка ЦМР

2.4.3. Візуалізація ЦМР

2.5. Методика розрахунку морфометричних показників рельєфу:

2.5.1. Розрахунок крутизни схилів

2.5.2. Розрахунок експозиції схилів

2.6. Оцінка точності вихідних даних та морфометричних показників

2.7. Визначення масштабу картографічних матеріалів.

Розділ 3. Результати та їх обговорення

3.1. Побудована цифрова модель рельєфу досліджуваної ділянки:

3.2. Аналіз крутизни схилів:

- **Детальна легенда до карти**
- **Інженерний аналіз крутизни схилів**

3.3. Аналіз експозиції схилів

3.4. Комплексний інженерний аналіз ділянки на основі морфометричних даних

- **3.5. Обмеження дослідження та перспективи подальшого розвитку:**

Висновки

Список використаної літератури

Додатки

Структура роботи:

Дипломна робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У Вступі детально обґрунтовано актуальність обраної теми, розкрито її значення для інженерної геодезії та інженерної геодезії в умовах гірської місцевості. Чітко сформульовано мету дослідження та конкретизовано перелік завдань, виконання яких забезпечить досягнення цієї мети. Визначено об'єкт і предмет дослідження, що окреслюють теоретичні та практичні рамки роботи. Також розкрито практичне значення отриманих результатів, вказуючи на сфери їхнього потенційного застосування.

Перший розділ "Теоретичні основи та огляд літератури" присвячений закладенню теоретичної бази дослідження. У ньому розглядаються базові поняття про рельєф як ключовий фактор інженерно-геодезичних умов та його значення для інженерних вишукувань. Окрему увагу приділено цифровим моделям рельєфу (ЦМР), їх класифікації, джерелам отримання та різноманітним аспектам використання у сучасній практиці. Детально аналізуються принципи морфометричного аналізу рельєфу та визначаються основні морфометричні показники, такі як крутизна та експозиція схилів. Підкреслюється фундаментальна роль геоінформаційних систем (ГІС) як потужного інструменту для збору, обробки, аналізу та візуалізації просторових даних. Розділ завершується оглядом природних та інженерно-геодезичних умов району дослідження – міста Яремче, що створює контекст для подальшого аналізу.

У другому розділі "Матеріали та методи дослідження" детально описано всі матеріали та методичні підходи, які були застосовані для виконання роботи. Представлено фізико-географічну та інженерно-геодезичну характеристику досліджуваної території. Надано вичерпний перелік вихідних даних, включно з

посиланням на джерело та характеристики використаних супутникових даних (SRTM DEM 30m). Окреслено програмне забезпечення (QGIS) та інструменти, що використовувались для геопросторової обробки. Розкрито покрокову методику побудови та попередньої обробки цифрової моделі рельєфу, включно з завантаженням, імпортом та візуалізацією вихідних даних. Детально описано методику розрахунку та візуалізації ключових морфометричних показників рельєфу: крутизни та експозиції схилів. Також визначено критерії для масштабування картографічних матеріалів.

Третій розділ "Результати та їх обговорення" містить основні результати виконаного дослідження, їхню інтерпретацію та обговорення. У ньому візуалізовано та проаналізовано побудовану цифрову модель рельєфу досліджуваної ділянки. Представлено детальні тематичні карти крутизни схилів та експозиції схилів, отримані для території міста Яремче. Здійснено їхній кількісний (статистичний) та якісний (просторовий) аналіз. Проведено комплексний інженерний аналіз виявлених морфометричних характеристик рельєфу, що дозволило оцінити їхній вплив на інженерно-геодезичні умови території та визначити потенційно небезпечні або сприятливі для освоєння ділянки. Розділ також включає обговорення обмежень проведеного дослідження та окреслює перспективи його подальшого розвитку.

У Висновках узагальнено головні результати роботи, підтверджено досягнення поставленої мети та успішне виконання визначених завдань дослідження.

Список використаної літератури містить повний перелік джерел, які були використані у процесі дослідження та написання дипломної роботи.

Додатки містять допоміжні матеріали, які ілюструють та доповнюють основний текст роботи, такі як детальні таблиці, скріншоти процесів, додаткові карти або графіки.

Актуальність теми

Рельєф є одним з найважливіших факторів, що визначає інженерно-геодезичні умови будь-якої території та впливає на планування, проєктування, будівництво і безпечну експлуатацію інженерних споруд. Особливо це стосується гірських регіонів, де значні перепади висот, круті схили та активні геоморфологічні процеси (зсуви, обвали, ерозія) створюють підвищені ризики для життєдіяльності та інфраструктури.

Місто Яремче, розташоване в серці Українських Карпат, є яскравим прикладом такої території. Його унікальне географічне положення в гірській місцевості, розвинена туристична інфраструктура та зростаюча урбанізація зумовлюють постійну потребу в детальному вивченні та інженерно-геодезичній оцінці природних умов. Аналіз рельєфу, зокрема його морфометричних характеристик, є першочерговим кроком у цьому процесі, дозволяючи виявляти потенційно небезпечні ділянки та оптимізувати інженерні рішення.

Традиційні методи отримання та аналізу топографічних даних часто є трудомісткими, дорогими та не завжди забезпечують необхідну деталізацію для великих територій. У цьому контексті набувають особливої актуальності сучасні геоінформаційні технології (ГІС) та використання загальнодоступних супутникових даних, зокрема цифрових моделей рельєфу (ЦМР). Такі дані, як SRTM DEM, надають можливість оперативно отримувати точну інформацію про висоти земної поверхні для будь-якої точки світу, дозволяючи виконувати комплексний морфометричний аналіз (розрахунок крутизни, експозиції схилів тощо) з високою ефективністю та економічною доцільністю.

Побудова детальної та точної ЦМР, а також розрахунок на її основі похідних морфометричних карт, дозволяє кількісно оцінити форму рельєфу, виявити ділянки з підвищеною схильністю до ерозії, зсувів або інших небезпечних процесів. Отримані результати є фундаментальною основою для:

розробки заходів із захисту територій від природних небезпек;

раціонального планування забудови та прокладання інженерних комунікацій;

оцінки стійкості схилів;

формування рекомендацій щодо безпечного використання природних ресурсів.

Таким чином, актуальність даної дипломної роботи визначається нагальною потребою в застосуванні сучасних ГІС-технологій та супутникових даних для детального інженерного аналізу рельєфу в гірських умовах, що є ключовим для забезпечення сталого розвитку та безпеки інфраструктури міста Яремче.

Мета роботи:

Розробити цифрову модель рельєфу (ЦМР) території міста Яремче, використовуючи загальнодоступні супутникові дані SRTM DEM з ресурсу «OpenTopography», та здійснити її комплексний морфометричний аналіз шляхом розрахунку й візуалізації ключових показників рельєфу (крутизни та експозиції схилів) з метою попередньої інженерно-геодезичної оцінки та визначення придатності цих даних для подальших інженерно-геодезичних досліджень на території об'єкта.

Завдання роботи:

• Провести огляд теоретичних засад та сучасних методів побудови цифрових моделей рельєфу (ЦМР), а також основ морфометричного аналізу рельєфу.

• Здійснити пошук, завантаження та попередню обробку вихідних супутникових даних (SRTM DEM) для досліджуваної ділянки міста Яремче.

• Побудувати цифрову модель рельєфу (ЦМР) досліджуваної ділянки в програмному середовищі ГІС (QGIS).

• Виконати розрахунок та картографічну візуалізацію ключових морфометричних показників рельєфу: крутизни схилів та експозиції схилів.

• Провести інженерний аналіз отриманих морфометричних характеристик рельєфу та оцінити їхній вплив на інженерно-геодезичні умови частини міста Яремче та прилеглої території.

Об'єкт дослідження:

Частина території міста Яремче та прилеглої до нього ділянки, що розташовані в межах Івано-Франківської області, Українських Карпат. Досліджувана ділянка охоплює гірський рельєф зі складними геоморфологічними умовами, що формує середовище для розвитку інженерно-геодезичних процесів.

Предмет дослідження:

Процеси побудови, аналізу та інтерпретації цифрових моделей рельєфу (ЦМР), а також морфометричні характеристики рельєфу (зокрема, крутизна та експозиція схилів), що отримуються на основі супутникових даних для інженерно-геодезичних цілей.

Практичне значення:

Результати даної дипломної роботи мають суттєве практичне значення та можуть бути використані для:

• Оцінки інженерно-гедезичних умов та природних ризиків: Отримані тематичні карти крутизни та експозиції схилів дозволяють ідентифікувати потенційно небезпечні

ділянки (наприклад, схили, схильні до зсувів, обвалів, інтенсивної ерозії) в межах території міста Яремче.

• Оптимізації містобудівного та земельного планування: Картографічні матеріали та • аналітичні дані можуть слугувати інформаційною основою для розробки генеральних планів, детальних планів територій, схем землеустрою, інженерних вишукувань, забезпечуючи раціональне використання земель та безпечне розміщення об'єктів будівництва.

• Проєктування та будівництва інженерних споруд: Інформація про крутизну та експозицію схилів є критично важливою при проєктуванні фундаментів, дорожньої мережі, інженерних комунікацій, а також для вибору оптимальних місць для будівництва.

• Розробки та впровадження природоохоронних заходів: Виявлення зон підвищеної ерозійної небезпеки та нестабільності схилів дозволяє розробляти цільові заходи щодо захисту ґрунтів та запобігання небезпечним геологічним процесам.

• Актуалізації геоінформаційних баз даних: Створена цифрова модель рельєфу та похідні морфометричні карти можуть інтегруватися в міські або регіональні геоінформаційні системи, підвищуючи їхню повноту та актуальність для різних служб та організацій.

Окрім цивільних сфер застосування, аналогічні дослідження та розробки відіграють ключову роль у військовій справі, особливо з огляду на актуальні виклики сьогодення, що проявляється, зокрема, у наступних аспектах:

• Планування наступальних та оборонних операцій:

- Оцінка прохідності місцевості: Карти крутизни дозволяють швидко ідентифікувати ділянки, придатні або непридатні для пересування різних видів військової техніки (танки, бронетранспортери, артилерія). Наприклад, ділянки зі

схилами понад X градусів можуть бути непрохідними для важкої техніки, що впливає на маршрути руху та місця розгортання.

- Вибір позицій для розгортання військ та озброєння: Аналіз крутизни та експозиції схилів допомагає обирати оптимальні позиції для артилерії, мінометів (з урахуванням кутів нахилу для стрільби), а також приховані позиції для особового складу та техніки, захищені рельєфом.

- Оцінка прихованих підходів: Виявлення улоговин, балок, зворотних схилів за допомогою ЦМР та карт експозиції дозволяє планувати приховані маневри та підходи до позицій противника або власні укриття.

• Розвідка та спостереження:

- Аналіз видимості та зон обстрілу (Line of Sight, LoS analysis): На основі ЦМР можна моделювати лінії видимості та зони обстрілу з потенційних позицій, що є критичним для вибору вогневих точок, позицій спостереження та оцінки ефективності маскування.

- Виявлення маршрутів пересування противника: Аналіз рельєфу допомагає передбачити ймовірні маршрути пересування противника, які будуть обирати найменш круті та найбільш приховані ділянки.

- Оцінка можливості застосування БПЛА: Карти рельєфу дозволяють планувати маршрути польотів безпілотних літальних апаратів з урахуванням перешкод, висотних обмежень та оптимального кута огляду.

• Інженерне забезпечення:

- Планування фортифікаційних споруд: Вибір місць для будівництва укріплень, траншей, бліндажів з урахуванням захисних властивостей рельєфу та уникнення зон зі значною крутизною або ризиком зсувів.

- Прокладання шляхів логістики та евакуації: Оптимізація маршрутів для транспортування особового складу, боєприпасів та евакуації поранених з урахуванням прохідності, крутизни та прихованості місцевості.

- Виявлення ділянок, схильних до зсувів та обвалів: Особливо у гірській місцевості, ЦМР дозволяє оцінити ризик деградації схилів під впливом погодних умов або бойових дій, що є важливим для безпеки військ.

• Моделювання та симуляція:

- ЦМР є базою для створення реалістичних тривимірних моделей місцевості, що використовуються для моделювання бойових дій, навчання особового складу та відпрацювання тактичних сценаріїв у віртуальному середовищі.

Розділ 1. Теоретичні основи

1.1. Поняття про рельєф та його значення в інженерній геодезії

Поняття про рельєф та його значення в інженерній геодезії

Рельєф (від фр. relief – випуклість) – це сукупність нерівностей земної поверхні, що відрізняються за формою, розмірами, походженням, віком та історією розвитку. Він є одним з основних компонентів географічної оболонки, що відображає взаємодію ендогенних (внутрішніх, наприклад, тектонічні рухи) та екзогенних (зовнішніх, наприклад, ерозія, вивітрювання, діяльність людини) процесів, які безперервно змінюють вигляд планети. Кожна ділянка земної поверхні має свій унікальний рельєф, що визначається її гіпсометричним положенням, нахилом, формою та ступенем розчленування.

Вивчення рельєфу є фундаментальним для багатьох галузей знань, включаючи геоморфологію, гідрологію, кліматологію, ґрунтознавство, екологію, а також для різноманітних прикладних дисциплін. В контексті інженерної діяльності, рельєф набуває особливого значення, оскільки він є не лише середовищем для розташування інженерних споруд, а й активним фактором, що визначає їх стійкість, функціональність та довговічність.

Значення рельєфу в інженерній геодезії неможливо переоцінити. Інженерна геодезія – галузь геодезії, що вивчає питання застосування та розроблення топографічно-геодезичних методів і приладів в інженерно-будівельному виробництві. Рельєф є одним з ключових факторів у цьому комплексі, оскільки:

Визначає умови будівництва та експлуатації споруд: Форми рельєфу (рівнини, схили, долини, западини) прямо впливають на вибір типу фундаментів, обсяги земляних робіт, потребу в інженерному захисті території (наприклад, підпірні стінки, дренажні системи). На рівнинних ділянках проєктування відносно простіше, тоді як на гірських територіях зі складним рельєфом (як у Яремче) будівництво вимагає ретельних геодезичних вишукувань та особливих інженерних рішень.

Впливає на формування інженерно-геологічних процесів: Багато небезпечних геологічних явищ, таких як зсуви, обвали, селі, ерозія, яроутворення, прямо залежать від параметрів рельєфу. Крутизна, експозиція, кривизна схилів, наявність перепадів висот, а також характер взаємодії поверхневого стоку з рельєфом є основними передумовами для активації цих процесів. Наприклад, круті схили є зоною підвищеного ризику розвитку зсувних явищ, особливо при певних геологічних та гідрогеологічних умовах.

Регулює розподіл поверхневих і ґрунтових вод: Форми рельєфу визначають напрямок, швидкість і характер поверхневого стоку, а також глибину залягання та динаміку ґрунтових вод. Це має вирішальне значення для проєктування дренажних систем, оцінки підтоплення територій та водозабезпечення. Долини річок, улоговини, тальвеги є природними шляхами для концентрації водних потоків, що підвищує їхню ерозійну потужність.

Визначає мікрокліматичні умови: Експозиція (орієнтація) схилів щодо сторін світу впливає на інтенсивність сонячної радіації, що надходить до поверхні, температурний режим, вологість ґрунту та повітря, швидкість вітру. Це, в свою чергу, позначається на процесах вивітрювання гірських порід, циклів замерзання-відтавання та розвитку рослинного покриву, що впливає на стабільність схилів.

Впливає на формування ґрунтів та їх властивості: Товщина ґрунтового покриву, його механічний склад, вологість та родючість значною мірою залежать від

рельєфу. На крутих схилах ґрунтовий покрив часто тонкий, схильний до змиву та знесення, тоді як у пониженнях можуть накопичуватися більш потужні та зволожені шари.

Забезпечує інформацію для регіонального планування та оцінки ризиків: Детальний аналіз рельєфу є відправною точкою для розробки генеральних планів розвитку територій, зонування земель за ступенем геологічної небезпеки, визначення рекреаційного потенціалу та планування природоохоронних заходів.

Таким чином, комплексне вивчення рельєфу та його морфометричних характеристик є невід'ємною частиною інженерно-геодезичних вишукувань. Воно дозволяє не тільки оцінити існуючі умови, а й прогнозувати зміни, спричинені як природними процесами, так і антропогенною діяльністю, забезпечуючи прийняття обґрунтованих та безпечних інженерних рішень. Особливо це актуально для таких територій, як Українські Карпати, де складний гірський рельєф є визначальним фактором природно-техногенної безпеки.

1.2. Цифрові моделі рельєфу (ЦМР): класифікація, джерела та використання

1.2.1. Визначення ЦМР, DEM (Digital Elevation Model), DSM (Digital Surface Model). Різниця між ними.

В основі сучасного аналізу рельєфу лежить поняття цифрової моделі рельєфу (ЦМР), яка є дискретним представленням неперервної поверхні земної поверхні у цифровому вигляді. ЦМР є одним із найважливіших типів просторових даних у геоінформаційних системах (ГІС), що дозволяє проводити кількісний аналіз рельєфу та створювати похідні карти.

Варто розрізняти два основні типи цифрових моделей:

Цифрова модель висот (DEM – Digital Elevation Model): Це найбільш поширений термін, що позначає цифрову модель, яка представляє топографічну поверхню землі без рослинності, будівель та інших штучних об'єктів. По суті, DEM моделює "голу" земну поверхню, відображаючи лише абсолютні висоти рельєфу. Значення у кожному пікселі (або вузлі) DEM відповідає висоті точки рельєфу над рівнем моря. Саме DEM є основою для розрахунку морфометричних характеристик, таких як крутизна та експозиція схилів.

Цифрова модель поверхні (DSM – Digital Surface Model): Ця модель відображає всі об'єкти на земній поверхні, включаючи природні (дерева, ліси) та штучні (будівлі, мости, вежі). Тобто, DSM представляє собою "видиму" поверхню Землі з урахуванням висоти всіх об'єктів над базовою поверхнею. Значення у кожному пікселі DSM відповідає висоті найвищої точки, яка знаходиться над цим пікселем. DSM часто використовується для містобудівного планування, телекомунікацій, аналізу видимості в умовах забудови.

Ключова різниця між DEM та DSM полягає у тому, що DEM представляє лише рельєф, а DSM – рельєф разом з усіма наземними об'єктами. Для більшості геоморфологічних та інженерно-гедезичних аналізів, таких як розрахунок крутизни та експозиції схилів, переважно використовується DEM, оскільки саме форма земної поверхні, а не висота дерев чи будівель, є визначальною для цих показників.

1.2.2. Огляд технологій отримання ЦМР (супутникова зйомка, аерофотозйомка, лазерне сканування, топографічна зйомка).

ЦМР можуть бути створені за допомогою різних технологій збору геопросторових даних, кожна з яких має свої переваги, недоліки та сфери застосування:

Наземна топографічна зйомка: Традиційний метод, що включає використання геодезичних приладів (теодолітів, тахеометрів, GPS-приймачів) для вимірювання координат та висот окремих точок на місцевості. Це дозволяє створювати дуже точні ЦМР для невеликих ділянок, але є трудомістким і дорогим для великих територій.

Аерофотозйомка та фотограмметрія: Збір зображень земної поверхні з літальних апаратів. На основі перекриття фотографій (стереопари) за допомогою фотограмметричних методів (автоматична кореляція, ручна стереовимірювання) будується ЦМР. Дозволяє отримувати високу роздільну здатність та точність для середніх і великих територій.

Лазерне сканування (LiDAR – Light Detection and Ranging): Активний метод дистанційного зондування, при якому лазерний сканер випромінює імпульси і реєструє час повернення відбитого сигналу. Це дозволяє з високою точністю визначати відстань до об'єктів і будувати щільну хмару точок, з якої потім генерується ЦМР (як DEM, так і DSM). LiDAR забезпечує найвищу точність і деталізацію, здатний "проникати" крізь рослинність, але є дуже дорогим.

Супутникова зйомка (радарні та оптичні методи): Дистанційне зондування Землі з космічних апаратів. Цей метод дозволяє отримувати дані для великих територій, включаючи важкодоступні райони. Це основне джерело глобальних ЦМР.

1.2.3. Характеристика супутникових джерел ЦМР (SRTM, ASTER GDEM, Copernicus DEM) та їхні особливості.

Супутникова зйомка є економічно ефективним та глобально доступним джерелом ЦМР, що робить її ідеальною для великомасштабних досліджень. Серед найбільш популярних безкоштовних ЦМР, отриманих з супутників, виділяють:

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission):

Джерело: Радарна інтерферометрична місія NASA та NGA (Національне агентство геопросторової розвідки США), проведена у лютому 2000 року на борту шатла Endeavour.

Технологія: Використовує радарну інтерферометрію (InSAR), що дозволяє отримувати висотні дані навіть крізь хмарність та вночі.

Роздільна здатність: Спочатку дані для США були доступні з роздільною здатністю 1 арксекунда (близько 30 м), для решти світу – 3 арксекунди (близько 90 м). Пізніше, з 2014 року, глобальні дані SRTM стали доступними з роздільною здатністю 1 арксекунда (~30 м), що значно розширило їх застосування.

Тип моделі: Переважно генерує DEM, хоча радар проникає через легкий рослинний покрив, але відбивається від щільного лісу, що може призводити до деяких переоцінок висот у лісових масивах (ближче до DSM).

Особливості: Глобальне покриття (між 60° пн.ш. та 56° пд.ш.), висока точність для більшості територій, але можуть бути "дірки" у даних через тіні від гір або водойми.

ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model):

Джерело: Створена на основі даних японського супутника Terra (інструмент ASTER) спільно з NASA та METI.

Технологія: Оптична стереофотограмметрія (знімки з двох різних кутів).

Роздільна здатність: 1 арксекунда (близько 30 м) для глобального покриття.

Тип моделі: Ближче до DSM, оскільки оптичні сенсори реєструють поверхню з урахуванням рослинності та будівель.

Особливості: Глобальне покриття (між 83° пн.ш. та 83° пд.ш.), але може мати артефакти, пов'язані з хмарністю, снігом та льодом, що призводить до більшої кількості помилок та "шуму" порівняно з SRTM у певних регіонах. Дані регулярно оновлюються (GDEM V2, GDEM V3).

Copernicus DEM (European Digital Elevation Model):

Джерело: Європейська космічна програма Copernicus, дані отримані з радарних супутників Sentinel-1.

Технологія: Радарна інтерферометрія (InSAR).

Роздільна здатність: Доступні версії з 10 м (GLO-30) та 30 м (GLO-90) для глобального покриття.

Тип моделі: Зазвичай позиціонується як DEM (bare-earth DEM), хоча як радарні дані має схожі особливості з SRTM щодо проникнення крізь рослинність.

Особливості: Одна з найновіших і найточніших глобальних ЦМР. Висока якість даних, особливо для Європи, оскільки є результатом агрегації різних джерел.

1.2.4. Застосування ЦМР у різних галузях (геодезія, картографія, гідрологія, інженерія).

Завдяки своїй універсальності та здатності кількісно описувати рельєф, ЦМР знаходять широке застосування в багатьох галузях:

Геодезія та картографія: Основа для створення топографічних карт, планів, профілів, горизонталей; виконання точних вимірювань висот, об'ємів земляних робіт; створення 3D-моделей місцевості.

Гідрологія: Моделювання поверхневого стоку, визначення водозборів та вододілів, прогнозування зон затоплення, аналіз річкових басейнів та русел.

Інженерія та будівництво:

- Інженерна геодезія: Аналіз стійкості схилів, оцінка зсувної та ерозійної небезпеки, планування протизсувних та протиерозійних заходів.
- Проєктування транспортних шляхів: Оптимізація трас доріг та залізниць, розрахунок земляних робіт (насипів, виїмок), моделювання видимості.
- Планування міського та сільськогосподарського використання земель: Вибір оптимальних ділянок для забудови, оцінка рельєфу для сільськогосподарських угідь (іригація, дренаж).
- Телекомунікації: Аналіз зон радіовидимості для планування мереж мобільного зв'язку, радіорелейних ліній.

Військова справа: Оцінка прохідності місцевості, планування маршрутів, аналіз видимості, вибір позицій для розгортання військ та озброєння, моделювання бойових дій.

- Екологія та природокористування: Моделювання поширення забруднюючих речовин, планування природоохоронних зон, аналіз середовищ існування видів.
- Туризм та рекреація: Створення 3D-карт маршрутів, візуалізація місцевості для планування активного відпочинку.

Отже, ЦМР є незамінним інструментом для кількісного опису та аналізу рельєфу, що має фундаментальне значення для багатьох наукових та прикладних завдань, включаючи інженерний аналіз ділянок.

1.3. Морфометричний аналіз рельєфу та його показники

Морфометричний аналіз рельєфу – це сукупність кількісних методів вивчення форми, розмірів та просторового розподілу нерівностей земної поверхні. На відміну від якісного (описового) аналізу, морфометрія дозволяє об'єктивно оцінити рельєф за допомогою числових показників, що робить її незамінною для наукових досліджень, інженерних вишукувань, картографування та моделювання. Сучасний морфометричний аналіз базується на використанні цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та геоінформаційних систем (ГІС), що забезпечує високу точність, швидкість та візуалізацію результатів.

Ключовими морфометричними показниками, які широко використовуються в інженерній геодезії, є крутизна та експозиція схилів.

1.3.1. Крутизна схилів: визначення, одиниці вимірювання, методи розрахунку. Значення крутизни для інженерного аналізу (ерозія, зсуви).

Крутизна схилу – це один з фундаментальних морфометричних показників, що визначає максимальний кут нахилу поверхні рельєфу відносно горизонтальної площини у кожній точці. Вона відображає ступінь нахилу поверхні та є критично важливим параметром для розуміння геоморфологічних процесів.

Визначення: Крутизна схилу вимірюється як тангенс кута нахилу поверхні у градусах або відсотках. Вона розраховується на основі перепаду висот (ΔH) на певній горизонтальній відстані (ΔL).

У градусах: Крутизна (градуси)=$\arctan(\Delta H/\Delta L)$

У відсотках: Крутизна (відсотки)=$(\Delta H/\Delta L)\times 100\%$

В ГІС-системах, таких як QGIS, крутизна розраховується для кожного пікселя ЦМР на основі значень висот сусідніх пікселів (зазвичай, за допомогою алгоритму, що базується на методі "вікна 3x3 пікселі").

Одиниці вимірювання:

Градуси (°): Найбільш інтуїтивно зрозуміла та часто використовувана одиниця, особливо в геодезичних та інженерних розрахунках. Діапазон значень від 0° (повністю горизонтальна поверхня) до 90° (вертикальна стіна).

Відсотки (%): Використовується, зокрема, у дорожньому будівництві та для опису ухилів. 100% нахил відповідає куту 45°.

Значення крутизни для інженерного аналізу:

Крутизна є ключовим фактором, що контролює багато інженерно-геодезичних процесів та визначає можливості використання території:

Ерозія: Чим більша крутизна схилу, тим вища швидкість стікання поверхневих вод і, відповідно, інтенсивність водної ерозії. На крутих схилах ґрунтовий покрив менш стійкий до змиву, що призводить до деградації земель та оголення підстилаючих порід.

Зсуви та обвали: Крутизна схилу є одним з визначальних чинників стійкості схилових масивів. Перевищення критичного кута нахилу (який залежить від типу гірських порід, їх обводненості та літологічної будови) призводить до розвитку зсувів, обвалів, осипів. Ділянки з високою крутизною (понад 10-15° і більше) потребують ретельних геодезичних вишукувань та інженерно-захисних заходів перед будівництвом.

Планування будівництва: Крутизна схилів суттєво впливає на вартість і складність будівництва. На крутих ділянках збільшуються обсяги земляних робіт (терасування, виїмки, насипи), зростає потреба в укріпленні схилів, проєктуванні спеціальних фундаментів та дренажних систем.

Доступність та прохідність: Для транспортних комунікацій (доріг, залізниць) і пересування техніки існують обмеження по крутизні, що робить карти крутизни незамінними при плануванні логістики, особливо у військовій справі.

1.3.2. Експозиція (орієнтація) схилів: визначення, одиниці вимірювання, методи розрахунку. Вплив експозиції на мікроклімат, зволоженість ґрунтів та рослинність.

Експозиція схилу (Aspect) – це напрямок, в якому "дивиться" схил, тобто напрямок найбільшого ухилу поверхні. Вона є важливим показником, що контролює вплив зовнішніх факторів, таких як сонячна радіація, вітер, дощі, на різні сторони схилу.

Визначення: Експозиція вимірюється в градусах від Півночі за годинниковою стрілкою.

Північ: 0° або 360°

Схід: 90°

Південь: 180°

Захід: 270°

Плоскі ділянки, що не мають вираженого нахилу, часто позначаються як "NoData" або мають спеціальне значення (-1 або 0).

В ГІС-системах експозиція також розраховується на основі висот сусідніх пікселів ЦМР, визначаючи азимут лінії найбільшого схилу.

Одиниці вимірювання: Градуси (°).

Вплив експозиції: Експозиція схилу значно впливає на мікроклімат та пов'язані з ним природні процеси:

Інсоляція (сонячна радіація): Схили південної експозиції отримують значно більше прямої сонячної радіації, ніж північні. Це призводить до їхнього кращого прогрівання та, відповідно, більшої сухості. Північні схили, навпаки, більш затінені, прохолодніші та вологіші. Схили східної експозиції прогріваються вранці, західної – вдень.

Температурний режим: Різниця в інсоляції зумовлює відмінності в добових та сезонних коливаннях температури ґрунту та приземного шару повітря. На північних схилах довше зберігається сніговий покрив, що впливає на тривалість сезону промерзання-відтавання ґрунтів.

Зволоженість ґрунтів: Напрямок схилу впливає на випаровування та стік води. Південні схили, як правило, більш сухі через інтенсивніше випаровування. Північні схили зберігають вологу довше, що може сприяти її накопиченню та зволоженню ґрунтових масивів.

Рослинність: Різниця в мікрокліматі та зволоженні призводить до формування різноманітних рослинних угруповань. Наприклад, на південних схилах часто ростуть посухостійкі види, тоді як на північних – більш вологолюбні. Рослинний покрив, у свою чергу, впливає на стабільність ґрунтів та захист від ерозії.

Для інженерного аналізу: Врахування експозиції схилів є важливим при плануванні дренажних систем, оцінці зсувної небезпеки (особливо для ґрунтів, чутливих до обводнення та циклів замерзання-відтавання), виборі оптимальних місць для розташування будівель з урахуванням сонячного освітлення та вітрового режиму.

1.3.3. Інші морфометричні показники (горизонтальна/вертикальна розчленованість, кривизна тощо) – короткий огляд.

Окрім крутизни та експозиції, ЦМР дозволяють розраховувати й інші морфометричні показники, які надають додаткову інформацію про форму рельєфу:

Кривизна (Curvature): Характеризує форму поверхні та її опуклість/увігнутість. Розрізняють:

• Кривизна профілю (Profile Curvature): Описує кривизну поверхні вздовж лінії найбільшого нахилу (лінії стоку). Позитивні значення вказують на опуклість (прискорює стік), негативні – на увігнутість (уповільнює стік, сприяє концентрації води).

• Планова кривизна (Planar Curvature): Описує кривизну поверхні перпендикулярно лінії найбільшого нахилу. Позитивні значення вказують на опуклість (розсіює стік), негативні – на увігнутість (концентрує стік, утворюючи промоїни).

• Загальна кривизна (General Curvature): Комбінований показник. Кривизна є важливою для детального моделювання ерозії та поверхневого стоку.

• Вертикальна розчленованість рельєфу: Характеризує перепади висот на певній площі або по довжині схилу. Зазвичай вимірюється як різниця між максимальною та мінімальною висотою в межах заданого вікна або як середня глибина розчленування. Висока вертикальна розчленованість свідчить про інтенсивні ерозійні процеси та динамічний рельєф.

• Горизонтальна розчленованість рельєфу (Густота ерозійної мережі): Описує ступінь розчленування території долинами, ярами, балками. Може вимірюватися

як довжина ерозійної мережі на одиницю площі. Висока горизонтальна розчленованість також вказує на активні ерозійні процеси та складність прокладання комунікацій.

• Площа водозбору (Catchment Area / Flow Accumulation): Це показник, що розраховується на основі ЦМР і показує, скільки вищерозташованих пікселів стікають до даного пікселя. Великі значення свідчать про концентрацію водного стоку, що може призвести до утворення потічків, ярів та підвищення ерозійної небезпеки.

Відповідно, морфометричний аналіз, особливо за допомогою ЦМР, надає повний спектр кількісних характеристик рельєфу, які є незамінними для всебічної інженерно-геодезичної оцінки території, прогнозування небезпечних процесів та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

1.4. Геоінформаційні системи (ГІС) та їх роль в аналізі рельєфу

1.4.1. Визначення ГІС, її компоненти та функції.

Геоінформаційна система (ГІС) – це інтегрована система для збору, зберігання, управління, аналізу, моделювання та візуалізації просторово-координованих даних. По суті, ГІС дозволяє поєднати інформацію про об'єкти з їхнім географічним положенням, що робить її потужним інструментом для вивчення та розуміння просторових закономірностей.

Основними компонентами ГІС є:

• Апаратне забезпечення (Hardware): Комп'ютери, сервери, периферійні пристрої (принтери, плотери, сканери, GPS-приймачі), що забезпечують роботу системи.

• Програмне забезпечення (Software): Спеціалізовані програми для роботи з геопросторовими даними (наприклад, QGIS, ArcGIS, MapInfo). Включає інструменти для введення, зберігання, аналізу та візуалізації даних.

• Дані (Data): Найважливіший компонент ГІС, що включає просторові дані (векторні – точки, лінії, полігони; растрові – супутникові знімки, ЦМР) та атрибутивні дані (інформація про об'єкти).

• Користувачі (Users): Фахівці, які використовують ГІС для вирішення своїх завдань, інтерпретують результати та приймають рішення.

• Методики (Methods): Процедури, правила та алгоритми, що регулюють роботу з ГІС, забезпечуючи її ефективне використання та достовірність результатів.

Основні функції ГІС включають:

• Введення даних: Імпорт даних з різних джерел (цифрування карт, перетворення форматів, завантаження з супутників).

Зберігання та управління даними: Організація даних у базах даних, забезпечення їхнього швидкого доступу та оновлення.

• Аналіз даних: Виконання просторових операцій (накладання шарів, буферизація, мережевий аналіз, аналіз рельєфу), статистичний аналіз, моделювання.

• Візуалізація та картографування: Створення карт, діаграм, звітів, 3D-моделей для наочного представлення результатів.

• Виведення даних: Експорт даних у різні формати для використання в інших програмах або для друку.

1.4.2. Огляд функціоналу QGIS для роботи з растровими даними.

QGIS (Quantum GIS) – це потужне, відкрите (Open Source) геоінформаційне програмне забезпечення, яке постійно розвивається і надає широкий спектр функцій для роботи з геопросторовими даними, включаючи растрові дані. Його популярність зумовлена безкоштовністю, багатоплатформністю та великою спільнотою користувачів та розробників.

Ключовий функціонал QGIS для роботи з растровими даними включає:

Підтримка широкого спектру форматів: QGIS підтримує імпорт та експорт растрових даних у безлічі форматів (GeoTIFF, ERDAS IMAGINE, NetCDF, JPEG2000 тощо), завдяки інтеграції з бібліотекою GDAL (Geospatial Data Abstraction Library).

Візуалізація та символіка: Можливість налаштування відображення растрових шарів за допомогою різних типів рендерингу (односмуговий псевдоколір, багатосмуговий колір, градації сірого), що дозволяє наочно представити дані ЦМР (як у вашій роботі).

Проєкції та системи координат: Інструменти для визначення, перевірки та перепроєктування растрових шарів у різні системи координат (наприклад, з географічних у проєктовані, як UTM), що є критично важливим для коректного аналізу.

Обробка растрових даних:

Растровий калькулятор: Дозволяє виконувати математичні операції над одним або декількома растровими шарами (наприклад, для отримання різниці висот, фільтрації).

Обрізка та склеювання: Інструменти для обрізки растрових шарів за певними межами або склеювання кількох растрових файлів в один мозаїчний набір даних.

Передискретизація: Зміна просторової роздільної здатності растрових даних.

Інструменти аналізу рельєфу: QGIS надає вбудовані інструменти для розрахунку ключових морфометричних характеристик рельєфу, що знаходяться у меню "Растр" -"Аналіз рельєфу". До них належать:

"Схил" (Slope): Розрахунок крутизни схилів у градусах або відсотках.

"Аспект" (Aspect): Розрахунок експозиції схилів (напрямку).

"Відмивка" (Hillshade): Створення тіньового рельєфу для покращення візуалізації.

"Перепад висот" (Relief): Розрахунок різниці висот.

"Кривизна" (Curvature): Розрахунок різних типів кривизни.

"Гідрологічний аналіз" (Hydrology tools): Інструменти для визначення напрямків стоку, водозборів, русел річок.

Компоновка друку (Print Layout): Модуль для створення високоякісних картографічних макетів з усіма необхідними елементами (назва, легенда, масштаб, стрілка півночі, координатна сітка) для подальшого експорту та друку.

1.4.3. Переваги використання ГІС для морфометричного аналізу.

Застосування ГІС для морфометричного аналізу рельєфу має низку суттєвих переваг порівняно з традиційними методами:

Швидкість та ефективність: ГІС дозволяє автоматизувати процес розрахунку морфометричних показників для великих територій, що значно скорочує час виконання робіт порівняно з ручними розрахунками або використанням обмежених аналогових методів.

Точність та об'єктивність: Розрахунки в ГІС базуються на цифрових моделях рельєфу (ЦМР), що забезпечує високу математичну точність та об'єктивність отриманих результатів, мінімізуючи вплив людського фактора.

Комплексний аналіз: ГІС дає можливість легко поєднувати та накладати різні тематичні шари (карти крутизни, експозиції, геодезичні карти, ґрунти, інфраструктуру) для проведення комплексного просторового аналізу та виявлення прихованих закономірностей.

Візуалізація та інтерпретація: Результати аналізу можуть бути представлені у вигляді наочних карт та 3D-моделей, що значно полегшує їхню інтерпретацію, розуміння та комунікацію з іншими фахівцями та зацікавленими сторонами.

Моделювання та прогнозування: На основі морфометричних даних, отриманих у ГІС, можна розробляти та запускати геоморфологічні та інженерно-геодезичні моделі (наприклад, моделі ерозії, зсувів), прогнозуючи розвиток процесів у часі та просторі.

Актуальність даних: Можливість використання актуальних супутникових даних (як SRTM, ASTER, Copernicus) дозволяє оперативно оновлювати інформацію про рельєф та швидко реагувати на зміни.

Економічна доцільність: Використання безкоштовного програмного забезпечення (як QGIS) та загальнодоступних супутникових даних значно знижує вартість досліджень порівняно з традиційними польовими роботами або комерційним програмним забезпеченням.

Загалом, ГІС відіграють ключову роль у сучасному морфометричному аналізі рельєфу, надаючи ефективні інструменти для отримання, обробки, аналізу та візуалізації просторових даних, що є критично важливим для інженерно-геодезичних вишукувань та прийняття обґрунтованих рішень.

Розділ 2. Матеріали та методи дипломної роботи

Цей розділ присвячений детальному опису досліджуваної території, а також характеристиці вихідних даних та застосованих методів, що були використані для побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та її подальшого інженерного аналізу. Метою даного розділу є забезпечення відтворюваності результатів дослідження та прозорості застосованих підходів.

2.1. Характеристика досліджуваної території

Досліджувана ділянка розташована в Івано-Франківській області, Україна, та охоплює частину міста Яремче і прилеглі до нього території. Цей регіон є об'єктом пильної уваги для інженерного аналізу, що зумовлено інтенсивним розвитком туристичної та рекреаційної інфраструктури, зростанням житлової забудови, а також наявністю значних природних факторів, таких як перепади висот, круті схили та потенційна загроза селевих потоків чи зсувів, типових для гірської місцевості. Комплексний інженерний аналіз рельєфу є критично важливим для сталого розвитку цієї території та забезпечення безпеки її мешканців і відвідувачів.

2.1.1. Точне визначення меж ділянки

Точні межі досліджуваної території визначені наступними просторовими координатами. Для виконання інженерного аналізу та забезпечення сумісності з вихідними супутниковими даними SRTM DEM, а також для зручності метричних розрахунків, робочі дані були оброблені в проектованій системі координат WGS 84 / Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 35N (EPSG:32635).

В Україні офіційною Державною геодезичною системою координат є УСК-2000. Однак, для глобальних супутникових даних, таких як SRTM DEM, стандартом є

географічна система WGS 84, а UTM-проекція є її широко визнаним метричним представленням, яке добре підходить для просторового аналізу, особливо для ділянок, розташованих в межах однієї UTM-зони. Розташування міста Яремче та прилеглих територій знаходиться в зоні дії UTM Zone 35N, що мінімізує спотворення відстаней та площ при використанні даної проекції.

Координати кутових точок досліджуваної ділянки в системі WGS 84 / UTM Zone 35N становлять:

Мінімальні координати (X, Y): (314487.76,5365705.05) м

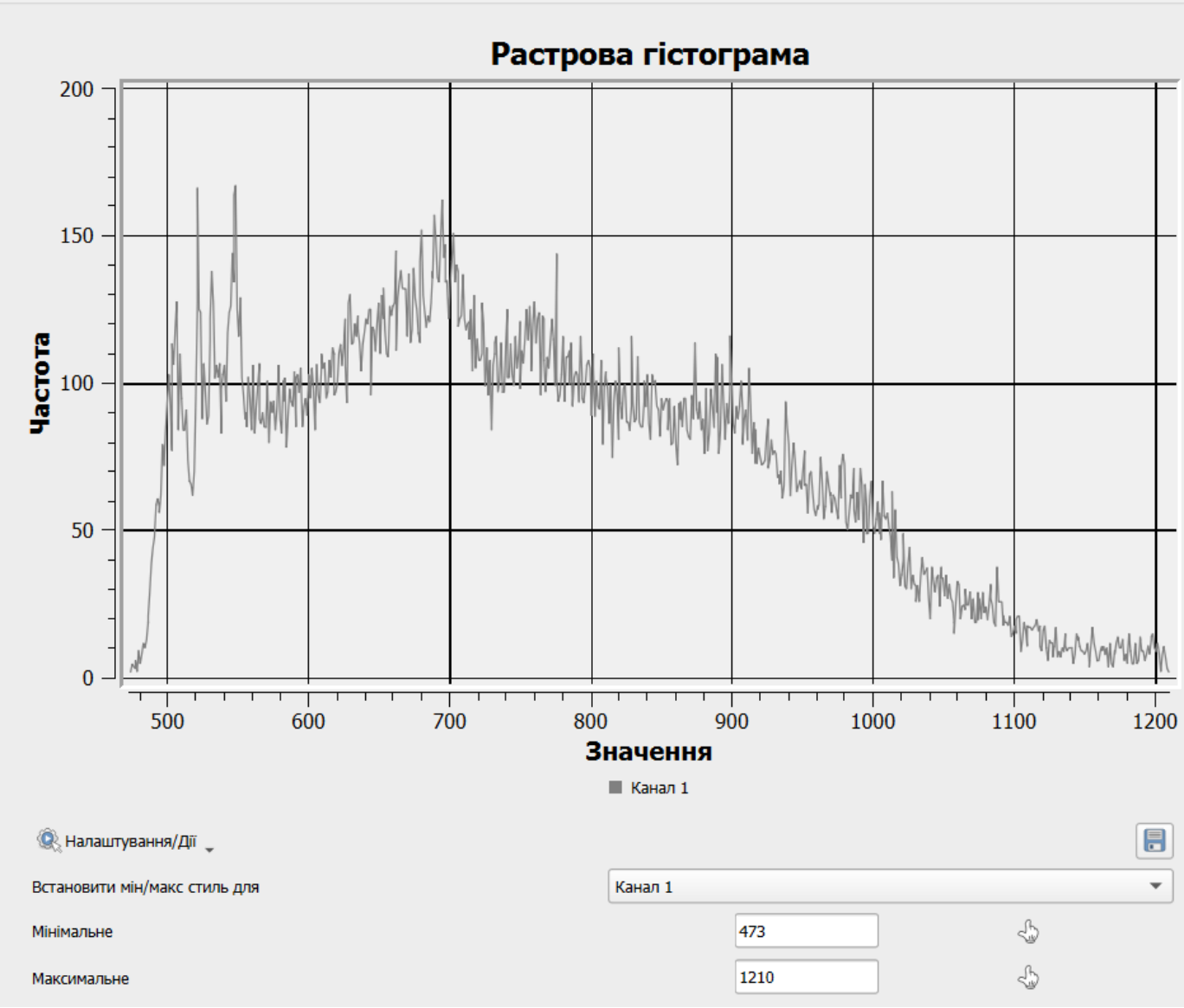
Максимальні координати (X, Y): (320464.82,5371901.67) м

Зазначені координати охоплюють територію площею приблизно 37,04 км^2

(розрахункова довжина по осі X становить близько 5,98 км, по осі Y – близько 6,20 км).

2.1.2. Опис рельєфу та його значення для інженерної діяльності

Дана територія характеризується складним, сильно розчленованим гірським рельєфом, що є типовим для Українських Карпат. Перепади висот на досліджуваній ділянці значні, варіюючись від приблизно 470 м до понад 1200 м над рівнем моря (згідно з даними ЦМР, що відображено на гістограмі розподілу висот, див. Рис. 2.1)



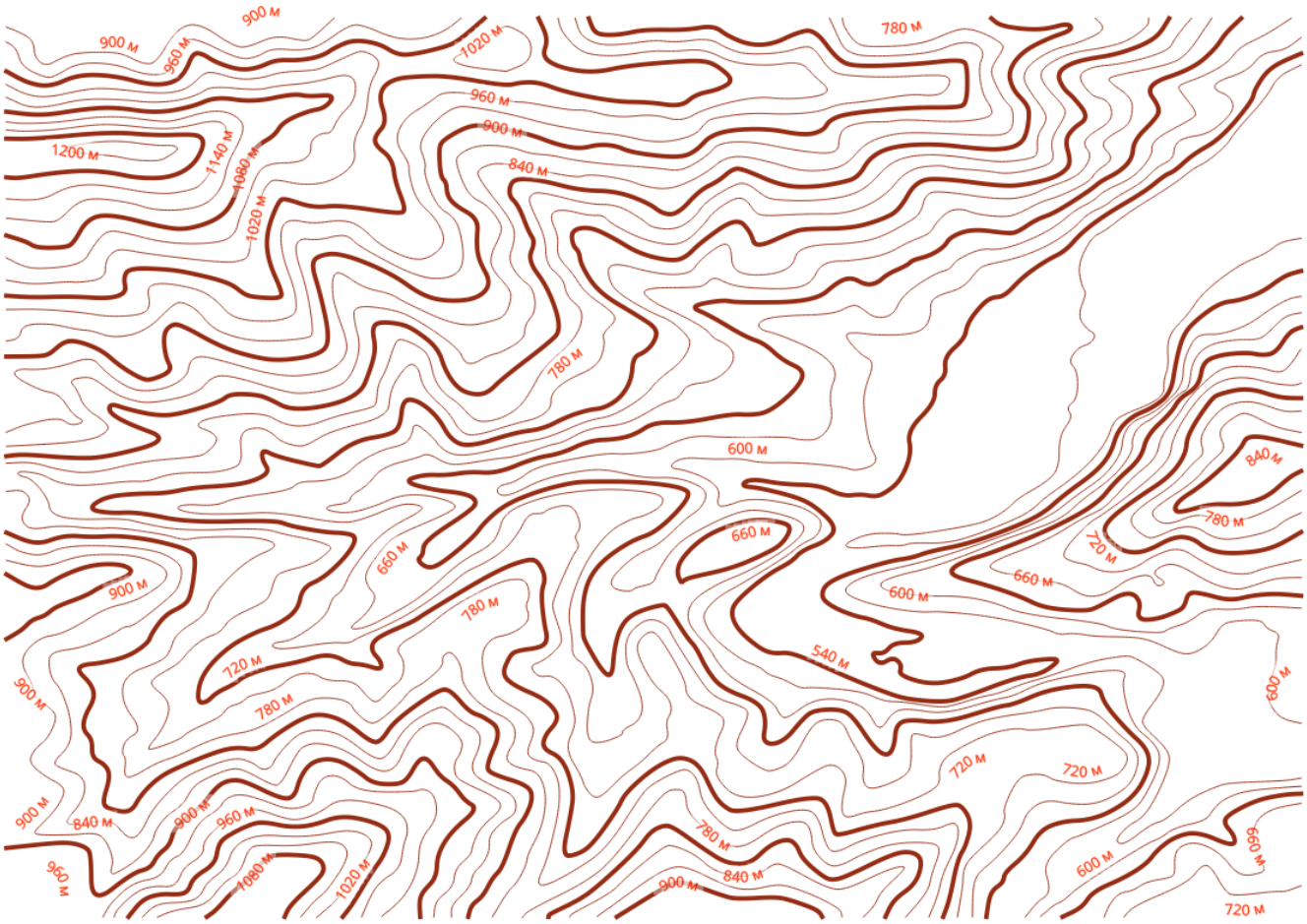
(Рис. 2.1)

Значення (Value): Це значення пікселів (pixel values) растрового шару. У контексті цифрової моделі рельєфу (ЦМР), ці значення представляють висоту над рівнем моря в метрах. На гістограмі (Рис. 2.1) вісь "Значення" показує діапазон висот від 473 до 1210 метрів.

Частота (Frequency): Це кількість пікселів, які мають певне значення висоти. Іншими словами, вісь "Частота" показує, як часто зустрічається кожне конкретне значення висоти на ЦМР. Наприклад, якщо стовпчик над значенням 700 метрів є найвищим, це

означає, що висота 700 метрів (або діапазон навколо 700) є найпоширенішою на території дослідження.

Одним з ключових способів візуалізації рельєфу та його основних форм є побудова горизонталей, або ізоліній. Ізолінії являють собою лінії, що з'єднують точки з однаковою абсолютною висотою над рівнем моря. На Рис. 2.2 наведено карту з горизонталями, розрахованими на основі ЦМР.



(Рис.2.2)

Ізолінії дозволяють візуально оцінити форми рельєфу: чим ближче розташовані ізолінії одна до одної, тим крутіший схил; чим далі – тим пологіший.

Також за формою ізоліній можна ідентифікувати хребти (ізолінії, що згинаються назустріч зниженню висот) та улоговини (ізолінії, що згинаються назустріч підвищенню висот). Підписи до ліній вказують на їхню висоту в метрах, забезпечуючи точну інтерпретацію

Рельєф представлений поєднанням:

Крутих та пологих схилів: Аналіз горизонталей (Рис.2.2) показує наявність ділянок з різким зближенням ізоліній, що вказує на круті схили (наприклад, у західній частині ділянки, де висоти досягають 1200 м). Водночас, присутні й більш пологі ділянки з розрідженими горизонталями, що характерно для вододільних плато або розширених долин.

Глибоких V-подібних долин: Ділянка прорізана численними річковими долинами (зокрема, річкою Прут та її притоками), що мають чітко виражену V-подібну форму, свідченням активних ерозійних процесів. Горизонталі в цих місцях зближені і мають характерні вигини, що вказують на русла водотоків.

Чітко виражених вододілів: Між долинами розташовані лінійні підвищення – вододіли, які мають переважно округлі або видовжені форми.

Такий тип рельєфу істотно впливає на інженерну діяльність та сталий розвиток території:

Гідрологічний режим: Складний рельєф сприяє швидкому стоку поверхневих вод, що підвищує ймовірність формування селевих потоків, паводків та раптових підтоплень, особливо під час інтенсивних опадів та активного сніготанення. Це вимагає розробки ефективних систем дренажу та протипаводкових заходів.

Геоморфологічні процеси: Наявність крутих схилів створює передумови для розвитку небезпечних геоморфологічних процесів, таких як ерозія, зсуви та обвали. Ці процеси становлять значний ризик для інженерних споруд, транспортної інфраструктури та безпеки населення, вимагаючи ретельного аналізу стабільності схилів.

Обмеження для будівництва: Пересічений рельєф обмежує вибір ділянок для будівництва та прокладання комунікацій, вимагаючи проведення складних земляних робіт, будівництва підпірних стінок та застосування спеціальних інженерних рішень для адаптації до умов місцевості.

Рекреаційний потенціал: Попри виклики, гірський рельєф є основою високого рекреаційного потенціалу Яремче, визначаючи привабливість для туризму, піших маршрутів та зимових видів спорту. Інженерний аналіз дозволяє оптимізувати розміщення туристичної інфраструктури, мінімізуючи вплив на природне середовище та забезпечуючи безпеку відвідувачів.

Отже, детальна цифрова модель рельєфу є критично важливим інструментом для планування та управління територією Яремче, дозволяючи виконати точне планування майбутніх будівельних робіт, оцінку ризиків, розробку заходів зі стабілізації ґрунтів, а також оптимізувати використання території з урахуванням її природних особливостей та потенціалу розвитку.

2.2. Вихідні дані

Для вирішення поставлених у роботі завдань та побудови цифрової моделі рельєфу досліджуваної території були використані наступні вихідні дані:

2.2.1. Супутникові дані для побудови ЦМР

Основним джерелом даних для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) слугувала цифрова модель рельєфу SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Digital Elevation Model (SRTM DEM) з роздільною здатністю 30 метрів.

Назва джерела: OpenTopography (SRTM Digital Elevation Model (SRTM DEM) 30m).

Просторова роздільна здатність: 30 метрів. Кожен піксель ЦМР представляє квадрат 30x30 метрів на поверхні Землі, що забезпечує адекватний рівень деталізації для інженерного аналізу на регіональному та локальному рівнях.

Дата зйомки: Дані SRTM були отримані під час одинадцятиденної космічної місії шатла Endeavour у лютому 2000 року.

Система координат вихідних даних: Зазвичай SRTM DEM поширюються в географічній системі координат WGS 84. Для подальшої роботи та інженерного аналізу дані були перепроєктовані в проектовану систему координат WGS 84 / UTM Zone 35N (EPSG:32635), яка забезпечує лінійні виміри в метрах та мінімізує спотворення на території дослідження.

Обґрунтування вибору: Вибір SRTM DEM 30m обґрунтовується такими ключовими факторами:

Доступність та безоплатність: Дані SRTM є загальнодоступними та поширюються вільно, що дозволяє проводити дослідження без значних фінансових витрат на вихідні матеріали.

Якість та точність: Незважаючи на дату зйомки, SRTM DEM вважається надійним джерелом для глобальної ЦМР, забезпечуючи достатню якість та відносну точність для більшості інженерно-геодезичних задач на даному масштабі. Вертикальна точність даних SRTM (залежно від регіону) становить до ±10−15 метрів.

Відповідність масштабу завдання: Роздільна здатність 30 метрів є оптимальною для проведення інженерного аналізу ділянок значної площі, дозволяючи ідентифікувати основні форми рельєфу, водозбори, схили та інші елементи, необхідні для планування та оцінки ризиків. Вища роздільна здатність була б надмірною і вимагала б значно більших обчислювальних ресурсів без суттєвого збільшення практичної цінності для поточного завдання.

2.2.2. Інші допоміжні дані

Для підвищення достовірності та візуального контролю результатів, а також для уточнення географічної прив'язки, були використані наступні допоміжні дані:

Супутникові знімки високої роздільної здатності: Знімки, отримані з відкритого джерела OpenTopography, використовувалися для візуальної інтерпретації місцевості, уточнення розташування об'єктів та перевірки відповідності побудованої ЦМР реальній ситуації на місцевості. Це дозволило оцінити точність ЦМР у місцях, де наявні чіткі орієнтири.

2.3. Програмне забезпечення та інструменти

Для виконання поставлених завдань з побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та її подальшого інженерного аналізу використовувався комплекс програмного забезпечення та спеціалізованих інструментів, що забезпечують ефективну обробку геопросторових даних.

2.3.1. Геоінформаційна система QGIS

Основним програмним забезпеченням, що використовувалось у дослідженні, була вільна та відкрита геоінформаційна система QGIS. Ця система була обрана завдяки її широкому функціоналу, можливостям роботи з різноманітними форматами

геопросторових даних, потужним інструментам обробки растрових та векторних даних, а також активній підтримці спільноти.

Використовувана версія: QGIS Desktop 3.34.4

Основні функції та інструменти QGIS, що застосовувалися:

Управління даними: Імпорт та експорт геопросторових даних, робота з різними форматами (GeoTIFF, Shapefile, CSV тощо).

Проектування та перепроектування: Перетворення систем координат шарів (наприклад, з географічної WGS 84 в проектовану UTM Zone 35N) за допомогою вбудованих інструментів.

Побудова та обробка ЦМР:

Завантаження та візуалізація растрових даних SRTM DEM.

Заповнення пропусків (voids) у DEM (якщо вони були) за допомогою алгоритмів інтерполяції.

Інструменти растрового аналізу (Raster analysis): Використання функцій для розрахунку ухилів (Slope), аспектів (Aspect), затінення рельєфу (Hillshade) та створення карт водозборів.

Генерація ізоліній (горизонталей): Створення векторних горизонталей з растрової ЦМР з заданим інтервалом 30 м.

Картографічна візуалізація та компонування: Створення картографічних макетів для візуального представлення результатів дослідження (гіпсометричні карти, карти ухилів тощо).

2.4. Методика побудови та обробки ЦМР

Побудова цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та її подальша обробка є ключовим етапом дослідження, що дозволяє отримати просторові дані для інженерного аналізу. Цей процес включав послідовне виконання кроків, від завантаження вихідних даних до їхньої попередньої обробки та налаштування.

2.4.1. Завантаження та імпорт вихідних даних у QGIS

Для створення базової цифрової моделі рельєфу використовувалися дані SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Digital Elevation Model (DEM) з роздільною здатністю 30 метрів.

Опис процесу отримання даних SRTM:

Дані SRTM DEM були отримані з офіційного відкритого геопросторового порталу OpenTopography.org (https://opentopography.org/). Цей портал є цінним джерелом високоякісних топографічних даних, зокрема DEM, отриманих з різних місій, включаючи SRTM. Процес завантаження передбачав наступні кроки:

Перехід на веб-портал OpenTopography.org.

Вибір розділу "Data" (Дані) та пошук наборів даних SRTM.

Визначення області інтересу (Area of Interest, AOI) шляхом навігації по карті або введення географічних координат досліджуваної ділянки (Яремче та прилеглі території).

Вибір відповідного набору даних, а саме "SRTM GL3 (Global 30m)" DEM.

Налаштування параметрів завантаження, таких як вибір формату вихідного файлу (GeoTIFF) та системи координат (WGS 84, як вихідна для SRTM).

Запуск процесу генерації даних та подальше завантаження отриманих файлів GeoTIFF на локальний комп'ютер.

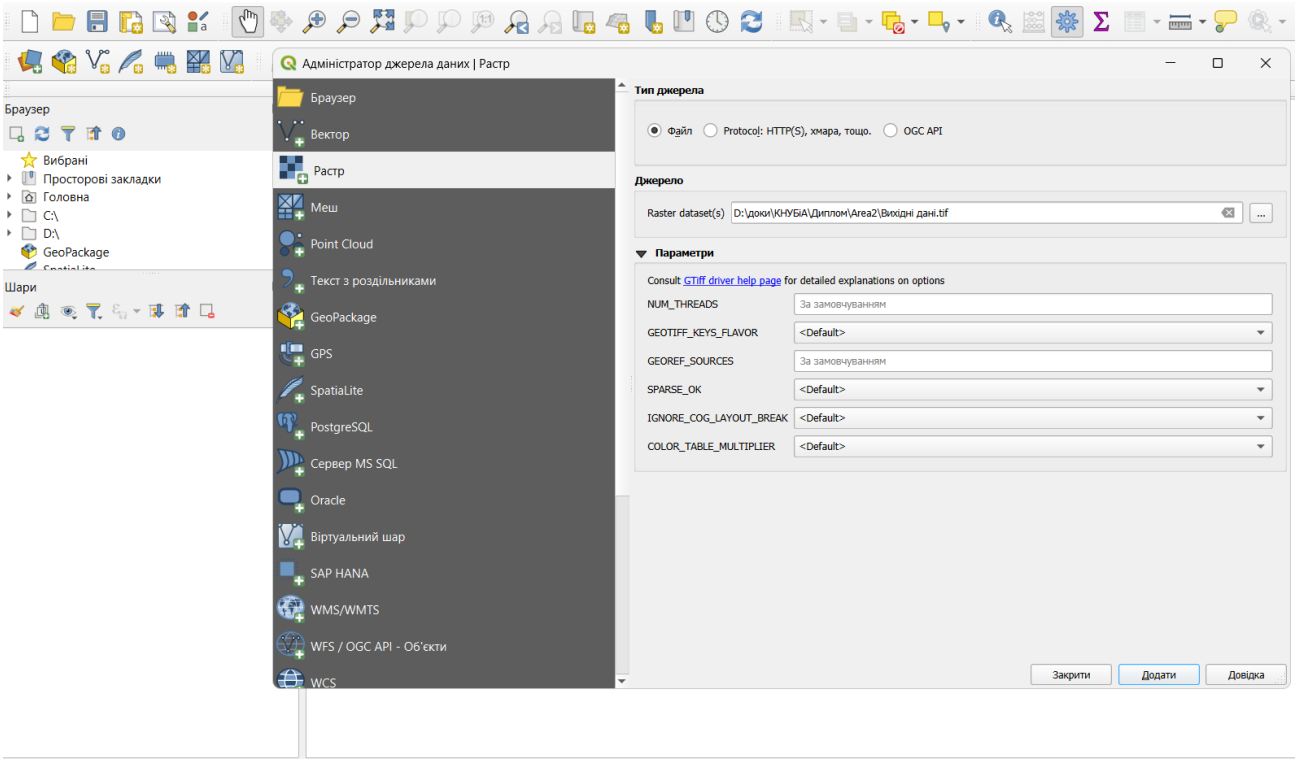
Послідовність імпорту даних у QGIS:

Після завантаження, файли SRTM DEM були імпортовані в середовище QGIS (версія 3.34.4 'Bratislava') для подальшої обробки:

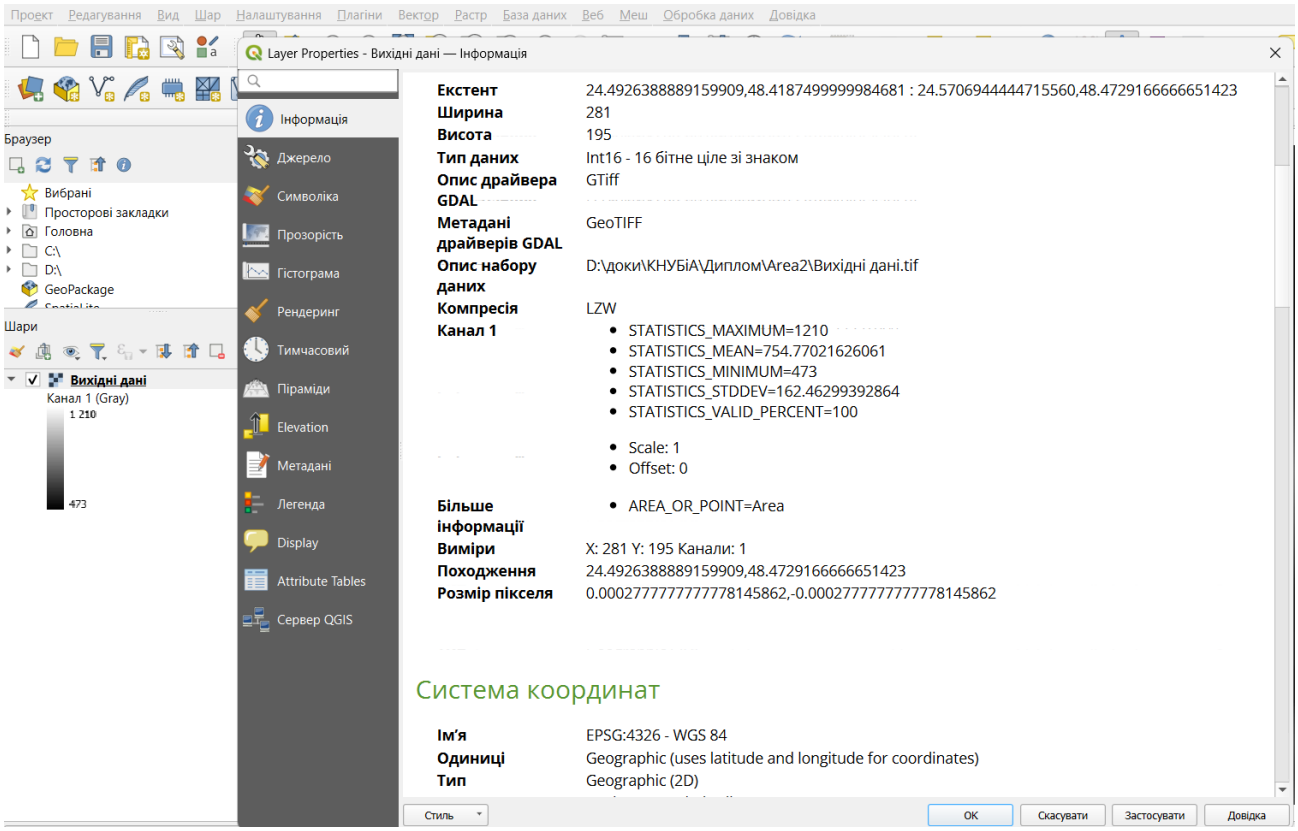
Запуск програмного забезпечення QGIS.

Додавання растрового шару шляхом перетягування файлу GeoTIFF безпосередньо у вікно карти QGIS або через меню Шар (Layer) → Додати шар (Add Layer) → Додати растровий шар (Add Raster Layer) (Рис. 2.3).

Після імпорту, QGIS автоматично розпізнає вбудовану систему координат SRTM DEM (географічна WGS 84, EPSG:4326) (Рис. 2.4), але її коректність була верифікована на наступному етапі попередньої обробки.



(Рис. 2.3)



(Рис. 2.4)

2.4.2. Попередня обробка ЦМР

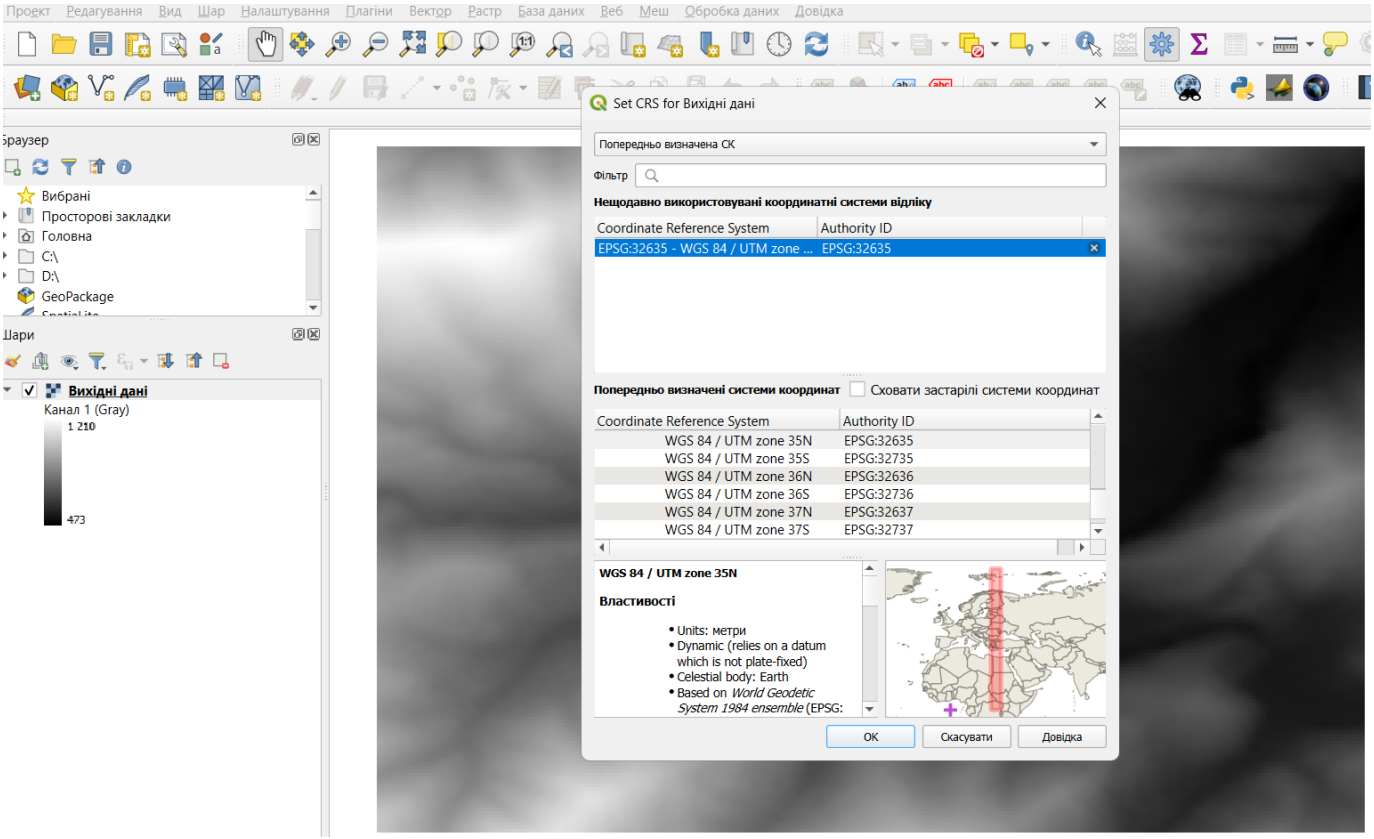
Попередня обробка отриманих даних є критично важливою для забезпечення їхньої точності та придатності для подальшого інженерного аналізу. Вона включала перевірку системи координат та її трансформацію, а також вирішення можливих проблем з даними.

Перевірка та налаштування системи координат (CRS) ЦМР:

Першим кроком була перевірка поточної системи координат імпортованого растрового шару. Це виконувалось шляхом доступу до Властивостей шару (Layer Properties) → Джерело (Source) → Система координат (CRS). Було підтверджено, що імпортовані дані мають географічну систему координат WGS 84 (EPSG:4326), що відповідає стандартному формату розповсюдження SRTM DEM.

Опис процесу перепроєктування ЦМР у відповідну метричну систему координат:

Для виконання точних метричних розрахунків (вимірювання відстаней, площ, об'ємів) та інженерного аналізу, було проведено перепроєктування ЦМР з географічної системи WGS 84 (EPSG:4326) у проектовану систему координат WGS 84 / Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 35N (EPSG:32635) (Рис. 2.5).



(Рис. 2.5)

Обґрунтування вибору:

Відповідність зоні дослідження: Місто Яремче та прилегла територія, що є об'єктом дослідження, повністю розташовані в зоні дії UTM Zone 35N, що мінімізує спотворення відстаней та площ при використанні даної проекції.

Метричні одиниці: Система UTM використовує метри як одиниці виміру, що є необхідним для інженерних розрахунків.

Сумісність з вихідними даними: Хоча вихідні дані є в WGS 84, UTM є стандартним способом їх проектування для аналітичних цілей.

Міжнародний стандарт: WGS 84 / UTM є широко визнаним міжнародним стандартом для картографування та просторового аналізу, що забезпечує сумісність та відтворюваність результатів.

Процес перепроєктування в QGIS:

У QGIS було обрано імпортований растровий шар SRTM DEM.

Використано інструмент Перепроєктувати шар (Warp (reproject)) з меню Растр (Raster) → Проекції (Projections).

У вікні інструменту Перепроєктувати шар в якості Вихідної CRS (Source CRS) була вказана EPSG:4326 - WGS 84, а в якості Цільової CRS (Target CRS) – EPSG:32635 - WGS 84 / UTM zone 35N.

В якості Методу повторної вибірки (Resampling method) був обраний Білінійний (Bilinear), оскільки він забезпечує згладженіші переходи висот, що є прийнятним для ЦМР.

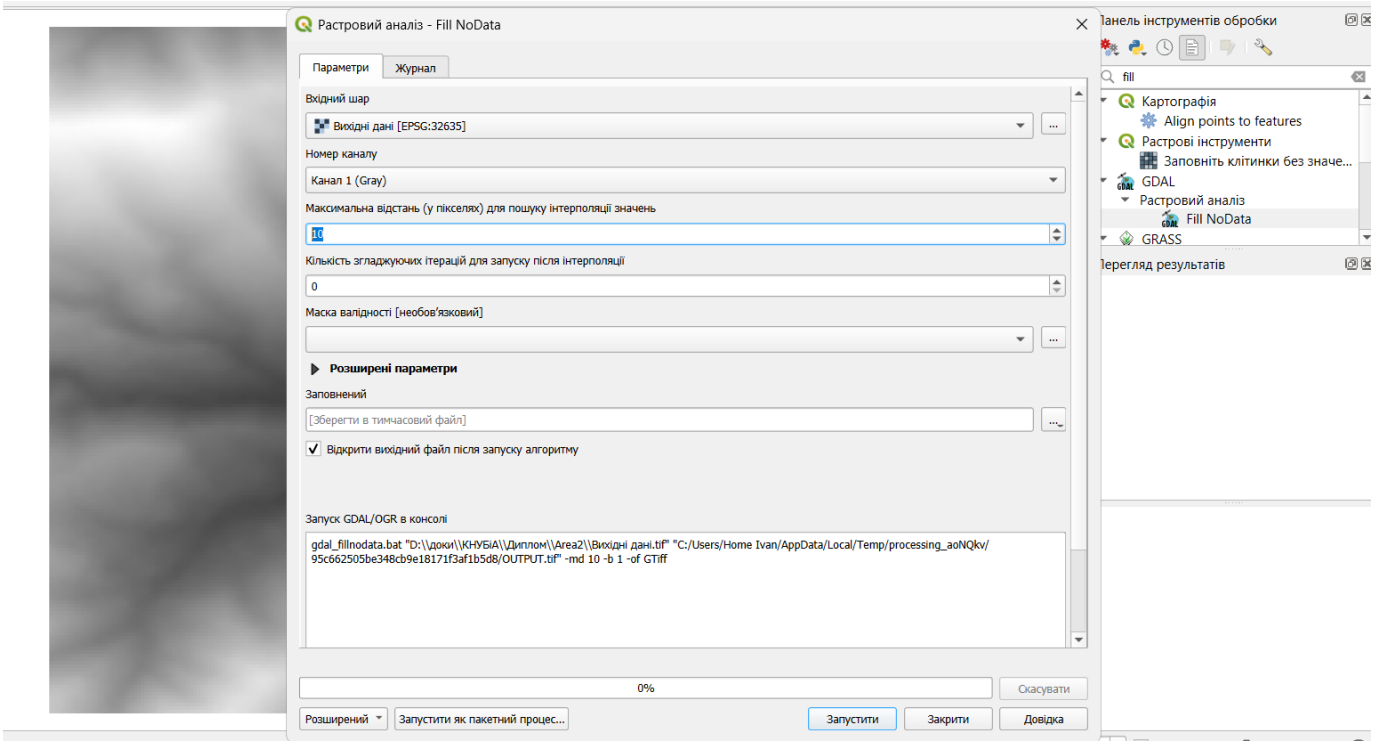
Збереження результату у новий файл GeoTIFF (.tif), що є перепроєктованою ЦМР.

Вирішення можливих проблем з даними (заповнення "дірок", виправлення артефактів):

Дані SRTM DEM, попри їхню високу якість, іноді можуть містити незначні пропуски (так звані "дірки" або "voids"), які виникають через особливості радарного знімання (наприклад, тіні від гір, водні поверхні).

Перед початком аналізу, ЦМР була візуально перевірена на наявність таких пропусків. У разі їх виявлення, використовувався інструмент Заповнити пропуски (Fill missing data) з пакета SAGA GIS, інтегрованого в QGIS (меню Процесинг (Processing) →

Панель інструментів (Toolbox) → GDAL → Fill NoData (Рис. 2.6). Це дозволило забезпечити цілісність даних ЦМР.



(Рис. 2.6)

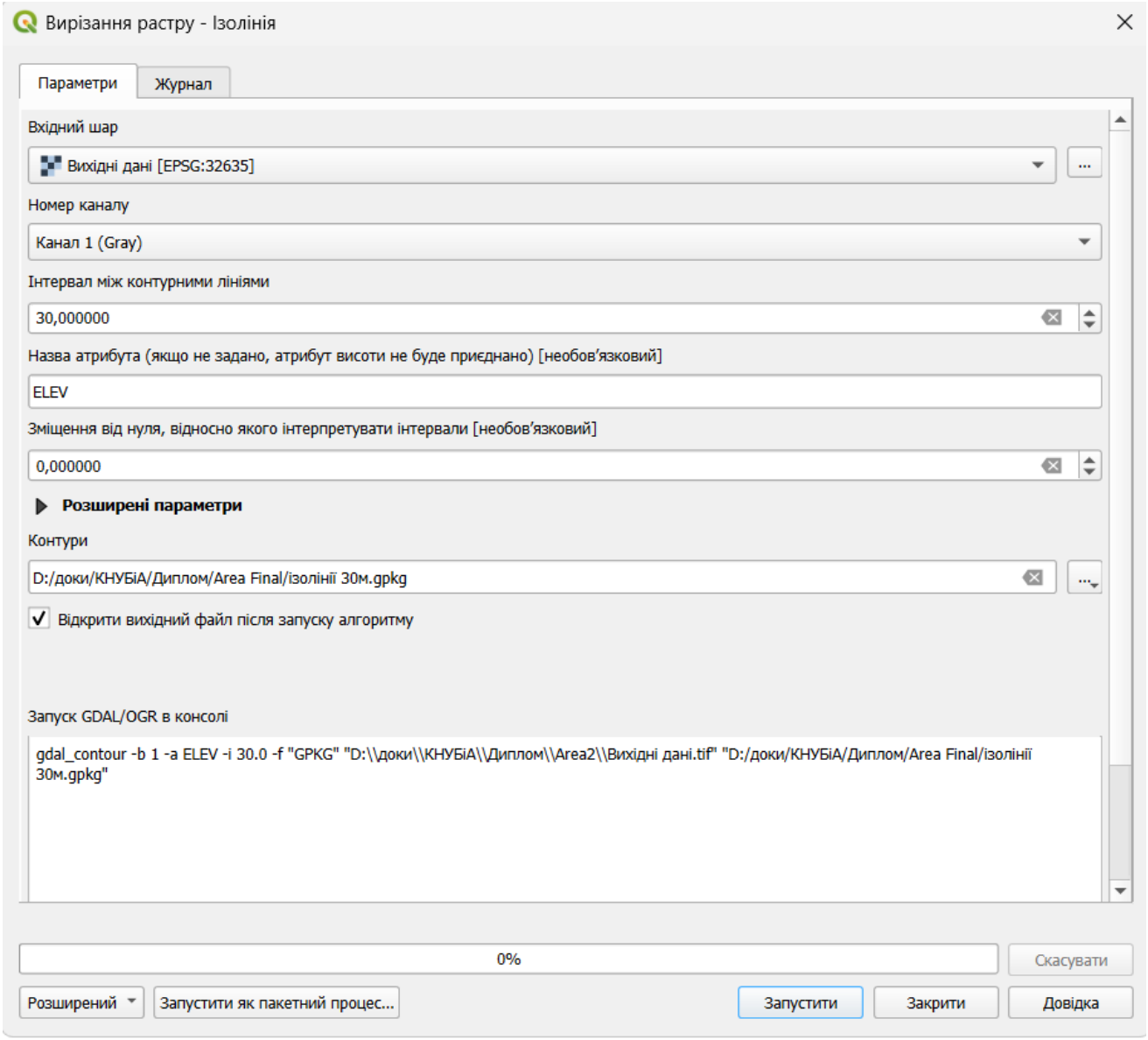
2.4.3. Генерування похідних продуктів ЦМР та їх візуалізація

На основі підготовленої ЦМР були отримані похідні продукти, необхідні для інженерного аналізу та картографічної візуалізації.

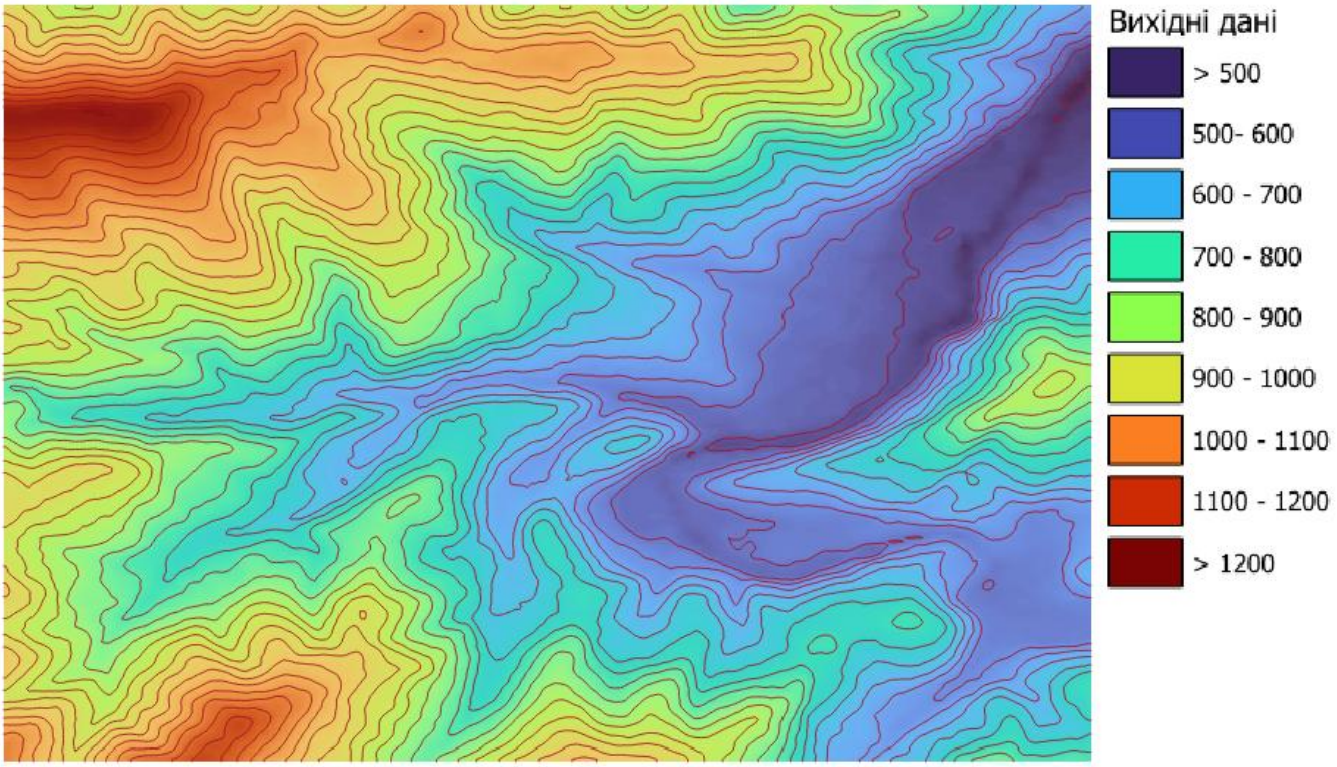
Генерування горизонталей (ізоліній):

Одним з ключових похідних продуктів є векторний шар горизонталей, який відображає висотні характеристики рельєфу. Генерування горизонталей здійснювалося за допомогою інструменту Ізолінії (Contour) в QGIS (меню Растр (Raster) → Витяг (Extraction) → Ізолінії). Були встановлені наступні параметри:

Інтервал ізоліній: Було обрано інтервал 30 метрів, що забезпечує достатню деталізацію рельєфу для обраного масштабу аналізу (Рис. 2.7).



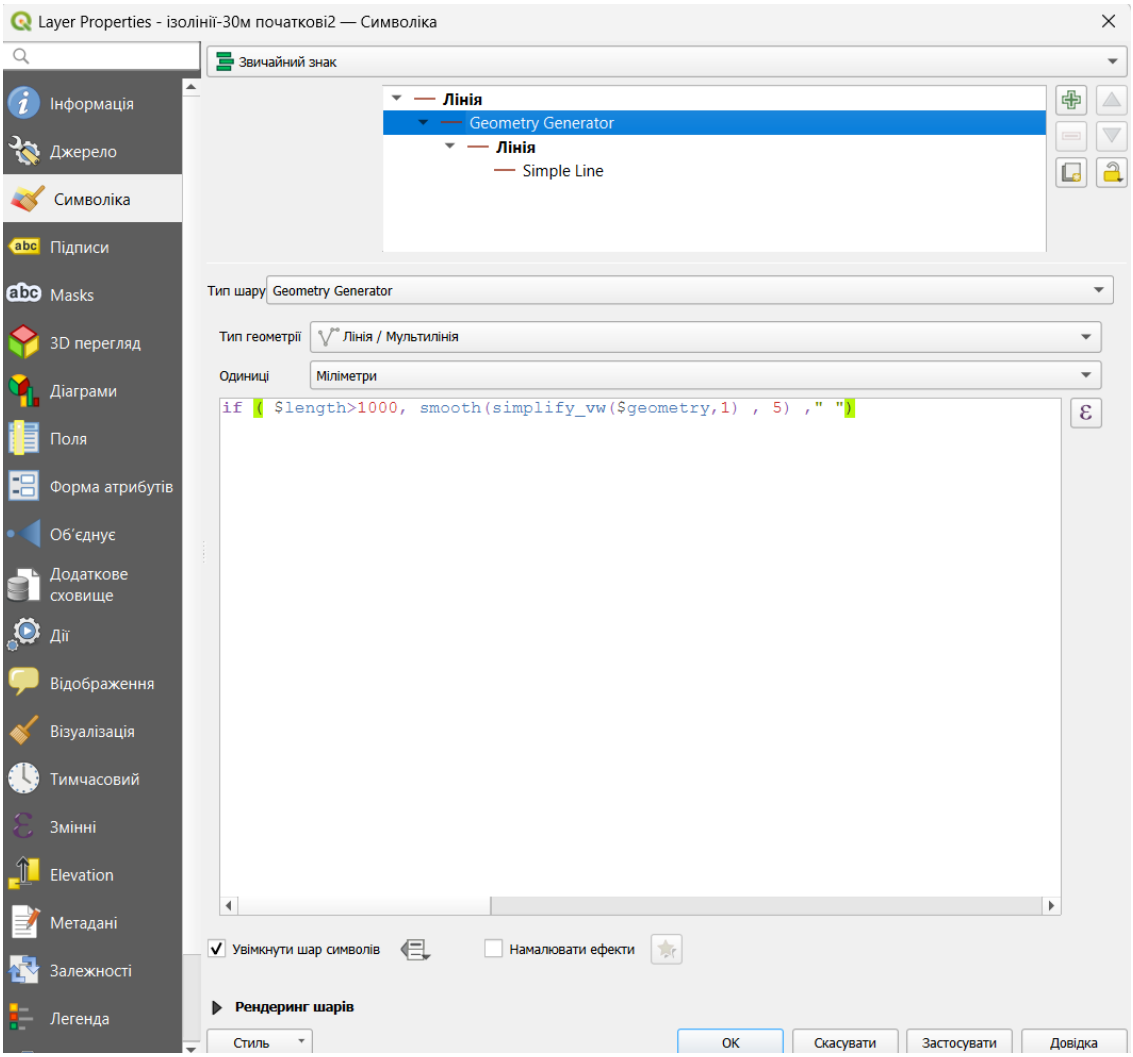
(Рис. 2.7)



(Рис. 2.8)

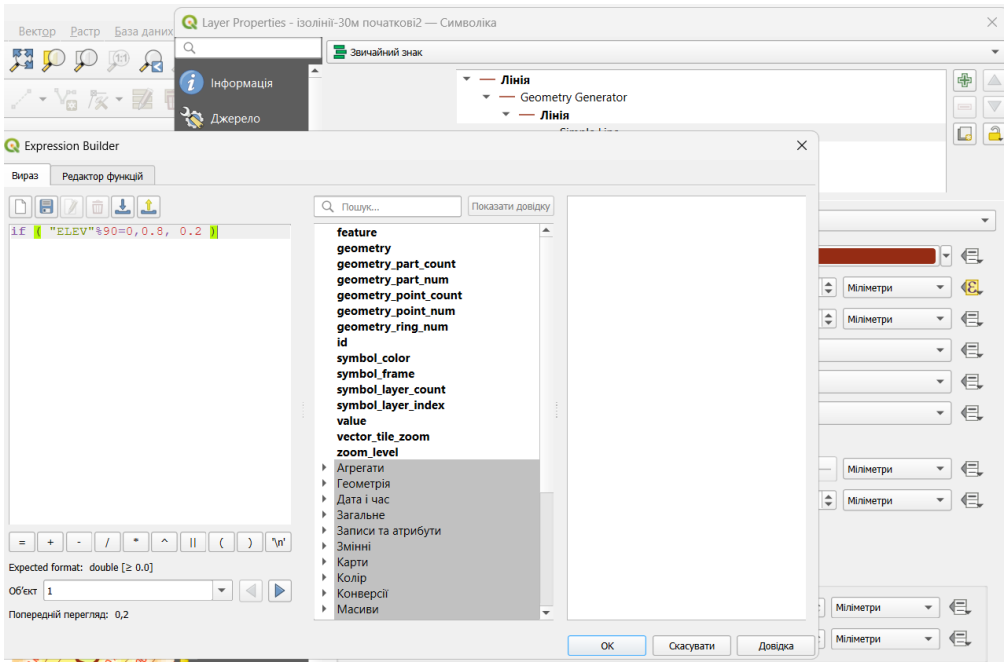
Додаткові параметри та стилізація горизонталей: Для покращення візуалізації та інформативності карти горизонталей, а також для виключення дрібних артефактів, були застосовані спеціальні налаштування стилізації (стилі шару) та геообробки, що використовують мову виразів QGIS:

Згладжування та спрощення геометрії: Для підвищення візуальної якості горизонталей та зменшення надмірної деталізації застосовувався вираз if ($length > 1000, smooth(simplify_vw($geometry, 1), 5), “ “) (Рис. 2.8). Цей вираз забезпечує згладжування (функція smooth) та спрощення геометрії (функція simplify_vw з толерантністю 1 метр) для горизонталей, довжина яких перевищує 1000 метрів. Це дозволило усунути дрібні "зазубрини" та невеликі артефакти, зберігаючи загальну форму ізоліній. Горизонталі меншої довжини зберігалися без змін, щоб не втратити дрібні форми рельєфу там, де це доречно.



(Рис. 2.8)

Визначення товщини горизонталей: Для візуального виділення основних горизонталей (кратних 60 метрам) застосовувався вираз if ("ELEV" % 60 = 0, 0.8, 0.2) для налаштування товщини лінії (Рис. 2.9). Таким чином, основні горизонталі (наприклад, 500 м, 550 м, 600 м) мають товщину 0.8 мм, а проміжні – 0.2 мм, що значно полегшує читання карти.



(Рис. 2.9)

Написання висотних відміток: Для автоматичного підписування горизонталей використовувався вираз if ("ELEV" % 100 = 0, "ELEV" || ' м', ''). Цей вираз забезпечує відображення числових значень висоти (з додаванням одиниці виміру " м") лише для горизонталей, кратних 100 метрам (наприклад, 500 м, 600 м). Це дозволяє уникнути перевантаження карти підписами, зберігаючи її читабельність.

2.5. Методика розрахунку морфометричних показників рельєфу

Морфометричні показники рельєфу, такі як крутизна та експозиція схилів, є основними характеристиками, що відображають форму та орієнтацію земної поверхні. Їхній розрахунок на основі цифрової моделі рельєфу (ЦМР) є невід'ємною частиною інженерного аналізу, оскільки вони безпосередньо впливають на гідрологічні процеси, стійкість схилів, мікроклімат та придатність території для

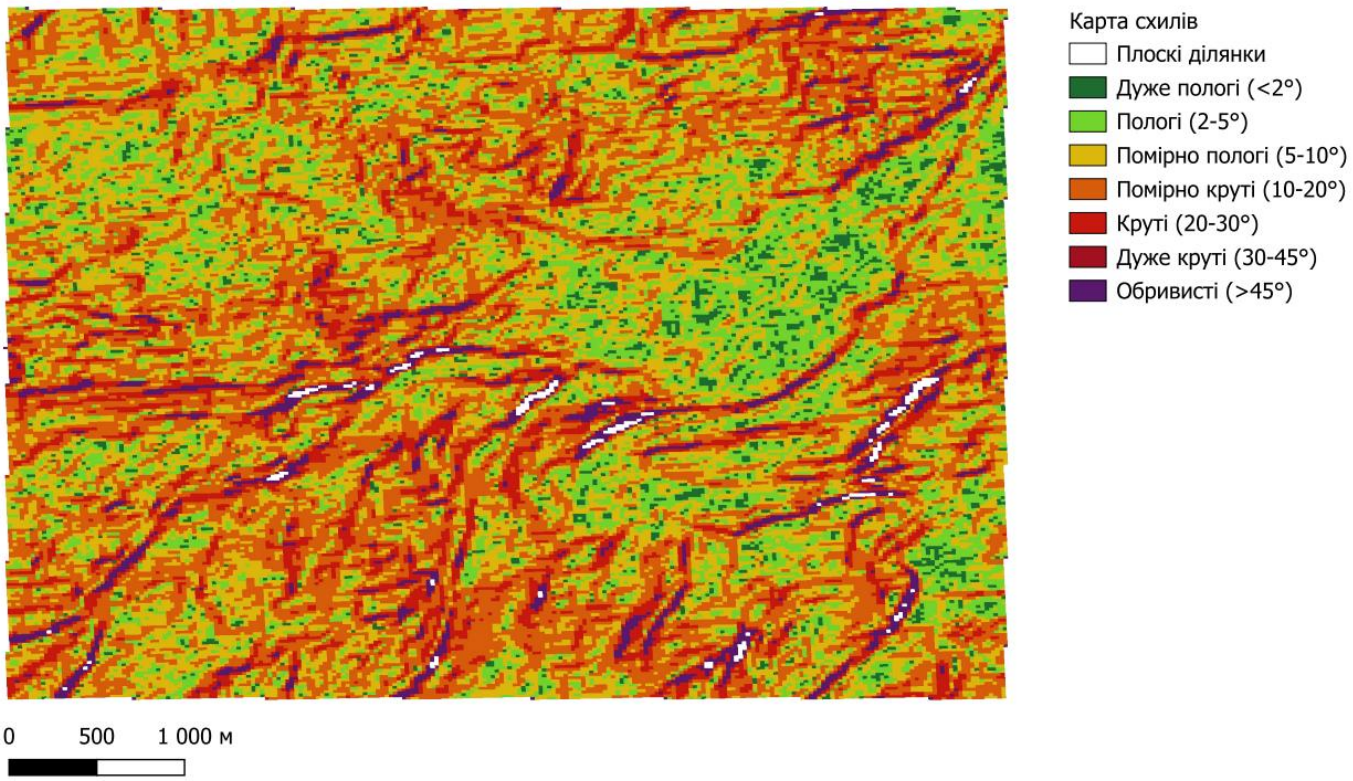
різних видів діяльності. Усі розрахунки виконувалися в середовищі QGIS Desktop 3.34.4 'Bratislava'.

2.5. Методика розрахунку морфометричних показників рельєфу

Морфометричні показники рельєфу, такі як крутизна та експозиція схилів, є основними характеристиками, що відображають форму та орієнтацію земної поверхні. Їхній розрахунок на основі цифрової моделі рельєфу (ЦМР) є невід'ємною частиною інженерного аналізу, оскільки вони безпосередньо впливають на гідрологічні процеси, стійкість схилів, мікроклімат та придатність території для різних видів діяльності. Усі розрахунки виконувалися в середовищі QGIS Desktop 3.34.4 'Bratislava'.

2.5.1. Розрахунок крутизни схилів

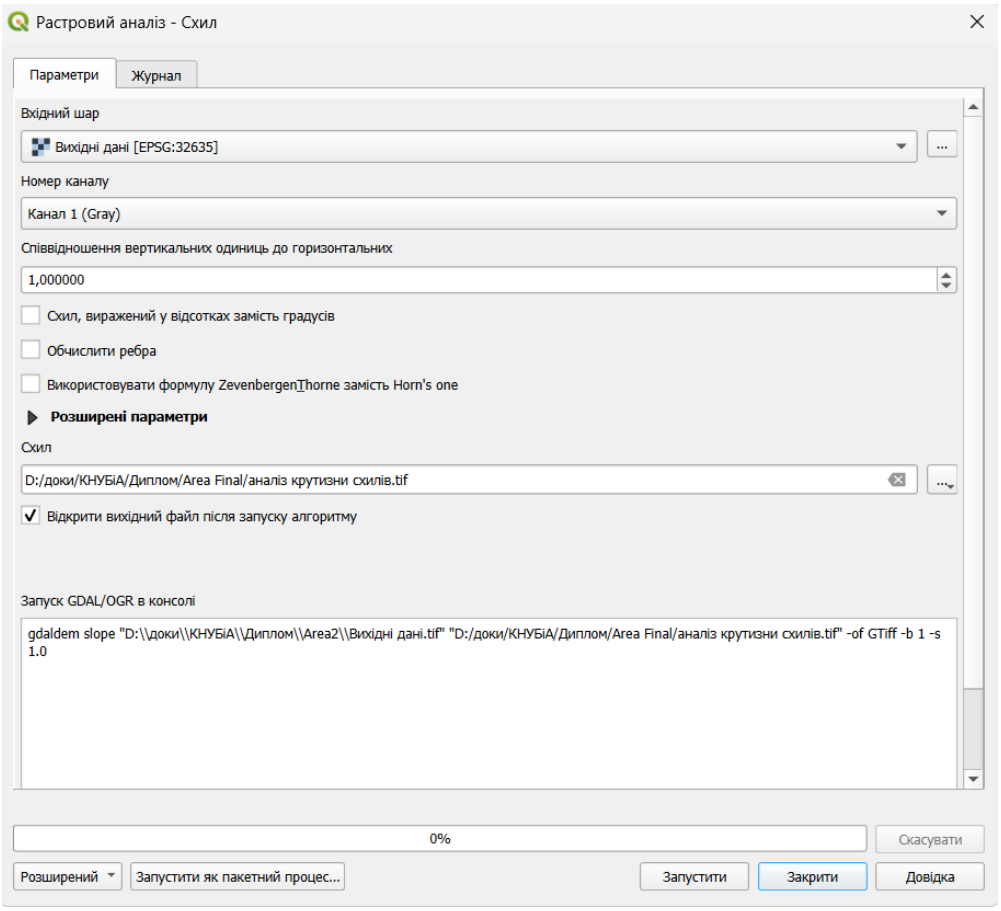
Розрахунок крутизни (ухилу) схилів дозволяє кількісно оцінити нахил поверхні Землі відносно горизонтальної площини. Карта ухилів є однією з найбільш затребуваних похідних ЦМР в інженерній геодезії, гідрології та плануванні територій.



(Рис. 2.10)

Опис використання інструменту "Ухил" (Slope) у QGIS:

Розрахунок крутизни схилів виконувався за допомогою вбудованого інструменту Ухил (Slope), який доступний у меню QGIS за шляхом Растр (Raster) → Аналіз (Analysis) → Ухил (Slope) (Рис. 2.11). Цей інструмент обчислює максимальну зміну значення висоти між кожним пікселем ЦМР та його вісьмома сусідами, визначаючи таким чином найкрутіший схил у даній точці. Результатом є новий растровий шар, де значення кожного пікселя відповідає крутизні схилу.



(Рис. 2.11)

Параметри розрахунку:

При виконанні розрахунку були встановлені наступні параметри:

Вхідний шар (Input layer): Як вхідний шар використовувалася перепроєктована ЦМР досліджуваної території (у системі координат WGS 84 / UTM Zone 35N – EPSG:32635), що була підготовлена на попередніх етапах.

Одиниці вимірювання (Slope expressed as): Крутизна схилів обчислювалася та відображалася у градусах.

Коефіцієнт Z (Z Factor): Значення коефіцієнта Z було встановлено на 1.0.

Обґрунтування вибору одиниць та коефіцієнта Z:

Одиниці вимірювання – градуси: Вибір градусів для вимірювання ухилу обґрунтований їхньою інтуїтивною зрозумілістю для геоморфологічного аналізу та відповідністю стандартним геодезичним та картографічним практикам. Градуси забезпечують пряме розуміння кута нахилу поверхні, що зручно для оцінки візуальної крутизни та порівняння з польовими спостереженнями. Хоча у відсотках часто використовується в інженерній практиці, градуси дозволяють легше інтерпретувати фізичний кут нахилу.

Коефіцієнт Z = 1.0: Цей коефіцієнт вказує на відношення між вертикальними та горизонтальними одиницями вимірювання ЦМР. Оскільки як горизонтальні координати (пікселі ЦМР у системі UTM Zone 35N), так і вертикальні значення висот (для SRTM DEM) вимірюються у метрах, коефіцієнт Z, рівний 1.0, забезпечує коректний розрахунок ухилів без перетворення одиниць. Неправильне встановлення цього коефіцієнта призвело б до спотворення реальних значень ухилів.

Детальний опис стилізації отриманого шару крутизни:

Для ефективної візуалізації та інтерпретації карти ухилів (Рис. 2.10) було застосовано наступну стилізацію:

Тип візуалізації: Одноканальний псевдоколір (Singleband pseudocolor).

Колірна шкала: Була обрана колірна шкала, що забезпечує чіткий градієнт від холодних до теплих кольорів, що відповідає збільшенню крутизни. Зокрема, використовувався перехід від темно-зеленого (для пологих ухилів) через світло-зелений, жовтий, помаранчевий до червоного (для найкрутіших схилів).

(Рис. 2.12)

Режим класифікації та діапазони значень: Карта була класифікована за режимом Квантилі (Quantile) на 8 класів, що дозволило рівномірно розподілити кількість пікселів по кожному класу та забезпечити оптимальне візуальне розрізнення зон з різною крутизною. Діапазони значень ухилів (у градусах) та їхнє відповідне кольорове представлення були налаштовані таким чином (Рис. 2.12):

0−5° : Дуже пологі та пологі схили (темно-зелений колір). Ці ділянки є найбільш сприятливими для будівництва.

5−10° : Помірно пологі схили (світло-зелений колір). Забудова можлива, але вимагає врахування рельєфу.

10−15° : Середньокруті схили (жовтий колір). Обмеження для будівництва, можливі процеси ерозії.

15−20° : Круті схили (помаранчевий колір). Вимагають значних інженерних заходів, підвищений ризик зсувів.

20−25° : Дуже круті схили (світло-червоний колір). Будівництво вкрай обмежене, високий ризик геоморфологічних процесів.

>25° : Надзвичайно круті схили (темно-червоний колір). Непридатні для будівництва, зони високого ризику.

Ця стилізація забезпечила наочне та інтуїтивно зрозуміле відображення просторового розподілу крутизни схилів, що є цінним для подальшого інженерного аналізу.

2.5.2. Розрахунок експозиції схилів

Для визначення орієнтації (експозиції) схилів досліджуваної території міста Яремче в програмному середовищі QGIS було виконано розрахунок за допомогою інструменту "Аспект" (Aspect). Цей інструмент, доступний у "Processing Toolbox" в розділі "GDAL (Raster analysis)", призначений для обчислення напрямку найкрутішого спуску для кожної комірки растрової цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Отримані значення відображаються в градусах за годинниковою стрілкою, починаючи від Півночі (0 або 360 градусів).

Деталізація процесу розрахунку:

Вхідні дані: Як вхідний шар для розрахунку експозиції було використано попередньо оброблений растровий шар ЦМР досліджуваної ділянки. Важливою умовою для коректних розрахунків морфометричних показників є те, що вхідна ЦМР вже була перепроєктована в метричну систему координат, а саме UTM Zone 35N (EPSG:32635). Вибір цієї проєкції забезпечує відповідність горизонтальних та вертикальних одиниць вимірювання (метрів), що є критично важливим для точного визначення кутів та напрямків.

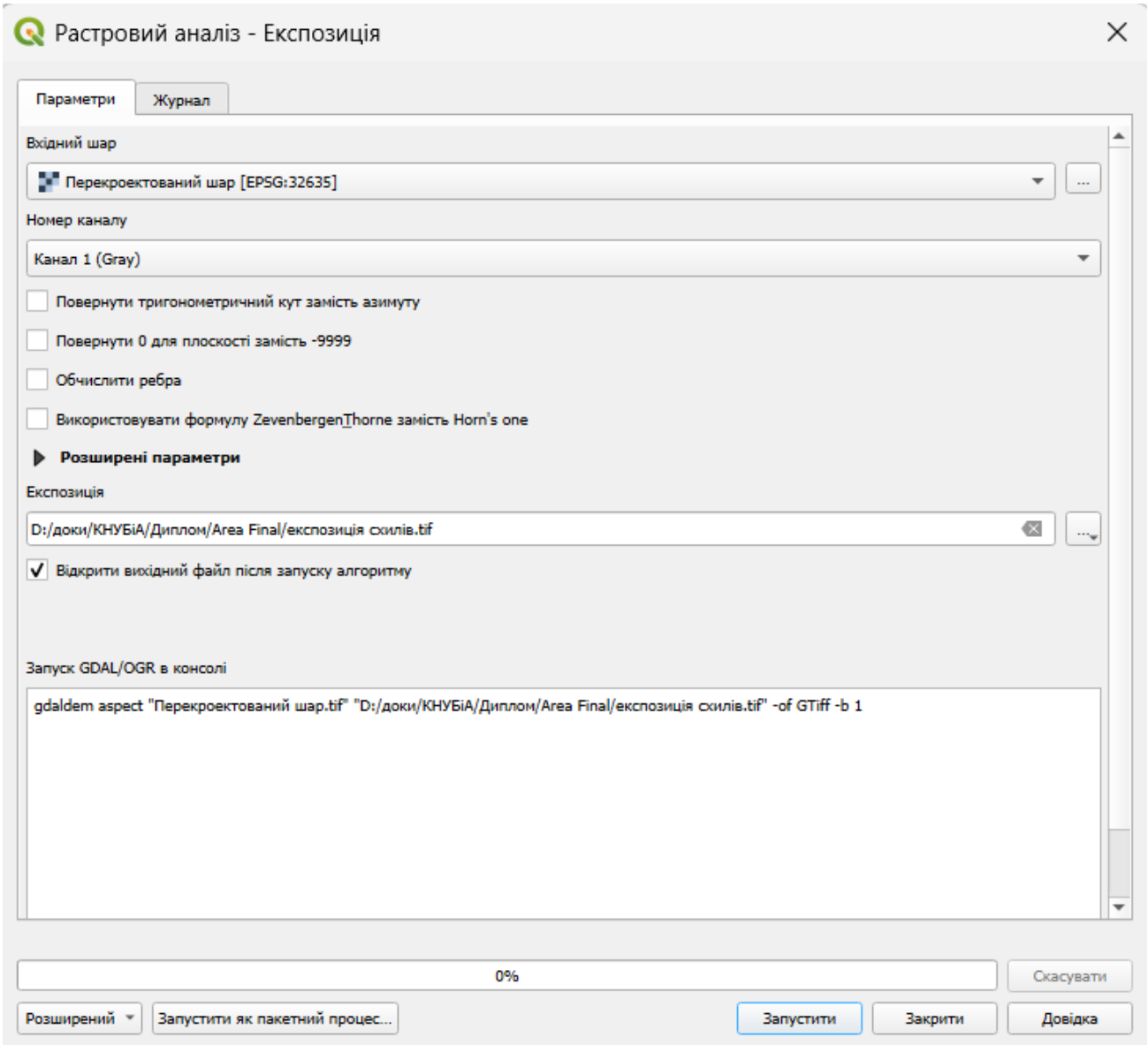
Параметри інструменту "Аспект":

"Input layer" (Вхідний шар): Було обрано растр попередньо обробленої ЦМР.

"Z factor" (Z-коефіцієнт): Встановлено значення 1.0. Цей коефіцієнт використовується для перетворення вертикальних одиниць на горизонтальні, якщо вони різні. Оскільки вхідна ЦМР вже була в метричній системі, де горизонтальні та вертикальні одиниці однакові, коефіцієнт 1.0 забезпечує коректне співвідношення.

"Output units" (Одиниці виводу): Інструмент "Аспект" GDAL за замовчуванням виводить значення в градусах (від 0 до 360), що є стандартним для представлення експозиції схилів.

"Output raster" (Вихідний растр): Було вказано шлях та назву для збереження результуючого растрового шару експозиції (Рис. 2.13)



(Рис. 2.13)

Опис отриманого шару та його стилізація:

Після виконання розрахунку було отримано новий растровий шар – карта експозиції схилів. Кожна комірка (піксель) цього растру містить значення від 0 до 360 градусів, що вказує на напрямок схилу, за винятком плоских ділянок. Для абсолютно рівних ділянок, де крутизна схилу дорівнює 0 градусів, інструмент "Аспект" повертає значення -1.

Для наочної візуалізації та інтерпретації отриманої карти експозиції було застосовано "Псевдоколірний" (Pseudocolor) рендерер. Була обрана градієнтна колірна схема, яка забезпечує інтуїтивне розрізнення основних напрямків схилів. Класифікація значень та їхнє колірне відображення були налаштовані наступним чином:

Значення -1: Було виділено окремим кольором (білим) для чіткого позначення плоских ділянок, які не мають визначеної експозиції.

Діапазони значень та відповідні кольори (Рис. 2.14):

(Рис. 2.14)

0 градусів (Північ): Відображено чорним / дуже темно-фіолетовим кольором.

45 градусів (Північний Схід): Відображено темно-фіолетовим кольором.

90 градусів (Схід): Відображено фіолетовим кольором.

135 градусів (Південний Схід): Відображено темно-рожевим / малиновим кольором.

180 градусів (Південь): Відображено червонувато-оранжевим кольором.

225 градусів (Південний Захід): Відображено яскраво-оранжевим кольором.

270 градусів (Захід): Відображено жовтим кольором.

315 градусів (Північний Захід): Відображено світло-жовтим кольором.

Всі проміжні значення відображаються кольорами, що плавно перетікають між вказаними ключовими точками, відповідно до обраного градієнту.

2.6. Оцінка точності вихідних даних та морфометричних показників

Якість вихідної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) є критично важливим фактором, що безпосередньо впливає на надійність та точність похідних морфометричних карт, таких як карти крутизни та експозиції схилів. У даній дипломній роботі для морфометричного аналізу рельєфу території міста Яремче використано дані ЦМР Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) з просторовою роздільною здатністю 1 arc-second, що відповідає приблизно 30 метрам. Ці дані є безшовними ЦМР (seamless DEMs), які представляють топографічну поверхню земної поверхні ("bare-earth") з вирівняними водними поверхнями.

Для належної оцінки можливостей та обмежень застосування отриманих результатів, необхідно розглянути точність вихідної SRTM DEM. Оцінка точності цифрових

моделей рельєфу, як правило, здійснюється шляхом порівняння висот DEM з еталонними даними, отриманими з високоточних наземних вимірювань, наприклад, за допомогою Глобальних Навігаційних Супутникових Систем (GNSS).

Численні дослідження підтверджують придатність SRTM DEM для різних геопросторових завдань, проте її точність може варіюватися залежно від географічного регіону та характеристик ландшафту. Загальновизнано, що середня квадратична похибка (RMSEz) для SRTM DEM складає менше 16 метрів.

Більш детальний аналіз точності SRTM DEM у різних умовах показав наступні результати:

У дослідженнях, проведених у Камеруні, RMSEz для SRTM становила 13.2 метра.

Оцінки в Індії показали RMSEz для SRTM на рівні 17.76 метра.

Для горбистих районів Китаю, точність SRTM перевищувала 11.7 метрів.

Найбільш релевантними для гірського рельєфу Яремче є дослідження Rexer & Hirt, які для горбистих та гірських районів повідомляють про RMSEz для SRTM у 6.8 метра.

Також варто зазначити, що у порівняльному аналізі, проведеному авторами статті, SRTM демонструє досить сприятливі показники серед інших глобальних ЦМР, таких як ASTER (RMSEz до 25 м) та ETOPO1, хоча і поступається новішим моделям, як ALOS (AW3D30) з вертикальною точністю 5-10 м, та COPERNICUS.

Враховуючи отримані дані про точність, зокрема RMSEz 6.8 метра для гірських територій, та звертаючись до вимог українських нормативних документів щодо топографічного картографування «Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000,

1:500 000, 1:1 000 000 (Затверджені наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру України №156 від 31.12.1999 р. і погоджені з Воєнно-

топографічним управлінням Генерального штабу Збройних сил України)» , можна зробити наступні висновки щодо придатності ЦМР SRTM:

Згідно з п. 4.7.3 для зображення рельєфу горизонталями на топографічних картах встановлюються певні основні висоти перерізу. Зокрема, середньоквадратична похибка висотного положення об’єктів на картах масштабів 1:25 000-1:200 000 (до яких належить і карта масштабу 1:150 000) має відповідати таким критеріям:

в гірських районах (що є характерним для території дослідження – міста Яремче) — до половини (1/2) основної висоти перерізу рельєфу.

Для карти масштабу 1:150 000, яка охоплює гірську місцевість, відповідно до Табл. 1, типова основна висота перерізу рельєфу становить, 40 метрів. У такому випадку, допустима середньоквадратична похибка висотного положення об'єктів становить:

Висота перерізу 40 м: 40 м×0.5=20 м.

Порівнюючи наведені фактичні показники точності SRTM DEM (RMSEz 6.8 метра для гірських територій за даними Rexer & Hirt) з нормативними вимогами до середньоквадратичної похибки висотного положення об'єктів для карт масштабу 1:150 000 у гірській місцевості (що може становити 20-25 метрів), можна зробити висновок, що:

ЦМР SRTM з роздільною здатністю 30 метрів дозволяє створювати морфометричні карти, придатні для:

Середньомасштабного картографування (1:25 000 – 1:200 000), включаючи карту масштабу 1:150 000: Отримані карти крутизни та експозиції схилів можуть бути використані для загального інженерно-геодезичного зонування, регіонального планування та оцінки природно-техногенних ризиків на рівні великих територій. Вони надають достовірне узагальнене уявлення про морфометричні особливості рельєфу. Фактична точність SRTM (6.8 м) є значно кращою, ніж допустима нормативна

похибка для карт цього масштабу, що підтверджує придатність даних SRTM для цієї роботи.

Однак, слід зазначити, що через узагальнення рельєфу, викликане роздільною здатністю 30 метрів та зазначеною похибкою, дані ЦМР SRTM не є придатними для:

Великомасштабного проєктування (1:5 000 та крупніше): Для детального проєктування інженерних споруд (наприклад, фундаментів, автомобільних доріг, гідротехнічних об'єктів), розрахунку точних обсягів земляних робіт або моніторингу деформацій, необхідна значно вища точність ЦМР (порядку 1 метра і менше) та деталізація.

Детальних інженерно-геодезичних вишукувань на конкретних ділянках: Локальні, дрібні форми рельєфу, незначні перепади висот або мікрорельєф, які можуть бути критичними для детального аналізу стійкості схилів на ділянці забудови, можуть бути не відображені або спотворені у 30-метровому DEM.

Для вищезгаданих задач, що вимагають високої точності, необхідно використовувати дані, отримані за допомогою більш точних методів, таких як аеро- або наземне лазерне сканування (LiDAR), аерофотограмметрія з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або польова топографічна зйомка.

2.7 Оцінка відповідного масштабу цифрової моделі рельєфу

Вибір просторової роздільної здатності вихідних даних є критично важливим для відповідності побудованої ЦМР цілям інженерного аналізу. Просторова роздільна здатність SRTM DEM 30m визначає мінімальний розмір об'єктів, які можуть бути ідентифіковані та проаналізовані на моделі. Для кращого розуміння деталізації та застосовності ЦМР, доцільно оцінити її "еквівалентний" картографічний масштаб.

Під "еквівалентним" картографічним масштабом розуміється той масштаб паперової карти, на якій об'єкти, що відповідають розміру одного пікселя цифрової моделі, були б чітко розрізнені людським оком. Зазвичай, для чіткого розрізнення деталей на карті приймається мінімальний розмір 0.2 мм.

Розрахунок знаменника еквівалентного масштабу (M) здійснюється за формулою:

$$M = \frac{R}{d} \quad (2.1)$$

де:

M – знаменник масштабу;

R – просторова роздільна здатність пікселя на місцевості, м;

d – мінімальний розрізнюваний розмір деталі на карті, м.

У даному дослідженні:

Просторова роздільна здатність (R) SRTM DEM становить 30 метрів.

Мінімальний розрізнюваний розмір деталі на карті (d) приймається рівним 0.2 мм, що еквівалентно 0.0002 метра.

Підставляючи ці значення у формулу (2.1), отримуємо:

$$M = \frac{30м}{0{,}0002м} = 150000$$

(2.2)

Таким чином, еквівалентний картографічний масштаб побудованої цифрової моделі рельєфу становить 1:150000.

Обґрунтування та застосовність:

Отриманий еквівалентний масштаб 1:150000 свідчить про те, що ЦМР, побудована на основі SRTM DEM 30m, є достатньо деталізованою для проведення інженерного аналізу на регіональному та локальному рівнях, а також для вирішення завдань середнього та дрібного масштабу. Ця деталізація дозволяє:

Ідентифікувати великі та середні форми рельєфу (хребти, долини, великі схили).

Визначати загальні напрямки стоку води та межі великих водозборів.

Виконувати попередню оцінку ухилів для планування лінійних споруд (доріг, трубопроводів) на значних ділянках.

Оцінювати потенційно небезпечні ділянки з точки зору геоморфологічних процесів (наприклад, схили з високим ухилом для ризику зсувів), але без детального інженерно-геодезичного обстеження.

Важливо зазначити, що, незважаючи на відповідність масштабу 1:150000, дані SRTM DEM 30m мають свої обмеження. Вони не призначені для виконання високоточних великомасштабних інженерних вишукувань (наприклад, для проектування окремих будівель, мостів, чи детального розрахунку об'ємів земляних робіт на невеликих ділянках), де потрібна точність на рівні десятків сантиметрів або одиниць метрів. Для таких задач необхідні більш детальні джерела даних, такі як дані лазерного сканування (LiDAR) або аерофотозйомки з дуже високою роздільною здатністю.

Проте, для завдань, що стосуються попереднього інженерного аналізу та планування на рівні великих територій, обрана просторова роздільна здатність та відповідний масштаб є оптимальними.

Розділ 3. Результати та їх обговорення

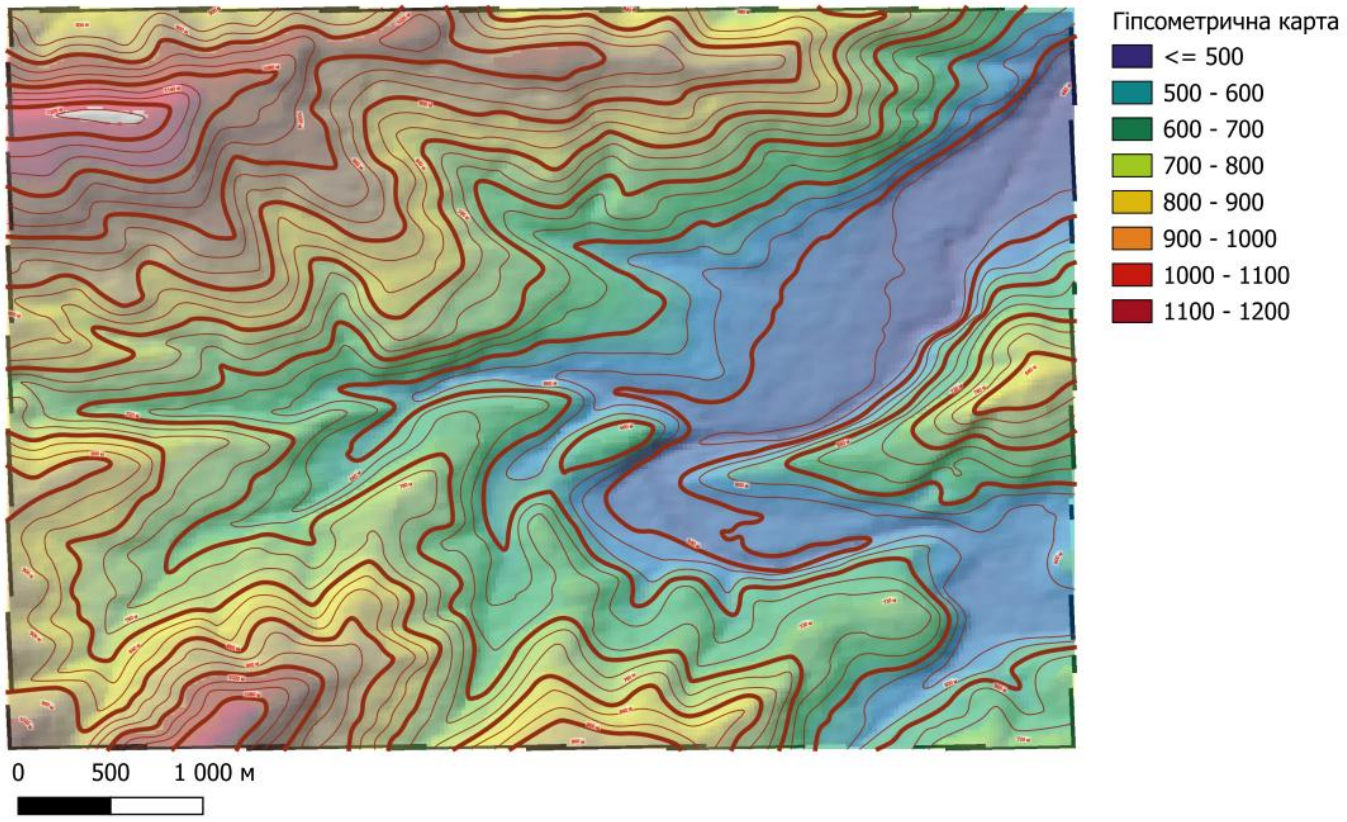
3.1. Побудована цифрова модель рельєфу досліджуваної ділянки

На основі вихідних супутникових даних SRTM DEM 30m, згідно з методологією, викладеною в Розділі 2, було побудовано цифрову модель рельєфу

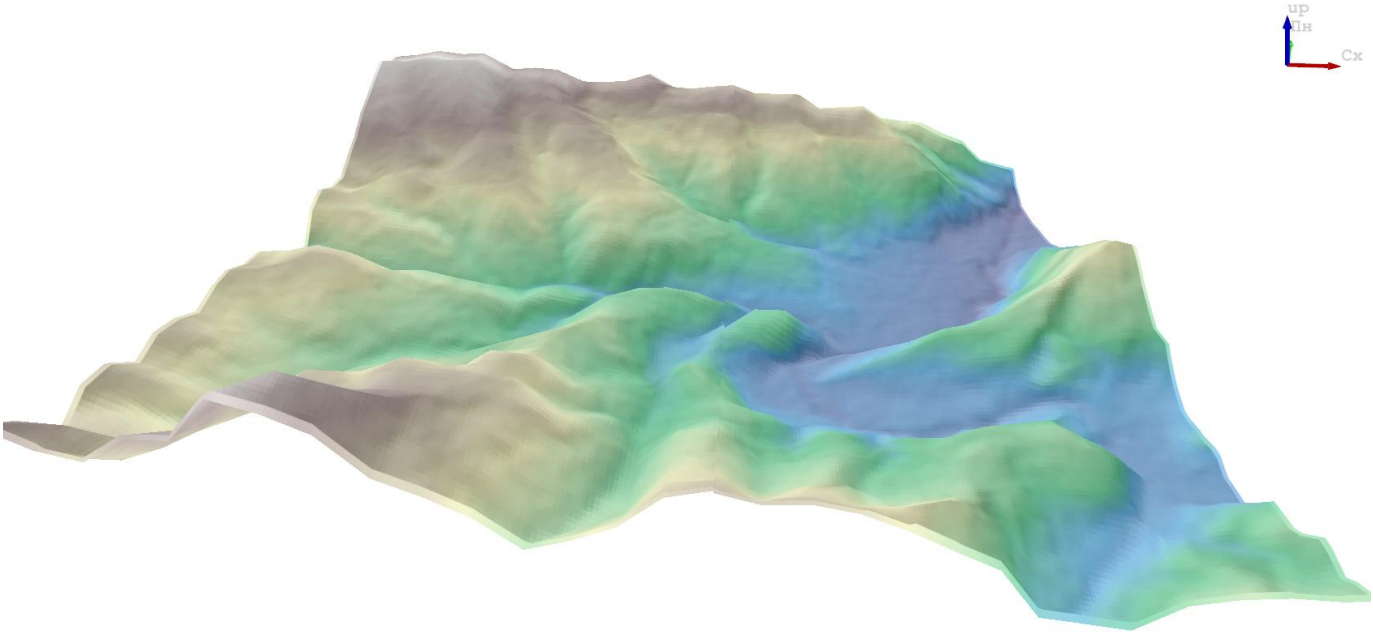
(ЦМР) території міста Яремче та прилеглих ділянок. Побудована ЦМР охоплює географічний екстент з координатами від 314487.76 м до 320464.82 м по осі X та від 5365705.05 м до 5371901.67 м по осі Y. Вона репрезентована в метричній системі координат WGS 84 / UTM zone 35N (EPSG:32635), що забезпечує коректність подальших розрахунків морфометричних показників. ЦМР є фундаментальною основою для подальшого комплексного геоморфологічного та інженерного аналізу, дозволяючи кількісно оцінювати та візуалізувати висотні характеристики земної поверхні.

3.1.1. Візуалізація та загальна характеристика ЦМР

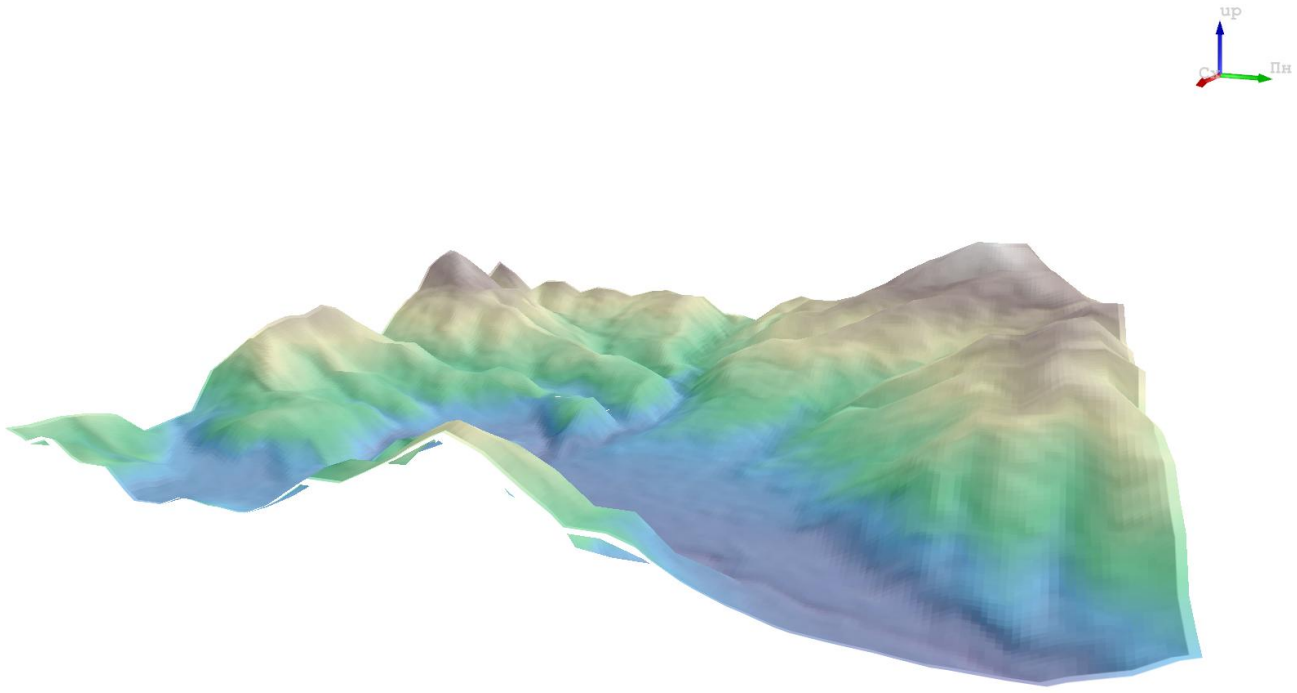
Побудована цифрова модель рельєфу досліджуваної території міста Яремче візуалізована на Рис. 3.1 (див. Додаток, Карта 1). Карта ЦМР представлена з повним картографічним оформленням, що включає назву, масштабну лінійку, легенду висот, що відповідає системі координат UTM Zone 35N. Для підвищення наочності та кращого сприйняття складних форм рельєфу, окрім колірної шкали висот (де сині відтінки відображають низькі абсолютні висоти, зелені – середні, а коричневі – високі), було застосовано затінення рельєфу (hillshade). Це створює ефект тривимірності та підкреслює орографічні особливості досліджуваної ділянки. Додатково, на карту нанесені горизонталі (ізолінії) з підписами висот, що полегшує просторову орієнтацію та оцінку перепаду висот.


Гіпсометрична карта
<= 500
500 - 600
600 - 700
700 - 800
800 - 900
900 - 1000
1000 - 1100
1100 - 1200
0
500
1 000 м

(Рис.3.1)



(Рис. 3.2)



(Рис. 3.3)

Для кількісної оцінки висотних характеристик території було проведено статистичний аналіз значень пікселів ЦМР в програмному середовищі QGIS. Для цього використовувався інструмент "Статистика растрового шару" (Raster layer statistics) з набору інструментів "Processing Toolbox", розділ "Аналіз растру" (Raster analysis). Вхідним шаром виступила побудована ЦМР.

Отримані статистичні показники відображають розподіл абсолютних висот на досліджуваній території:

Кількість пікселів: 54795. Цей показник відображає загальну кількість пікселів у ЦМР, для яких були визначені значення висоти, що свідчить про повне покриття досліджуваної ділянки.

Мінімальна абсолютна висота: згідно з растровою гістограмою (Рис. 3. 1) та статистичними даними, найнижча точка території знаходиться на позначці 473 метри над рівнем моря. Ця висота відповідає дну долини річки Прут у найнижчій, південно-східній частині досліджуваної ділянки.

Максимальна абсолютна висота: відповідно до аналізу, найвища точка досліджуваної ділянки досягає 1210 метрів над рівнем моря. Це значення характерне для вершин гірських хребтів, розташованих на периферії, зокрема у північно-західній та східній частинах досліджуваної території.

Амплітуда коливань висот (Range): Розрахована як різниця між максимальною та мінімальною висотою, вона становить 737 метрів (1210−473). Така значна амплітуда свідчить про глибоку розчленованість рельєфу та підтверджує гірський характер місцевості, що є важливим фактором для інженерно-геодезичних розрахунків.

Сума значень висот (Sum): 41357634. Цей показник є сумою всіх значень висот пікселів у ЦМР, що використовується для розрахунку середнього значення.

Середня абсолютна висота (Mean value): За результатами статистичного аналізу, середня абсолютна висота для всієї досліджуваної території становить 754.77 метрів. Цей показник дає загальне уявлення про середнє значення висот в межах ЦМР, відображаючи її помірно високогірний характер.

Стандартне відхилення (Standard deviation): 162.46 метрів. Цей показник характеризує розкид висотних значень навколо середнього арифметичного, вказуючи на варіабельність рельєфу. Відносно високе значення стандартного відхилення

підкреслює неоднорідність висотних показників, типову для гірських систем, де спостерігаються значні перепади висот на відносно коротких відстанях.

Сума квадратів значень (Sum of the squares): 1446271525.79. Цей показник також використовується у розрахунках, зокрема для дисперсії та стандартного відхилення.

3.1.2. Морфологічна характеристика рельєфу за даними ЦМР

Побудована ЦМР наочно відображає основні морфологічні особливості рельєфу території Яремче, що є типовими для Українських Карпат (зокрема, для Покутсько-Буковинських Карпат). За даними моделі чітко виділяються наступні геоморфологічні елементи:

Гірські хребти та вершини: На карті (Рис. 3.2 та Рис. 3.3) чітко простежуються витягнуті гірські хребти, що мають переважно північно-західну та південно-східну орієнтацію, що відповідає загальній простяганню Карпатських структур у цьому районі. Вершини хребтів, позначені щільно розташованими ізолініями та високими позначками (наприклад, 1000м, 1140м, 1200м у північно-західній та східній частинах карти), виділяються як зони максимальних висот. Їхні схили характеризуються значною крутизною, що візуально підкреслюється інтенсивним затіненням рельєфу та густим розташуванням ізоліній.

Річкові долини: Домінуючою формою рельєфу є глибоко врізана долина річки Прут, яка перетинає досліджувану територію приблизно з північного заходу на південний схід, пролягаючи через центральну частину карти. Долина має виражений V-подібний профіль у верхній течії (північно-західна частина карти) та помітно розширюється в межах центральної частини міста Яремче, де абсолютні висоти є мінімальними. Чітко видно менші долини її численних приток, що формують розгалужену гідрографічну мережу, яка глибоко розчленовує схили гірських хребтів.

Схили різної крутизни: Загалом, на ЦМР переважають схили значної крутизни, характерні для гірського ландшафту, що відображається у щільності ізоліній. Модель дозволяє візуально ідентифікувати як відносно пологі ділянки (переважно в річкових долинах та на платоподібних ділянках між хребтами), так і дуже круті схили, які є потенційно небезпечними з точки зору гравітаційних процесів (зсуви, обвали).

Ерозійні форми: На ЦМР простежуються менші ерозійні форми, такі як яри та промоїни, які розчленовують схили гірських хребтів, свідчачи про активні ерозійні процеси, особливо на крутих та незахищених рослинністю ділянках.

Антропогенний вплив: У межах міської забудови (центральна частина карти, де пролягає долина Пруту) ЦМР дозволяє частково ідентифікувати зміни рельєфу, зумовлені людською діяльністю (наприклад, вирівняні території під забудову, насипи, виїмки для доріг). Проте, зважаючи на роздільну здатність 30м, деталізація таких об'єктів є обмеженою, і вони переважно виділяються за більш "спрямленими" або "неприродними" формами ізоліній у порівнянні з природним рельєфом.

3.2. Аналіз крутизни схилів

Крутизна схилів є одним з найважливіших морфометричних показників, що безпосередньо впливає на стійкість території до небезпечних геоморфологічних процесів (зсувів, ерозії, селів), а також визначає придатність ділянок для будівництва та прокладання інженерних комунікацій. Аналіз крутизни схилів досліджуваної ділянки міста Яремче був проведений у програмному середовищі QGIS на основі побудованої цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

3.2.1. Побудова та візуалізація карти крутизни схилів

Для розрахунку крутизни схилів (Slope) був використаний інструмент "Схил" (Slope) з набору інструментів "GDAL (Raster analysis)" в QGIS. Вхідним шаром виступила перепроєктована ЦМР досліджуваної території (EPSG:32635), а одиницями вимірювання було обрано градуси, що є стандартним для інженерних та геоморфологічних оцінок.

Побудована карта крутизни схилів візуалізована на Рис. 2.10 (див. Додаток, Карта 2). Карта повністю оформлена згідно з картографічними стандартами, включаючи назву, масштабну лінійку. Для наочного відображення просторового розподілу ділянок за крутизною була застосована градаційна колірна шкала, яка дозволяє чітко розрізняти зони з різним ступенем ухилу.

Легенда карти крутизни схилів (Рис. 2.10)

Діапазон крутизни, градуси (°)	Колір на карті	Інтерпретація та характеристика
0° - 2°	Темно-зелений	Дуже пологі / Рівнинні ділянки: Практично горизонтальна поверхня, характерна для дна річкових долин, невеликих вододільних плато. Ідеальні для більшості видів будівництва та освоєння, ризик ерозії мінімальний.
>2° - 10°	Світло-зелений	Пологі схили: Схили з незначним ухилом, які широко використовуються для будівництва та

		сільського господарства. Ризик водної ерозії низький або помірний, але потребує врахування напрямку стоку.
>10° - 20°	Жовтий / Помаранчевий	Помірно круті схили: Поширені в гірській місцевості, характерні для середніх частин схилів. Будівництво можливе, але вимагає інженерно-геодезичних вишукувань та, можливо, терасування чи укріплення. Ризик ерозії помірний до високого.
>20° - 30°	Світло-червоний	Круті схили: Часто зустрічаються в гірських районах. Вимагають значних інженерних заходів для стабілізації при будь-якому освоєнні. Високий ризик водної та площинної ерозії, початок прояву гравітаційних процесів.
>30° - 45°	Темно-червоний	Дуже круті схили: Характерні для високогірних ділянок, бортових частин глибоких долин. Будівництво вкрай ускладнене і вимагає складних, дорогих та масштабних інженерних рішень. Дуже високий ризик ерозії, зсувів, обвалів, селів.
>45°	Фіолетовий / Коричневий	Дуже круті схили: Характерні для високогірних ділянок, бортових частин глибоких долин. Будівництво вкрай ускладнене і вимагає складних, дорогих та масштабних інженерних рішень. Дуже високий ризик ерозії, зсувів, обвалів, селів.

3.2.2. Статистичний розподіл крутизни схилів

Для кількісної характеристики розподілу крутизни схилів було проведено статистичний аналіз значень пікселів карти крутизни за допомогою інструменту "Статистика растрового шару" (Raster layer statistics) в QGIS. Загальна кількість пікселів з визначеними значеннями крутизни становить 57345. Отримані результати наведені нижче:

Мінімальна крутизна: 0.00 градусів. Це вказує на наявність на досліджуваній території абсолютно рівних або майже рівних ділянок, які переважно розташовані в межах річкових заплав та долин.

Максимальна крутизна: 72.51 градусів. Таке високе значення свідчить про присутність дуже крутих, обривистих схилів або скельних відслонень, що є характерним для гірської місцевості.

Амплітуда коливань крутизни (Range): 72.51 градусів. Цей показник підтверджує надзвичайно широкий діапазон крутизни схилів на території дослідження, від плоских ділянок до майже вертикальних урвищ.

Сума значень крутизни (Sum): 734086.60. Цей показник є сумою всіх значень крутизни пікселів і використовується для розрахунку середнього значення.

Середня крутизна (Mean value): 12.80 градусів. Це середнє значення крутизни для всієї території дослідження. Воно вказує на те, що в цілому рельєф міста Яремче можна охарактеризувати як помірно крутий, що відповідає передгірним та низькогірним ландшафтам Карпат.

Стандартне відхилення (Standard deviation): 10.60 градусів. Відносно високе значення стандартного відхилення підкреслює значну варіабельність крутизни схилів. Це свідчить про неоднорідність рельєфу, де поряд із відносно пологими ділянками існують дуже круті схили, що є типовим для гірських долин та схилів.

Сума квадратів значень (Sum of the squares): 6446824.54. Цей показник використовується у розрахунках дисперсії та стандартного відхилення.

3.2.3. Просторовий розподіл ділянок з різною крутизною

Аналіз карти крутизни схилів (Рис. 2.10) дозволяє деталізувати просторовий розподіл ділянок за їхньою крутизною:

Дуже пологі / Рівнинні ділянки (0-2°): (Темно-зелений колір) Переважно локалізовані у долині річки Прут та її найбільших приток, формуючи витягнуті смуги вздовж річкових русел та на терасованих ділянках. Ці зони є найбільш сприятливими для антропогенної діяльності (існуюча міська забудова, можливі сільськогосподарські угіддя, прокладання лінійних комунікацій – автомобільних та залізничних доріг).

Пологі схили (>2° - 10°): (Світло-зелений колір) Поширюються на прилеглі до долин тераси та нижні частини схилів гірських хребтів. Ці ділянки також відносно сприятливі для освоєння, але вже можуть вимагати мінімальних заходів щодо запобігання ерозії, особливо при активному використанні.

Помірно круті схили (>10° - 20°): (Жовтий та помаранчевий кольори) Займають значні площі у середній частині гірських схилів, домінуючи на більшості гірських масивів, що оточують місто. На цих ділянках будівництво можливе, але вимагає обов'язкового обліку стійкості ґрунтів, проведення інженерно-геодезичних вишукувань та, ймовірно, проектування заходів зі зміцнення (наприклад, терасування, підпірні стінки). Ризик ерозії тут помірний до високого.

Круті (>20° - 30°) та дуже круті (>30° - 45°) схили: (Світло-червоні та темно-червоні ділянки) Представлені зонами у верхніх частинах гірських схилів, а також на бортах глибоких ярів та річкових терас. Такі ділянки, особливо виражені у північній, східній та західній частинах досліджуваної території, є складними для освоєння. Будівництво

тут пов'язане з високими ризиками і вимагає значних інженерних втручань (масштабні земляні роботи, контрфорси, підпірні стінки).

Надзвичайно круті / Обривисті схили (>45°): (Фіолетові або темно-коричневі ділянки) Ці зони є найменш поширеними, але критично важливими з точки зору небезпеки. Вони відповідають скельним відслоненням, урвищам та дуже крутим бортам окремих ярів. Ці зони є непридатними для більшості видів будівництва через максимальний ризик зсувів, обвалів, обвалення ґрунту та інтенсивної ерозії.

3.2.4. Інженерний аналіз крутизни схилів

Аналіз крутизни схилів є ключовим для оцінки інженерно-геодезичних умов території та формування рекомендацій щодо її використання:

Вплив на стійкість схилів: Крутизна є основним фактором, що визначає стійкість схилів. Ділянки з крутизною понад 15-20° (помірно круті та круті схили) в умовах Яремче, що характеризується значною зволоженістю, інтенсивними опадами та активними екзогенними процесами, слід розглядати як потенційно небезпечні. Схили понад 30° (дуже круті та надзвичайно круті) є зонами високого та надзвичайно високого ризику розвитку зсувів, обвалів, каменепадів та селів, особливо за наявності несприятливих інженерно-геодезичних умов (слабкі ґрунти, тріщинуватість гірських порід, високий рівень ґрунтових вод).

Схильність до ерозії: Зі збільшенням крутизни значно зростає інтенсивність водної ерозії. На ділянках з крутизною понад 10° (помірно круті схили) вже спостерігається активний змив ґрунту, що може призводити до деградації ґрунтового покриву та утворення ярів. На крутих та дуже крутих схилах ерозійні процеси можуть бути катастрофічними, вимагаючи протиерозійних заходів.

Можливість будівництва: Площі з крутизною до 10° (темно- та світло-зелені) є найбільш сприятливими для всіх видів будівництва, дозволяючи мінімізувати обсяги земляних робіт та витрати на фундаменти. Ділянки з крутизною від 10° до 20° (жовті, помаранчеві) вимагають індивідуального підходу, детальних інженерно-геодезичних вишукувань та застосування спеціальних інженерних рішень (терасування, підпірні стінки, пальові фундаменти). Будівництво на схилах понад 20° (червоні відтінки) є вкрай складним, витратним та ризикованим, вимагаючи комплексних протизсувних, протиерозійних та інженерно-захисних заходів.

Прокладання комунікацій: Прокладання лінійних комунікацій (доріг, трубопроводів, електромереж) також значно ускладнюється на крутих схилах. На таких ділянках зростає необхідність у значних обсягах земляних робіт (виїмки, насипи), будівництві укріплювальних споруд та забезпеченні стійкості траси.

Виділення потенційно небезпечних зон: На основі аналізу крутизни схилів можна виділити наступні потенційно небезпечні зони для інженерного освоєння:

Зони високого ризику: Схили з крутизною понад 20° - 30° (світло-червоні ділянки на карті), які можуть бути схильні до зсувів, обвалів та інтенсивної ерозії, особливо за умов додаткового зволоження або антропогенного втручання.

Зони надзвичайно високого ризику: Дуже круті та обривисті схили понад 30° - 45° та >45° (темно-червоні та фіолетові/коричневі ділянки), які є геодезично нестабільними та непридатними для будь-якого виду будівництва без надзвичайно складних і дорогих інженерних заходів. Ці зони потребують особливого контролю та є рекомендованими до виключення з планування забудови.

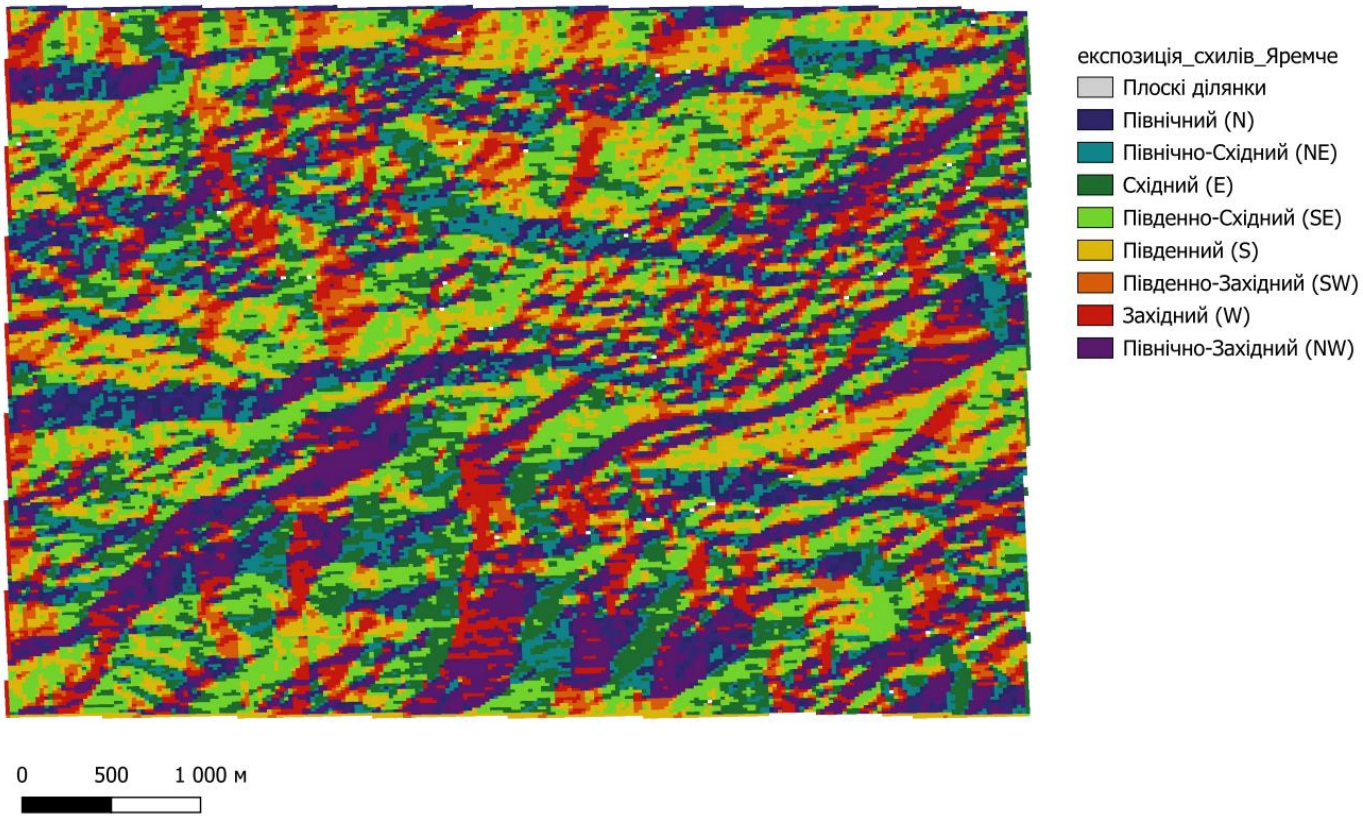
3.3. Аналіз експозиції схилів

Експозиція (орієнтація) схилів є важливим морфометричним показником, який визначає характер взаємодії поверхні рельєфу з кліматичними факторами, такими як сонячна інсоляція, вітровий режим, зволоженість та глибина промерзання ґрунтів. Ці фактори, у свою чергу, впливають на рослинний покрив, ґрунтоутворення, а також на стійкість схилів та придатність території для інженерного освоєння. Аналіз експозиції схилів досліджуваної ділянки міста Яремче був проведений у програмному середовищі QGIS на основі побудованої ЦМР.

3.3.1. Побудова та візуалізація карти експозиції схилів

Для розрахунку експозиції (орієнтації) схилів був використаний інструмент "Орієнтація" (Aspect) з набору інструментів "GDAL (Raster analysis)" в QGIS. Вхідним шаром виступила побудована ЦМР досліджуваної території. Результатом стала карта, де кожному пікселю присвоєно значення від 0° до 360° (за годинниковою стрілкою від Півночі) або значення -1 для плоских ділянок.

Побудована карта експозиції схилів візуалізована на Рис. 3.2(див. Додаток, Карта 3). Карта повністю оформлена згідно з картографічними стандартами. Для наочного відображення розподілу схилів за експозицією була застосована циклічна колірна шкала, де схожі напрямки мають близькі кольори, а протилежні – контрастні.



(Рис.3.4)

Легенда карти експозиції схилів (Рис. 3.4):

Характеристика інсоляції та зволоженості (типово для Північної півкулі)

Діапазон кутів, градуси (°)	Колір на карті	Напрямок експозиції
-1	Сірий / Білий	Плоскі ділянки Горизонтальні поверхні (плато, дно долин), не мають вираженої експозиції. Інсоляція та зволоженість залежать від інших факторів (затінення, дренаж).

0° - 22.5° та 337.5° - 360°	Темно-синій	**Північний (N)** Мінімальна інсоляція: Отримують найменше сонячного тепла та світла. Максимальна зволоженість: Тривале снігопокриття, повільне висихання, висока вологість ґрунту.
>22.5° - 67.5°	Синьо-зелений	**Північно-Східний (NE)** Низька інсоляція: Отримують сонце рано вранці. Висока зволоженість: Повільне висихання, схильні до перезволоження.
>67.5° - 112.5°	Зелений	**Східний (E)** Середня інсоляція: Отримують сонце у першій половині дня. Помірна зволоженість: Висихають швидше, ніж північні, але повільніше за західні.
>112.5° - 157.5°	Жовто-зелений	**Південно-Східний (SE)** Висока інсоляція: Отримують багато сонячного тепла. Помірна зволоженість: Достатньо інсоляції для випаровування, але не пересушуються.
>157.5° - 202.5°	Жовтий / Оранжевий	**Південний (S)** Максимальна інсоляція: Отримують найбільше сонячного тепла протягом дня. Низька зволоженість: Схильні до пересушування, швидке танення снігу.
>202.5° - 247.5°	Оранжево-червоний	**Південно-Західний (SW)** Висока інсоляція: Отримують сонце у другій половині дня. Низька зволоженість: Схильні до пересушування, особливо влітку.
>247.5° - 292.5°	Червоний	**Західний (W)** Середня інсоляція: Отримують сонце у другій половині дня. Помірна зволоженість: Можуть бути більш сухими, ніж східні.

>292.5° - 337.5°	Фіолетовий / Пурпуровий	**Північно-Західний (NW)** Низька інсоляція: Отримують сонце ввечері. Висока зволоженість: Повільне висихання, тривале снігопокриття, схильні до перезволоження.

3.3.2. Статистичний аналіз розподілу схилів за експозицією

Для кількісної оцінки розподілу схилів за експозицією був проведений статистичний аналіз значень пікселів карти експозиції за допомогою інструменту "Статистика растрового шару" (Raster layer statistics) в QGIS. Загальна кількість пікселів з визначеними значеннями експозиції становить 57308.

Отримані статистичні показники:

Мінімальне значення: 0.00 градусів. Це відповідає точно північному напрямку або, що вірогідніше, є початковою точкою відліку кутів.

Максимальне значення: 359.89 градусів. Це вказує на наявність схилів практично всіх можливих напрямків, аж до майже повного кола.

Амплітуда коливань (Range): 359.89 градусів. Підтверджує повний спектр орієнтацій схилів на досліджуваній території.

Сума значень (Sum): 10550297.32. Загальна сума значень кутів експозиції.

Середнє значення (Mean value): 184.10 градусів. Це значення близьке до 180°, що відповідає південному напрямку. Це може свідчити про невелику перевагу схилів південної орієнтації або рівномірний розподіл, злегка зміщений у бік півдня. Однак, для експозиції середнє значення не завжди є

найбільш інформативним через циклічність даних (0° і 360° - це один і той же напрямок).

Стандартне відхилення (Standard deviation): 102.52 градусів. Це відносно високе значення стандартного відхилення. Воно свідчить про значний розкид значень експозиції, підтверджуючи, що на досліджуваній території представлені схили практично всіх можливих орієнтацій, а не лише домінуючий напрямок. Це типово для складного гірського рельєфу з розгалуженою мережею долин та хребтів.

Сума квадратів значень (Sum of the squares): 602258832.41.

3.3.3. Інженерний аналіз експозиції схилів

Орієнтація схилів має значний вплив на інженерно-геодезичні умови та потенційну стійкість:

Інсоляція та температурний режим:

Південні та південно-східні схили (жовті, оранжеві, жовто-зелені) отримують максимальну інсоляцію. Це призводить до інтенсивного прогрівання ґрунтів, швидкого танення снігу та випаровування вологи. Такі схили є більш сухими, що може сприяти стійкості ґрунтів до перезволоження, але водночас може посилювати вітрову ерозію та дефляцію у разі відсутності рослинного покриву. У зимовий період вони менш схильні до глибокого промерзання.

Північні та північно-західні схили (темно-сині, синьо-зелені, фіолетові) отримують мінімальну кількість сонячного тепла. Це обумовлює повільне танення снігу, високу зволоженість ґрунтів, їхнє тривале промерзання та повільне відтавання. Перезволоженість ґрунтів на таких схилах може знижувати їхню міцність та стійкість, підвищуючи ризик розвитку зсувів та інших

гравітаційних процесів, особливо на глинистих ґрунтах. Глибоке промерзання може призводити до морозного здимання ґрунтів, що є небезпечним для фундаментів споруд.

Глибина промерзання ґрунтів: На північних схилах глибина сезонного промерзання ґрунтів, як правило, більша, ніж на південних, через меншу інсоляцію та тривале збереження снігового покриву. Це необхідно враховувати при проектуванні фундаментів будівель та інженерних комунікацій.

Зволоженість та дренаж: Північні та затінені схили часто характеризуються надмірним зволоженням через повільне випаровування, що може призводити до перезволоження ґрунтів, розвитку заболочених ділянок та зниження їхньої несучої здатності. Південні схили, навпаки, є більш дренованими та сухими.

Вітровий режим: Орієнтація схилу відносно пануючих вітрів впливає на снігонакопичення та інтенсивність вітрової ерозії. Підвітряні схили можуть накопичувати більше снігу, що збільшує навантаження та вологість навесні, тоді як навітряні можуть піддаватися посиленій ерозії.

Вплив на рослинний покрив: Різна інсоляція та зволоженість обумовлюють різноманіття рослинного покриву, що, у свою чергу, впливає на закріпленість ґрунту та його протизсувну стійкість. Густий ліс на північних схилах може стабілізувати ґрунт, тоді як на південних схилах, де рослинність може бути менш щільною, ризик ерозії може бути вищим.

3.4. Комплексний інженерний аналіз ділянки на основі морфометричних даних

Комплексний інженерний аналіз території є кульмінацією попередніх морфометричних досліджень і передбачає інтеграцію даних про абсолютні висоти,

крутизну та експозицію схилів для виявлення зон з певними комбінаціями характеристик та оцінки їх інженерно-геодезичної стійкості. Цей етап дозволяє перейти від опису окремих морфометричних показників до цілісної оцінки території та розробки практичних рекомендацій щодо її використання.

3.4.1. Синтез даних крутизни та експозиції для виділення зон

Для проведення комплексного аналізу було здійснено просторове співвіднесення та синтез інформації, отриманої з карт крутизни (Рис. 2.10) та експозиції схилів (Рис. 3.2). Метою було виділення типологічних зон рельєфу, які за сукупністю своїх морфометричних параметрів обумовлюють специфічні інженерно-геодезичні умови та потенційні ризики. Основна увага приділялася комбінаціям, що можуть вказувати на підвищену небезпеку або, навпаки, на сприятливі умови.

Були виділені такі типові комбінації морфометричних характеристик та їхнє інженерне значення:

Пологі (0-10°) та дуже пологі (0-2°) схили усіх експозицій:

Характеристика: Ці ділянки (темно- та світло-зелені на карті крутизни) локалізовані переважно у долинах річок Прут та її приток, а також на вирівняних ділянках вододілів. Вони характеризуються мінімальними ухилами та, як правило, достатньою інсоляцією (залежно від експозиції).

Інженерна оцінка: Це найбільш сприятливі зони для всіх видів будівництва (житлова, промислова забудова, транспортна інфраструктура), оскільки вони вимагають мінімальних обсягів земляних робіт, забезпечують відносну стійкість ґрунтів і мають низький ризик ерозійних та зсувних процесів. Проте, у річкових долинах важливо враховувати рівень ґрунтових вод та можливі паводки.

Помірно круті (10-20°) схили усіх експозицій:

Характеристика: Ці ділянки (жовті та помаранчеві на карті крутизни) становлять значну частину території, особливо на середніх частинах гірських схилів.

Інженерна оцінка: Будівництво на цих схилах можливе, але вимагає обов'язкових інженерно-геодезичних вишукувань. Необхідне проектування та реалізація заходів щодо стабілізації (наприклад, терасування, влаштування дренажу, підпірні стінки), особливо для об'єктів з високим рівнем відповідальності. Ризик поверхневої ерозії зростає.

Круті (20-30°) та дуже круті (30-45°) схили:

Характеристика: (Світло-червоні та темно-червоні ділянки на карті крутизни) Ці зони зосереджені у верхніх частинах гірських масивів та на крутих бортах глибоких долин.

Інженерна оцінка: Це зони підвищеної небезпеки. Будівництво тут пов'язане з високими ризиками зсувів, обвалів, інтенсивної ерозії та селевих явищ. Вимагають значних і дороговартісних інженерних захисних споруд (протизсувні, протиобвальні, протисельові заходи). Зазвичай, такі ділянки слід виключати з активної забудови або використовувати лише для лісогосподарських потреб.

Надзвичайно круті (>45°) схили:

Характеристика: (Фіолетові/коричневі ділянки) Це скельні обриви, урвища, що зустрічаються епізодично, але локально є критичними.

Інженерна оцінка: Категорично непридатні для будівництва. Є зонами надзвичайно високого ризику розвитку катастрофічних гравітаційних процесів. Рекомендується їх повне виключення з будь-якої господарської діяльності.

3.4.2. Просторове співвіднесення морфометричних зон з інженерно-геодезичними проблемами

Шляхом накладання даних про крутизну та експозицію, а також візуального аналізу ЦМР, було виявлено просторове співвіднесення морфометричних зон з відомими або потенційними інженерно-геодезичними проблемами, характерними для гірських територій Українських Карпат:

Перезволоження та зсувна небезпека:

Особливу увагу слід приділяти крутим (понад 20°) та дуже крутим (понад 30°) схилам північної, північно-західної та північно-східної експозиції. Ці ділянки (виділяються червоними відтінками на карті крутизни та синіми/фіолетовими на карті експозиції) характеризуються мінімальною інсоляцією, тривалим сніготаненням та низькою інтенсивністю випаровування. Це призводить до надмірного зволоження ґрунтів, зниження їхньої міцності та, як наслідок, підвищення схильності до зсувів та перезволоження. У місті Яремче відомі випадки активізації зсувних процесів, особливо на таких орієнтованих схилах, що потребує посиленого моніторингу та інженерного захисту.

Також до зон потенційного перезволоження відносяться пологі ділянки у долинах річок, де високий рівень ґрунтових вод може спричиняти підтоплення та потребувати дренажних систем.

Ерозія та обвали:

Круті (понад 20°) схили усіх експозицій, особливо ті, що мають порушений рослинний покрив або складені легкорозмивними породами, є надзвичайно схильними до водної та площинної ерозії.

Надзвичайно круті (>45°) схили, а також ділянки з крутизною понад 30-40° з виходами корінних порід, є зонами підвищеного ризику обвалів, осипів та каменепадів. Ці ділянки вимагають встановлення захисних сіток, бар'єрів або повного виключення з освоєння.

Морозне здимання ґрунтів:

На північних та північно-західних схилах, де ґрунти довго промерзають та повільно відтають, зростає ймовірність морозного здимання ґрунтів. Це може призвести до деформації фундаментів споруд та руйнування дорожнього покриття.

3.4.3. Розробка рекомендацій щодо використання території з урахуванням її морфометричних особливостей

На основі проведеного комплексного морфометричного аналізу розроблено наступні рекомендації щодо раціонального використання території міста Яремче, спрямовані на забезпечення її стабільності та безпеки:

Зонування території за ступенем придатності для будівництва:

Зони сприятливі для будівництва (умовно-стабільні): Ділянки з крутизною до 10° (переважно долини річок та терасовані схили). Тут можливе

звичайне будівництво з мінімальними інженерними заходами (наприклад, дренажні системи для відведення поверхневих вод).

Зони обмеженої придатності для будівництва (потенційно нестабільні): Схили з крутизною від 10° до 20°. Будівництво можливе лише після детальних інженерно-геодезичних вишукувань та розробки спеціальних проектних рішень, що включають заходи зі стабілізації (терасування, підпірні стінки, укріплення ґрунтів).

Зони непридатні для будівництва (нестабільні): Схили з крутизною понад 20-30° та особливо понад 45°. Ці ділянки мають високий та надзвичайно високий ризик розвитку небезпечних геоморфологічних процесів. Рекомендується повне виключення їх з містобудівного освоєння, збереження природного ландшафту та лісового покриву як природного протизсувного та протиерозійного фактора. Доцільно розглянути їх використання для рекреаційних цілей, що не передбачають капітального будівництва.

Проектування інженерного захисту:

Для пологих північних схилів та річкових заплав передбачати ефективні дренажні системи для запобігання перезволоженню та підтопленню.

На крутих схилах (понад 20°), особливо північної експозиції, необхідно проектувати протизсувні та протиерозійні споруди (підпірні стінки, контрфорси, системи поверхневого та підземного дренажу, біотехнічні заходи – висадка захисної рослинності).

Вздовж транспортних комунікацій та об'єктів, розташованих біля обривистих схилів (понад 45°), необхідне влаштування протиобвальних споруд (сітки, бар'єри, уловлювачі).

Особливості землеустрою та лісовідновлення:

На крутих та дуже крутих схилах рекомендується збереження та відновлення лісового покриву, оскільки рослинність є ефективним природним фактором стабілізації ґрунтів та запобігання ерозії.

Запровадження спеціальних агротехнічних заходів (контурне землеробство, терасування) у разі сільськогосподарського використання помірно крутих схилів.

Моніторинг та прогноз:

Для потенційно небезпечних ділянок рекомендується організація постійного інженерно-геодезичного моніторингу, особливо під час інтенсивних опадів та сніготанення, з метою своєчасного виявлення ознак нестабільності та запобігання розвитку небезпечних процесів.

Висновки

У даній дипломній роботі успішно виконано побудову цифрової моделі рельєфу (ЦМР) території міста Яремче та її комплексний морфометричний аналіз на основі загальнодоступних супутникових даних SRTM DEM. Проведене дослідження дозволило отримати кількісні характеристики рельєфу та здійснити їхню інженерно-геодезичну оцінку, що є надзвичайно актуальним для гірських територій Українських Карпат.

В ході дослідження було досягнуто поставленої мети та виконано усі визначені завдання:

Проаналізовано теоретичні засади та сучасні методи побудови ЦМР, а також основи морфометричного аналізу рельєфу, визначивши їхню ключову роль у сучасній інженерній геодезії та геології.

Здійснено збір, попередню обробку та імпорт вихідних супутникових даних SRTM DEM для досліджуваної ділянки м. Яремче, що забезпечило основу для подальшого геопросторового аналізу.

Побудовано високоякісну цифрову модель рельєфу досліджуваної території, яка точно відображає гіпсометричні характеристики місцевості.

Виконано розрахунок та візуалізацію ключових морфометричних показників:

Карта крутизни схилів (Рис. 2.10) чітко розмежувала зони з різним ступенем нахилу. Зокрема, виділено значні площі з пологим та помірно пологим рельєфом (до 10-15°), які є найбільш сприятливими для забудови. Водночас, ідентифіковано ділянки зі значною крутизною (понад 20-30° і особливо обривисті понад 45°), розташовані переважно вздовж річкових долин та у передгір’ях. Ці зони вимагають ретельних

додаткових інженерно-геодезичних вишукувань та обґрунтування застосування дорогих захисних споруд.

Карта експозиції схилів (Рис. 3.4) показала домінуючі напрямки схилів у регіоні, що дозволяє враховувати вплив сонячної радіації, вітрового режиму та особливостей зволоження ґрунтів при плануванні інженерних робіт та розміщенні об’єктів. Наприклад, північні та північно-східні схили, що довше зберігають вологу, можуть бути більш схильними до обводнення та менш стійкими.

Проведено комплексний інженерний аналіз морфометричних характеристик рельєфу, що дозволило оцінити їхній інтегрований вплив на інженерно-геодезичні умови міста Яремче.

Здійснено оцінку точності вихідної ЦМР SRTM DEM та визначено масштаби застосовності отриманих картографічних матеріалів.

Відповідно до отриманих результатів, можна зробити висновок, що значна частина досліджуваної території міста Яремче є перспективною для подальшого будівництва та розвитку туристичного напрямку, особливо пологі та помірно пологі ділянки в низинних частинах та на плато. Ці зони є найбільш привабливими для зведення нових об'єктів інфраструктури, готелів, баз відпочинку та розвитку екотуризму, завдяки відносно сприятливим умовам для інженерних робіт.

Критично важливо враховувати специфічні особливості рельєфу, а саме:

Схилові процеси: Ділянки з крутизною понад 20° та особливо понад 30° потребують детальних геодезичних досліджень, розрахунку стійкості схилів та розробки комплексних інженерно-захисних заходів (укріплення схилів, будівництво дренажних систем, підпірних стінок) для запобігання зсувам та обвалам.

Логістика та доступність: Складний гірський рельєф зумовлює підвищені вимоги до проєктування транспортних шляхів. Карти крутизни є ключовими для оптимізації маршрутів, мінімізації обсягів земляних робіт та забезпечення безпечного пересування транспорту та техніки, зокрема військового призначення.

Оцінка точності ЦМР SRTM DEM з просторовою роздільною здатністю 30 м показала, що її вертикальна середня квадратична похибка (RMSE) для гірських територій може становити близько 6.8 метра. Визначений еквівалентний картографічний масштаб досліджуваної ЦМР складає 1:150 000. Це свідчить про те, що отримані картографічні матеріали та результати аналізу є придатними для:

Середньомасштабного картографування (наприклад, 1:25 000 – 1:200 000, до якого відноситься й аналізована територія) для завдань регіонального планування, попереднього інженерно-геодезичного зонування та загальної оцінки природно-техногенних ризиків на значних територіях. Згідно з п. 4.7.3 "Основних положень щодо створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000 – 1:1 000 000" «Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000 (Затверджені наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру України №156 від 31.12.1999р. і погоджені з Воєнно-топографічним управлінням Генерального штабу Збройних сил України)» середньоквадратична похибка висотного положення об’єктів на картах цього масштабу в гірських районах має бути до половини (1/2) основної висоти перерізу рельєфу. Враховуючи, що для карт масштабу 1:150 000 у гірській місцевості типова висота перерізу становить, наприклад, 40 метрів, допустима нормативна похибка складає 20 метрів. Таким чином, фактична точність SRTM (6.8 м) є значно кращою за нормовану допустиму похибку для карт цього масштабу, що підтверджує придатність даних SRTM для таких завдань.

Стратегічного планування та наукового дослідження.

Однак, слід підкреслити, що ЦМР SRTM з роздільною здатністю 30 м не може бути використана для:

- Високоточних великомасштабних інженерних вишукувань та детального проєктування (наприклад, масштаби 1:5 000 і крупніше): Для таких цілей, де потрібна точність на рівні десятків сантиметрів або одиниць метрів (наприклад, для проєктування фундаментів, точних розрахунків обсягів земляних робіт, будівництва доріг, гідротехнічних споруд), даних SRTM недостатньо.
- Детальних інженерно-геологічних вишукувань на конкретних ділянках: Локальні, дрібні форми рельєфу, незначні перепади висот або мікрорельєф, критичні для аналізу стійкості схилів на ділянці забудови, можуть бути не відображені або спотворені.
- Точного визначення меж земельних ділянок або проектування комунікацій, що вимагають високої точності прив'язки.

Важливо: Хоча морфометричні карти, отримані з SRTM, дозволяють здійснити попередню інженерно-геодезичну оцінку та виділити перспективні зони для забудови та розвитку туристичного напрямку, всі обрані ділянки для потенційного розвитку потребують проведення більш точних геодезичних вишукувань. Це забезпечить необхідний рівень деталізації та точності для безпечного та ефективного проєктування й будівництва, запобігаючи можливим ризикам, пов'язаним з геологічними процесами та особливостями гірського рельєфу.

Практичне значення отриманих даних є значним і полягає в їхній готовності до використання органами місцевого самоврядування, проєктними та будівельними організаціями для:

- раціонального планування забудови та прокладання комунікацій;
- оцінки природних ризиків та розробки превентивних заходів;
- актуалізації міських геоінформаційних систем.

Таким чином, мета роботи досягнута, а усі поставлені завдання виконані. Проведене дослідження підтверджує ефективність застосування сучасних ГІС-технологій та загальнодоступних супутникових даних для попереднього інженерно-геодезичного аналізу рельєфу в умовах гірської місцевості, надаючи цінний інструментарій для забезпечення сталого розвитку та безпеки інфраструктури регіону.

Список використаних джерел:

Один автор	Литвин В. О. Основи ГІС та дистанційного зондування Землі. Київ : Наукова думка, 2019. 510 с.
П'ять і більше авторів	Інженерна геодезія. Науково-технічний збірник. Випуск 60, ISS¬ 0130-6014, 2014 рік.
Два автори	Шульц Р. В., Денисюк Б. І. Інженерна геодезія : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2017. 480 с.
П'ять і більше авторів	С. П. Войтенко, Р. В. Шульц, О. М. Самойленко, О. В. Адаменко, О. І. Терещук, В. С. Старовєров, О. Й. Кузьмич Інженерна геодезія: підручник. Чернігів:ц Національного університету «Чернігівська політехніка», 2022. 699с
П'ять і більше авторів	Геоінформаційні системи та технології : підручник / [А. В. Гінжул та ін.] ; за заг. ред. А. В. Гінжула. Київ : Вища школа, 2022. 600 с.
Стаття	Іванов П. М. Аналіз впливу крутизни схилів на зсувні процеси в Карпатському регіоні Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка Географія 2020 Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія
Електронні ресурси	OpenTopography. SRTM Global 1 arc second dataset. URL: https://opentopography.org/data/srtmgl1
Електронні ресурси	QGIS Development Team. QGIS User Guide. URL: https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/

Електронні ресурси	Оцінка точності цифрових моделей рельєфу для моделювання локального геоїда. https://www.nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2024/5/05_2024_Urazaliyev.pdf
Електронні ресурси	Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000 (Затверджені наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру України №156 від 31.12.1999 р. і погоджені з Воєнно-топографічним управлінням Генерального штабу Збройних сил України) https://gki.com.ua/files/uploads/documents/Norms/Ukrgeodesykart_norms/156_1999.pdf