

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА  
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ЗЕМЛЕЗНАВСТВА ТА ГЕОМОРФОЛОГІЇ

На правах рукопису

УДК: 551.4.035:338.48(234.421.1)

**ОЦІНКА АНТРОПОГЕННОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕЛЬЄФУ  
ЧОРНОГІРСЬКОГО МАСИВУ ПІД ВПЛИВОМ ГЕОТУРИЗМУ (НА  
ПРИКЛАДІ ДІЛЯНКИ Г. ГОВЕРЛА – ОЗ. НЕСАМОВИТЕ)**

Галузь знань 10 – Природничі науки

Спеціальність 106 – Географія

Освітня програма Геоморфологія та палеогеографія

Кваліфікаційна робота магістра

студента 2 курсу

освітнього рівня магістр

Святецького Даніїла Євгеновича

Науковий керівник:

Бортник Сергій Юрійович

Професор, доктор географічних наук

КИЇВ – 2026

## ЗМІСТ

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП .....</b>                                                                                                 | <b>3</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОТУРИЗМУ НА РЕЛЬЄФ .....</b>                      | <b>5</b>  |
| 1.1. Сутність геотуризму та його роль у природокористуванні .....                                                  | 5         |
| 1.2. Антропогенна геоморфологія: види та наслідки рекреаційної дигресії рельєфу .....                              | 8         |
| 1.3. Методи геоінформаційного моделювання в оцінці туристичного навантаження .....                                 | 11        |
| <b>РОЗДІЛ 2. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>                                        | <b>13</b> |
| 2.1. Геолого-геоморфологічні особливості Чорногірського масиву .....                                               | 13        |
| 2.2. Кліматичні та гідрологічні умови як фактори пришвидшення ерозійних процесів .....                             | 16        |
| 2.3. Сучасний стан розвитку туризму та рекреаційної інфраструктури досліджуваної ділянки .....                     | 19        |
| <b>РОЗДІЛ 3. ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ АНТРОПОГЕННОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕЛЬЄФУ .....</b>                                 | <b>24</b> |
| 3.1. Формування бази просторових даних та створення цифрової моделі рельєфу .....                                  | 24        |
| 3.2. Морфометричний аналіз рельєфу та виявлення ділянок ризику деградації .....                                    | 27        |
| 3.3. Просторово-часове моделювання рекреаційного навантаження та оцінка деградації рослинного покриву .....        | 31        |
| 3.4. Оцінка рекреаційної ємності ключових геосайтів маршруту .....                                                 | 35        |
| <b>РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ РЕКРЕАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЧОРНОГІРСЬКОМУ МАСИВІ .....</b> | <b>40</b> |
| 4.1. Інженерне облаштування та стабілізація туристичних маршрутів .....                                            | 40        |
| 4.2. Геоінформаційне проектування альтернативних шляхів та перерозподіл туристичних потоків .....                  | 43        |
| 4.3. Функціональне зонування та просторове управління туристичними потоками .....                                  | 46        |
| 4.4. Перспективи використання БПЛА та краудсорсингових ГІС для сталого екологічного моніторингу .....              | 48        |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>                                                                                              | <b>50</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                                                                            | <b>52</b> |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Українські Карпати, і зокрема Чорногірський масив, є одним із найпопулярніших регіонів для розвитку природопізнавального туризму. Протягом останніх років спостерігається стрімке зростання рекреаційного навантаження на високогірні ландшафти, що призводить до інтенсифікації процесів антропогенної геоморфології. Найбільш вразливими до туристичного впливу є ділянки популярних маршрутів, зокрема відрізок між горою Говерла та озером Несамовите. Неорганізований туризм, надмірне витоптування, стихійні кемпінги та відхилення від маркованих стежок спричиняють рекреаційну дигресію: розвиток лінійної ерозії, ущільнення ґрунтів та руйнування унікальних геокomплексів. Це зумовлює гостру необхідність просторового аналізу масштабів деградації із застосуванням сучасних геоінформаційних технологій для розробки дієвих механізмів управління туристичними потоками та збереження геоморфологічних об'єктів. Дослідження цієї проблеми відповідає сучасним потребам сталого розвитку природоохоронних територій та збереження їх геотуристичного потенціалу.

**Об'єкт дослідження** – рельєф та геокomплекси Чорногірського масиву (в межах ділянки г. Говерла – оз. Несамовите).

**Предмет дослідження** – закономірності просторово-часової антропогенної трансформації рельєфу під впливом геотуристичної діяльності.

**Мета дослідження** – виявити просторово-часові закономірності та оцінити ступінь антропогенної трансформації рельєфу досліджуваної ділянки за допомогою геоінформаційного моделювання для розробки рекомендацій щодо оптимізації туристичного навантаження.

Для досягнення поставленої мети передбачено комплексне виконання низки завдань. Насамперед планується узагальнити теоретико-методологічні засади дослідження впливу туризму на рельєф та проаналізувати наслідки рекреаційної дигресії. Спираючись на цю базу, буде охарактеризовано фізико-географічні

умови, ключові чинники морфогенезу, а також сучасний стан рекреаційної інфраструктури Чорногірського масиву. Важливим етапом роботи є формування бази просторових даних, що дозволить здійснити детальний геоінформаційний аналіз поточного рекреаційного навантаження і морфометрії рельєфу. Підсумком дослідження стане оцінка рекреаційної ємності ключових геосайтів із подальшою розробкою дієвих просторових та інженерно-екологічних рекомендацій, спрямованих на мінімізацію негативного впливу туризму.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених завдань у роботі застосовано комплекс методів: *загальнонаукові* (аналіз і синтез, порівняння, систематизація, узагальнення); *загальногеографічні* (картографічний, аналіз матеріалів космічної зйомки, експедиційний); *конкретнонаукові* (геоінформаційне просторове моделювання у середовищі QGIS, морфометричний аналіз цифрових моделей рельєфу, метод буферизації, методи оцінки рекреаційної ємності території) .

**Інформаційна база дослідження** включає цифрові моделі рельєфу (Copernicus DEM), супутникові знімки (Sentinel-2), відкриті просторові дані про мережу стежок (OpenStreetMap), глобальні масиви даних про переміщення туристів (Strava Global Heatmap), фондові матеріали Карпатського національного природного парку, а також наукові публікації вітчизняних і закордонних дослідників з питань динамічної геоморфології та рекреаційної географії.

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує \_\_\_\_ найменувань, та \_\_\_\_ додатків. Основний зміст роботи викладено на \_\_\_\_ сторінках.

# **РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТУРИЗМУ НА РЕЛЬЄФ**

## **1.1. Сутність геотуризму та його роль у природокористуванні**

В умовах глобалізації та зростання антропогенного тиску на навколишнє середовище, традиційні форми рекреації поступово трансформуються, поступаючись місцем спеціалізованим видам туризму. Одним із найперспективніших напрямків, що поєднує пізнавальну діяльність із принципами сталого розвитку, є геотуризм.

З наукової точки зору, геотуризм порівняно молоде поняття, яке виокремилося на перетині наук про Землю (геології, геоморфології, географії) та рекреалогії наприкінці ХХ століття. Вперше термін був запропонований британським дослідником Томасом Хоузом (Т. Nose) у 1995 році. За його класичним визначенням, геотуризм — це надання інтерпретаційних засобів та послуг з метою популяризації цінності та соціальної користі геологічних і геоморфологічних об'єктів та матеріалів, а також забезпечення їхнього збереження для майбутніх поколінь [1].

Сучасна парадигма геотуризму розглядає його значно ширше. Дослідники Р. Доулінг та Д. Ньюсом визначають його як форму природничого туризму, яка фокусується виключно на ландшафті та геології. На відміну від екотуризму, який зосереджується переважно на біотичному компоненті (флорі та фауні), геотуризм ставить у центр уваги абіотичну складову природи: форми рельєфу, відслонення гірських порід, мінерали, скам'янілості та процеси, що формують земну поверхню [2].

Основним ресурсним потенціалом для геотуризму виступають геосайти — геологічні або геоморфологічні пам'ятки, що являють собою ділянки простору з особливою науковою, освітньою, естетичною або культурною цінністю. Для цілей

просторового аналізу ці об'єкти прийнято класифікувати за їхньою генетичною природою.

Згідно з підходами Європейської асоціації збереження геологічної спадщини (ProGEO), виокремлюють кілька основних типів таких локацій. Першу групу становлять **геоморфологічні геосайти** — різноманітні рельєфні форми, що ілюструють сучасні або давні екзогенні процеси, як-от льодовикові кари, морени та каменясті осипища Чорногірського масиву. До другої категорії належать **гідрологічні та гідрогеологічні об'єкти**, які охоплюють унікальні водойми, водоспади, джерела та високогірні озера. Яскравим прикладом тут є озеро Несамовите, яке має льодовикове походження та вважається одним із найвисокогірніших в Україні. Третім важливим типом є **петрографічні та структурно-тектонічні геосайти**, представлені переважно скельними відслоненнями, що наочно демонструють внутрішню будову земної кори, зокрема виходами флішових порід безпосередньо на схилах гір.

Цінність геосайту визначається не лише його зовнішньою атрактивністю (мальовничістю), але й репрезентативністю — здатністю бути еталоном певного геологічного процесу або епохи.

Особливого значення набуває роль геотуризму в системі раціонального природокористування. Традиційно літосфера та рельєф розглядалися суспільством переважно як джерело мінеральної сировини або базис для будівництва, що призводило до їхнього безповоротного знищення (видобуток корисних копалин, кар'єрна розробка). Геотуризм пропонує кардинально інший, неконсумпційний (невиснажливий) підхід до використання надр і рельєфу.

Роль геотуризму у природокористуванні комплексно реалізується через три ключові функції.

Перша з них — освітньо-виховна (інтерпретаційна), яка полягає у трансформації складних геологічних і геоморфологічних знань у доступну для туриста форму. Завдяки усвідомленню того, що конкретна форма рельєфу (як-от

льодовиковий кар) створювалася протягом десятків тисяч років, у відвідувачів формується екологічна свідомість та глибока повага до природи.

Не менш важливою є економічна функція, що передбачає створення доданої вартості на базі природоохоронних територій. Геотуризм стимулює розвиток місцевих громад, розбудову інфраструктури та появу нових робочих місць, завдяки чому охорона довкілля стає економічно вигіднішою альтернативою промисловому освоєнню.

Зрештою, природоохоронна та інституційна функція забезпечує акумулювання коштів від туристичної діяльності для безпосереднього збереження геосайтів, постійного моніторингу їхнього стану та захисту від руйнування. Вищою формою реалізації цієї функції у світі визнано концепцію Глобальних геопарків ЮНЕСКО (UNESCO Global Geoparks) — територій, де управління геологічною спадщиною міжнародного значення спирається на цілісну концепцію охорони, освіти та сталого розвитку [3]. І хоча в Україні розбудова мережі таких геопарків перебуває лише на початковому етапі, впровадження їхніх принципів управління на базі існуючих об'єктів природно-заповідного фонду (зокрема, Карпатського НПП) залишається ключовим стратегічним орієнтиром.

Отже, геотуризм виступає ефективним інструментом сталого просторового розвитку. Він дозволяє збалансувати економічні інтереси рекреаційної галузі з імперативами охорони навколишнього середовища. Однак, парадоксальність ситуації полягає в тому, що зростання популярності геосайтів неминуче призводить до збільшення антропогенного навантаження на них. Самі туристи, прагнучи доторкнутися до унікальних форм рельєфу, стають потужним рельєфотвірним фактором, здатним провокувати або пришвидшувати екзогенні процеси руйнування.

## 1.2. Антропогенна геоморфологія: види та наслідки рекреаційної дигресії рельєфу

Сучасний розвиток суспільства призвів до того, що людина стала одним із найпотужніших рельєфотвірних факторів на планеті. Вивченням змін земної поверхні під впливом господарської діяльності займається антропогенна геоморфологія. Традиційно в її межах досліджували переважно промисловий, аграрний та селітебний (міський) морфогенез. Проте, з огляду на масовість сучасного туризму, науковці виокремлюють рекреаційний морфогенез — сукупність процесів перетворення рельєфу під впливом туристичної інфраструктури та безпосередньої присутності рекреантів.

У контексті неорганізованого природопізнавального туризму головним механізмом руйнування геокомплексів є **рекреаційна дигресія** — стадійний процес погіршення стану екосистем та деградації рельєфу під впливом надмірного туристичного навантаження.

Найбільш вразливими до рекреаційної дигресії є високогірні ландшафти, зокрема гірсько-лугові (альпійські та субальпійські) пояси Українських Карпат. Це зумовлено коротким вегетаційним періодом, малою потужністю ґрунтового покриву та значною крутизною схилів, що робить рельєф вкрай нестійким до механічного пошкодження [7].

Вплив геотуризму на рельєф є комплексним процесом, що проявляється через низку взаємопов'язаних змін. Первинною стадією антропогенної трансформації стає механічне витоптування та ущільнення ґрунту. Рух туристів призводить до знищення дернини, через що верхні горизонти ґрунту можуть ущільнюватися в 2–3 рази. Це різко знижує водопроникність поверхні, змушуючи дощові та талі води формувати потужний поверхневий стік. Як наслідок, запускаються процеси площинного змиву, коли найбільш родючий шар змивається вниз по схилу, оголюючи корінні породи [4].

Згодом цей стік спричиняє розвиток лінійної ерозії, що є найбільш візуально вираженим наслідком туристичної діяльності у горах. Гірська стежка, прокладена без урахування крутизни схилу, поступово перетворюється на тимчасовий водотік і починає врізатися вглиб. Наприклад, на Чорногірському масиві такі ерозійні рови нерідко сягають глибини понад 1–1,5 метра. Намагаючись оминати розмиті канави, туристи прокладають нові маршрути паралельно до старих, створюючи своєрідні "багатосмугові" стежки та катастрофічно розширюючи зону ерозії [5].

Окрім ерозійних процесів, туристична активність призводить до інтенсифікації гравітаційних та нівальних явищ. Відхилення від маркованих маршрутів на крутих схилах часто провокує зсуви, осипища та каменепади. Проходження великих груп людей порушує рівновагу уламкового матеріалу (курумів) на схилах гір, пришвидшуючи денудацію. Водночас витоптування сніжників (фірнових полів) у весняно-літній період негативно впливає на мікрорельєф нівальних ніш.

Значної деградації зазнають і берегові зони водних об'єктів, де зазвичай концентруються туристичні кемпінги. Навколо високогірних озер розбиття наметів та розведення багать (часто разом із незаконною вирубкою жерепу) завершується повним знищенням рослинного покриву. Усе це призводить до руйнування берегової лінії, зсувів ґрунту безпосередньо у водойму та інтенсивного замулення озерної улоговини [6].

Загальноприйнятою є п'ятистадійна шкала оцінки рекреаційної дигресії, де перша стадія характеризується одиничними слідами перебування людини, а п'ята (критична) — повною втратою природної структури ландшафту, тотальним оголенням гірських порід та активним розвитком бедлендів. Досліджуваний відрізок маршруту між горою Говерла та озером Несамовите на значній своїй протяжності перебуває на 3-й та 4-й стадіях дигресії, що вимагає негайного втручання.

Таким чином, неконтрольований геотуризм містить у собі внутрішній конфлікт: прагнення туристів побачити унікальні геосайти призводить до їхнього

фізичного руйнування. Для ефективного управління цією проблемою простої констатації факту деградації недостатньо. Необхідне точне розуміння масштабів та просторової локалізації ерозійних процесів, що стає можливим завдяки залученню методів геоінформаційного аналізу та моделювання

### 1.3. Методи геоінформаційного моделювання в оцінці туристичного навантаження

Оцінка та прогнозування рекреаційної дигресії рельєфу в умовах високогір'я є складним завданням, яке вимагає обробки великих масивів просторової інформації. Класичні польові (експедиційні) методи досліджень, хоча й залишаються фундаментом для збору первинних даних, не дозволяють оперативно оцінювати зміни на великих територіях. Вирішення цієї проблеми стало можливим завдяки впровадженню геоінформаційних систем (ГІС) та технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Геоінформаційне моделювання в контексті антропогенної геоморфології — це процес створення цифрових просторових моделей, які відображають взаємодію туристичних потоків із рельєфом, з метою оцінки та прогнозування ерозійних та деградаційних процесів [8].

Застосування ГІС-технологій (зокрема, програмного комплексу QGIS) для дослідження туристичного навантаження базується на комплексній інтеграції кількох просторових методів. Основою будь-якого геоморфологічного ГІС-дослідження виступає **морфометричний аналіз на основі високоточних цифрових моделей рельєфу (ЦМР)**, таких як Copernicus DEM або SRTM [23]. За допомогою інструментів просторового аналізу з цих моделей генеруються похідні растрові поверхні: карти крутизни (Slope) та експозиції схилів (Aspect). Аналіз крутизни має критичне значення через пряму кореляцію між кутом нахилу стежки та інтенсивністю лінійної ерозії. Перетин векторного шару туристичних маршрутів із растром крутизни дозволяє автоматизовано виявляти ділянки з критичним похилом, де ризик змиву ґрунту є найвищим.

Наступним важливим інструментом є **аналіз даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ)**. Використання багатоспектральних супутникових знімків (наприклад, місії Sentinel-2) дозволяє здійснювати моніторинг стану рослинного покриву, який слугує першим індикатором рекреаційної дигресії. Розрахунок

вегетаційних індексів, зокрема NDVI (нормалізованого відносного індексу рослинності), дає змогу чітко дешифрувати зони витоπτування. На знімках високої роздільної здатності ділянки стихійних кемпінгів (як-от навколо озера Несамовите) або сильно розширені стежки фіксуються як аномалії зі зниженими показниками фотосинтетичної активності.

Доповнює ці дані **просторове моделювання туристичних потоків**, сучасним трендом якого є використання краудсорсингових геоданих — інформації, зібраної самими туристами за допомогою GPS-трекерів та фітнес-додатків (наприклад, Strava Global Heatmap) [24]. Побудова теплових карт на основі таких треків візуалізує реальну, а не лише офіційно марковану мережу переміщення рекреантів. Це дозволяє виявляти стихійні стежки, "зрізки" на серпантинах та зони неконтрольованого розходження туристів по альпійських луках.

Для кількісної оцінки та узагальнення результатів застосовується **метод буферизації та оверлейний аналіз**. Побудова буферних зон (наприклад, радіусом 50, 100 та 200 метрів від урізу води чи скельного виходу) навколо ключових геосайтів та місць стоянок дозволяє виміряти площу антропогенної трансформації ґрунтів. Зрештою, оверлейний аналіз, що полягає у просторовому накладанні кількох тематичних шарів один на одного, дає змогу синтезувати дані про рельєф, стан рослинності та туристичний трафік для створення комплексних карт вразливості й екологічних ризиків території.

Отже, застосування геоінформаційного моделювання дозволяє перейти від якісного опису проблеми рекреаційної дигресії до її точної кількісної та просторової оцінки. Створені у ГІС-середовищі картографічні моделі стають не лише інструментом наукового пізнання, але й основою для прийняття управлінських рішень: планування інженерних заходів з укріплення стежок, зонування території та проектування безпечних альтернативних маршрутів.

## **РОЗДІЛ 2. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **2.1. Геолого-геоморфологічні особливості Чорногірського масиву**

Чорногірський масив є найвищою гірською системою Українських Карпат, що простягається з північного заходу на південний схід на понад 40 кілометрів. Досліджувана ділянка (відрізок маршруту між горою Говерла та озером Несамовите) розташована в центральній, найбільш піднятій частині масиву і характеризується типовим високогірним альпійським рельєфом, який сформувався під впливом складної геологічної історії та давнього зледеніння.

**Геологічна та тектонічна будова** У тектонічному відношенні Чорногора належить до Полонинсько-Чорногірської зони Карпатської складчастої системи. Масив має покривно-складчасту (насувну) будову. Досліджувана територія складена переважно породами крейдового та палеогенового віку, що формують потужну товщу карпатського флішу — ритмічного чергування шарів пісковиків, алевролітів, аргілітів та мергелів [9].

Рельєфоутворююча роль гірських порід тут виражена надзвичайно яскраво (явище препарування рельєфу). Найвищі вершини масиву, зокрема Говерла (2061 м), Брескул (1911 м) та Туркул (1933 м), складені так званою «чорногірською світою» — масивними, стійкими до вивітрювання пісковиками. Натомість сідловини та зниження між вершинами зазвичай приурочені до виходів м'якших порід — аргілітів та мергелів, які легко піддаються денудації.

У контексті нашого дослідження, літологічна неоднорідність безпосередньо впливає на розвиток рекреаційної дигресії. Туристичні стежки, прокладені по стійких масивних пісковиках (наприклад, на гребені г. Брескул), витримують значно більше механічне навантаження і розширюються повільніше. Натомість на ділянках сідловин (наприклад, між г. Пожижевська і г. Данціж), де на поверхню виходять м'які аргіліти, стежки інтенсивно розмиваються дощами,

перетворюючись на глибокі ерозійні рівчаки, що змушує туристів прокладати нові стежки поруч, збільшуючи площу деградації [10].

Геоморфологічна будова та морфометрія Чорногірського масиву характеризується масивними хребтами з крутими (часто понад 30–35°) схилами та широкими гребенями. Морфологічно масив асиметричний: його південно-західні схили, що спускаються до Закарпаття, розчленовані слабше і мають менший ухил, тоді як північно-східні схили (з боку Івано-Франківської області) відзначаються стрімкістю, наявністю скелястих урвищ та глибоких річкових долин.

Особливістю рельєфу Чорногори, яка формує її найвищий геотуристичний потенціал, є збережені реліктові форми плейстоценового (вюрмського) зледеніння. Оскільки снігова лінія в той період опускалася до висоти 1400–1500 м, це сприяло утворенню долинних та карових льодовиків. Досліджувана ділянка рясніє такими льодовиковими формами рельєфу, як **кари (льодовикові цирки)** — кріслоподібними заглибленнями на схилах гір. Найяскравішим прикладом є кар на східному схилі гори Туркул, на дні якого на висоті 1750 м н.р.м. утворилося озеро Несамовите. Його стрімкі скелясті стінки є одним із найатрактивніших геосайтів маршруту [11]. Поруч із озером також чітко простежуються кінцеві та бокові **морени** — накопичення уламкового матеріалу, залишеного льодовиком. Через значну рихлість та нестійкість моренних відкладів їх використання туристами для облаштування кемпінгів та прокладання стихійних стежок призводить до інтенсивного руйнування цих унікальних реліктових форм.

Високогірне розташування та значні похили схилів зумовлюють високу інтенсивність сучасних природних екзогенних процесів, які суттєво пришвидшуються під впливом антропогенного фактора. Зокрема, на ділянці «Говерла – Несамовите» активно протікають **гравітаційні процеси**, що супроводжуються утворенням кам'яних розсипів (курумів) та осипищ на стрімких схилах гір Брескул та Пожижевська. Механічний вплив, такий як вібрація та тиск від кроків тисяч туристів, порушує динамічну рівновагу уламкового матеріалу,

провокуючи зсуви каміння та локальні обвали, особливо там, де стежки перетинають куруми.

Водночас на території поширені **нівальні процеси**, пов'язані з діяльністю снігу, який може лежати в карах до середини літа. Танення сніжників провокує соліфлюкцію (спливання перезволоженого ґрунту), що значно ускладнює проходження маршрутів. У цей період ґрунт стає максимально вразливим до механічного пошкодження, і туристи, намагаючись обійти перезволожені ділянки, витоптують альпійську рослинність по краях стежки, розширюючи зону деградації. Це явище тісно пов'язане з **флювіальними процесами**: знищення дернини відкриває поверхню для прямого впливу дощових крапель, що спричиняє площинний змив та стає основним фактором розвитку інтенсивної лінійної ерозії вздовж туристичних маршрутів.

Отже, геолого-геоморфологічні умови Чорногірського масиву є визначальними з двох причин. З одного боку, альпійський тип рельєфу та сліди давнього зледеніння створюють унікальну атрактивність території для геотуризму. З іншого боку, крутизна схилів, літологічні особливості (чергування м'яких і твердих порід) та інтенсивність сучасних екзогенних процесів роблять ці геокomплекси вкрай чутливими до додаткового антропогенного навантаження. Усе це зумовлює необхідність детального врахування морфометрії та геологічної будови під час проектування або оптимізації туристичних маршрутів.

## 2.2. Кліматичні та гідрологічні умови як фактори пришвидшення ерозійних процесів

Кліматичні та гідрологічні характеристики Чорногірського масиву відіграють роль потужних природних каталізаторів рекреаційної дигресії. В умовах високогір'я клімат відзначається суворістю, що зумовлює загальну вразливість ландшафтів та їхню низьку здатність до самовідновлення. Щойно туристичний трафік порушує цілісність рослинного покриву (дернини), кліматичні фактори починають безпосередньо взаємодіяти з оголеним ґрунтом і гірськими породами, різко пришвидшуючи процеси морфогенезу.

Чорногора є найбільш вологим регіоном Українських Карпат, де середньорічна кількість опадів становить 1400–1600 мм, причому значна їх частина випадає у вигляді інтенсивних літніх злив [13]. Краплі такого дощу, маючи високу кінетичну енергію, руйнують структуру оголеного ґрунту на витоптаних туристами стежках, спричиняючи краплинну ерозію. Оскільки ущільнений ґрунт втрачає здатність до інфільтрації, вода миттєво трансформується у потужний площинний змив, а на похилих ділянках маршруту утворюються тимчасові водотоки, що призводять до глибокої лінійної ерозії. Цей процес значно посилюється впливом сучасних **глобальних кліматичних змін**. За даними метеостанції «Пожижевська», останніми роками періоди тривалих посух дедалі частіше різко змінюються аномально потужними зливами. Висушений ґрунт не здатний швидко поглинути воду, через що ерозійна сила таких раптових опадів зростає в рази порівняно з рівномірними дощами минулих десятиліть [12].

Окрім опадів, потужним агентом деградації виступає **вітровий режим та процеси дефляції**. Чорногірський хребет відзначається високою вітровою активністю, де швидкість вітру під час штормів часто перевищує 20–25 м/с. На відкритих ділянках, особливо на гребенях Говерли, Брескула та Пожижевської, розбитий і розпушений туристичним взуттям дерен у сухі періоди легко підхоплюється і видувається. Це призводить до повного оголення кам'янистого

субстрату, що робить подальше відновлення рослинності практично неможливим [11].

Важливу роль у геоморфологічних змінах відіграють також **температурний режим та морозне вивітрювання**, особливо під час перехідних сезонів (навесні та восени), коли температура постійно коливається через нульову позначку. Вода, замерзаючи в тріщинах порід на скелястих ділянках та в карі озера Несамовите, розширюється і руйнує камінь. Це постійно продукує новий пухкий уламковий матеріал, який накопичується на схилах і легко зміщується вниз під ногами туристів.

Ці явища тісно пов'язані зі **сніговим покривом та нівально-гідрологічними процесами**. Сніг у Чорногорі лежить у середньому 6–7 місяців, а в карах зберігається до середини літа. Під час його весняно-літнього танення ґрунт перенасичується вологою і набуває пластичного або текучого стану (соліфлюкція). Оскільки цей період часто збігається з початком масових походів, механічний вплив на ґрунт стає максимально деструктивним: стежки швидко перетворюються на грязьові місива, змушуючи рекреантів обходити їх по неушкодженій рослинності та катастрофічно розширюючи зону витоуптування [14].

У загальний процес рекреаційної дигресії активно інтегрується і **густа гідрологічна мережа** масиву разом із підземними водами. Окрім поверхневих водотоків, які туристи змушені перетинати, значну проблему створюють високогірні джерела та верховодка. У місцях виходу підземних вод на поверхню (що характерно для схилів навколо Несамовитого) ущільнені стежки починають діяти як дренажні канами. Порушення природного стоку призводить до локального заболочування, через що туристи прокладають нові обхідні шляхи, утворюючи деградовані смуги шириною до 10–15 метрів [15]. Змитий із цих ділянок дрібнозем потрапляє до улоговини озера, спричиняючи його поступове замулення та евтрофікацію (заростання).

Зрештою, найбільша руйнівна дія досягається через **сезонну синергію** кліматичних факторів і туристичного навантаження. Пік відвідуваності Чорногори

припадає на літні місяці, що збігається з періодом найвищої інтенсивності злив. Водночас популярними залишаються травневі та жовтневі походи, коли ґрунти є найбільш вразливими через перезволоження та температурні коливання. Це доводить, що суворі кліматичні умови та специфічний гідрологічний режим виступають невід'ємною складовою механізму антропогенної трансформації рельєфу і вимагають обов'язкового врахування при плануванні будь-яких екологічних та інфраструктурних заходів.

### 2.3. Сучасний стан розвитку туризму та рекреаційної інфраструктури досліджуваної ділянки

Чорногірський масив є найбільш відвідуваним гірським регіоном Українських Карпат. Його висока атрактивність зумовлена наявністю найвищих вершин України (зокрема г. Говерли), унікальними альпійськими краєвидами, льодовиковими озерами та відносно високою транспортною доступністю базових таборів. Досліджувана ділянка (відрізок від г. Говерла до оз. Несамовите) є ключовою ланкою найпопулярнішого транскарпатського пішохідного маршруту, що пролягає головним Чорногірським хребтом.

Ретроспективний аналіз та сучасні тенденції розвитку За останнє десятиліття структура туристичного потоку на Чорногорі зазнала кардинальних змін. Якщо раніше основу становили підготовлені туристичні групи та наукові експедиції, то сьогодні домінує масовий комерційний та самодіяльний туризм. Поява великої кількості комерційних турклубів, які організовують масові сходження (іноді по 50-100 осіб у групі), призвела до різкого збільшення одномоментного механічного навантаження на рельєф. Крім того, популяризація соціальних мереж створила феномен "інста-туризму", коли люди масово відхиляються від безпечних маршрутів заради фотографій на краю небезпечних урвищ та карнизів, що пришвидшує ерозію брівок (країв) карових стінок [14].

Основою рекреаційної інфраструктури масиву виступає мережа маркованих туристичних стежок, де головний хребтовий маршрут, позначений червоним кольором, виконує роль транзитної артерії. Проте ключовою проблемою залишається логістика доступу: оскільки переважна більшість туристів починає маршрут на досліджувану ділянку з навчально-спортивної бази «Заросляк», утворюється просторовий ефект "**пляшкового горла**". Величезна кількість людей концентрується на одній вузькій стежці під час підйому на Говерлу, після чого цей масивний потік продовжує рух хребтом у бік озера Несамовите [16].

Як показує аналіз краудсорсингових геоданих, в умовах відсутності належного інженерного облаштування стежок (зокрема, дерев'яних настилів чи габіонів для укріплення схилів) такий інтенсивний трафік призводить до масового **формування стихійних маршрутів**. Їхня поява здебільшого зумовлена намаганням мандрівників "зрізати" кути на серпантинах та потребою обходити глибокі ерозійні рівчаки чи перезволожені ділянки. Додатковим фактором масштабного руйнування ґрунтового-рослинного покриву стає неорганізований рух великих туристичних груп. Замість того, щоб іти "слід у слід", люди часто розходяться по ширині схилу і рухаються шеренгою, витоптуючи в такий спосіб деградовані смуги шириною до 5–10 метрів.

Ситуація критично ускладнюється тим, що туристичний потік відзначається **яскраво вираженою сезонністю**. Пікові рекреаційні навантаження припадають на липень і серпень, а також на період травневих свят. У ці дні кількість відвідувачів на ділянці «Говерла – Несамовите» може сягати кількох тисяч осіб на добу, що створює безпрецедентний екстремальний тиск на вразливі високогірні ландшафти.

Таке пікове навантаження багаторазово перевищує допустиму рекреаційну місткість. За нормативами для субальпійського поясу Карпат, безпечне навантаження становить не більше 2-4 осіб на гектар за добу [17]. Фактичне ж навантаження у вузьких коридорах стежок перевищує ці показники в десятки разів. Окрім літнього піку, останнім часом зростає популярність зимового та весняного хайкінгу. Використання жорстких снігоступів та кішок (альпіністського спорядження) в умовах тонкого снігового покриву або на відкритих від снігу ділянках завдає глибоких механічних пошкоджень ґрунту і лишайникам на камінні.

Щодо стану інфраструктури місць ночівлі та управління відходами, найбільш критичним елементом на досліджуваній ділянці залишається улоговина озера Несамовите. Хоча водойма лежить у заповідній зоні Карпатського НПП, де розведення багать та встановлення наметів офіційно заборонені, історично ця локація перетворилася на головний туристичний транзитний табір. Відсутність

організованої санітарної інфраструктури спричиняє тут комплекс катастрофічних наслідків для геокомплексу.

Насамперед спостерігається **тотальне витоптування та ерозія**, через що площа повністю позбавленого рослинності ґрунту навколо озера невпинно розширюється. Ця ситуація ускладнюється стрімкою **деградацією рослинного покриву**: незаконна вирубка реліктової сосни гірської (жерепу) для розведення багать позбавляє схили природного укріплення. До того ж регулярне розпалювання вогнищ безпосередньо на гірських породах зумовлює їхнє **температурне руйнування (десквамацію)**, що проявляється у розтріскуванні каменю.

Окремою гострою загрозою стає **проблема твердих побутових відходів (ТПВ)**. Залишення туристами сміття вже давно перейшло межу суто естетичної проблеми. Органічні залишки неминуче призводять до зміни хімічного складу ґрунтів та води в озері. Водночас пластик, швидко руйнуючись під дією інтенсивного гірського ультрафіолету, перетворюється на мікропластик, який незворотно акумулюється в моренних відкладах та донних мулах Несамовитого [16].

Ситуація значно ускладнюється **інституційними проблемами управління територією**, яка перебуває у віданні Карпатського національного природного парку (КНПП). Головною перешкодою тут є невідповідність між задекларованим природоохоронним статусом та реальними механізмами контролю. Через нестачу інспекторів (рейнджерів) у високогір'ї заборони, як-от на розбиття кемпінгів біля озера Несамовите, існують переважно на папері. Крім того, кошти, що збираються за вхід до парку (зокрема на КПП перед базою "Заросляк"), здебільшого не реінвестуються у фізичне облаштування інфраструктури самих маршрутів — будівництво водовідвідних каналів, екотуалетів чи дерев'яних настилів.

Опосередковано на рекреаційне навантаження впливає і стан **транспортно-логістичної інфраструктури базових таборів**. Основна маса туристів стартує з навчально-спортивної бази «Заросляк», яка не розрахована на сучасний потік автомобілів та великогабаритних автобусів. У пікові дні там утворюється

справжній транспортний колапс: нестача паркомісць змушує водіїв залишати транспорт на узбіччях та зелених зонах. Це неминуче призводить до знищення лісових ґрунтів, шумового забруднення та надмірної концентрації вихлопних газів у вузькій долині річки Прут [16].

Новітнім фактором антропогенної трансформації Чорногори став масовий **вплив цифрових технологій та географічного тегування**. Якщо раніше туристичний потік концентрувався виключно на маркованих стежках, то сьогодні публікація в соціальних мережах фотографій "прихованих" локацій із точними GPS-координатами миттєво привертає туди сотні послідовників. Це спричиняє раптове (шокове) антропогенне навантаження на локальні геокомплекси, які раніше були недоторканими і не мають жодного запасу рекреаційної стійкості. У результаті формується хаотична мережа нових стежок, що розпорошують зону ерозії по всьому масиву.

Усе це розгортається на тлі глибокого **економічного та соціального конфлікту інтересів**. Комерційні гіді та туристичні оператори отримують прямий прибуток від експлуатації геосайтів, тоді як екологічні збитки лягають на плечі держави в особі національного парку. Відсутність механізмів цільового реінвестування комерційних прибутків у відновлення ландшафтів призводить до того, що інфраструктура постійно деградує і не встигає за стрімким зростанням кількості відвідувачів [16].

**Висновки до Розділу 2** Підсумовуючи фізико-географічну та рекреаційну характеристику Чорногірського масиву, можна стверджувати про наявність гострого екологічного конфлікту. З одного боку, круті схили, літологічна будова, інтенсивні опади та суворий клімат роблять цей альпійський рельєф надзвичайно вразливим до будь-яких зовнішніх втручань. З іншого боку, масовий, переважно неорганізований та інфраструктурно не забезпечений туристичний потік створює безпрецедентний механічний пресинг на ці геокомплекси. Наслідком такого поєднання є швидка і незворотна антропогенна трансформація рельєфу (рекреаційна дигресія). Для розробки дієвих управлінських рішень необхідна точна

локалізація та кількісна оцінка цих деградаційних процесів, що потребує застосування методів просторового геоінформаційного моделювання, алгоритми якого будуть розкриті у наступному розділі роботи.

## РОЗДІЛ 3. ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ АНТРОПОГЕННОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕЛЬЄФУ

### 3.1. Формування бази просторових даних та створення цифрової моделі рельєфу

Основою будь-якого сучасного дослідження в галузі просторового моделювання та антропогенної геоморфології є формування якісної та актуальної бази геоданих. Для оцінки рекреаційної дигресії на ділянці «г. Говерла – оз. Несамовите» було розроблено ГІС-проект у середовищі відкритого програмного забезпечення **QGIS** (версії 3.x).

Оскільки метою дослідження є точний кількісний аналіз (розрахунок крутизни схилів у градусах, вимірювання площ витоптування в квадратних метрах та ширини стежок), першочерговим завданням стало встановлення правильної системи координат. Усі вихідні дані були перепроєктовані з глобальної географічної системи WGS 84 до метричної прямокутної проекції **WGS 84 / UTM zone 35N (EPSG: 32635)**, яка є оптимальною для території Українських Карпат та мінімізує просторові спотворення простору [21].

База просторових даних дослідження формувалася шляхом інтеграції растрових та векторних джерел інформації, що дозволило створити комплексну багашарову модель території.

Для проведення морфометричного аналізу першочерговим завданням стало **створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР)**. Головним растровим шаром було обрано глобальну модель Copernicus DEM із роздільною здатністю 30 метрів на піксель. Вибір саме цього набору даних пояснюється його вищою точністю та значно меншою кількістю артефактів («шумів») у гірській місцевості порівняно з класичною місією SRTM [23]. Процес обробки ЦМР у середовищі QGIS складався з кількох послідовних етапів. Спочатку через європейський портал Copernicus Data Space Ecosystem було завантажено вихідні тайли (tiles) на територію

Чорногірського масиву, які згодом зшили у єдиний растровий масив інструментом Merge. Далі було створено векторний полігон «Area of Interest» (AOI), що окреслив межі досліджуваної ділянки: гори Говерла, Брескул, Пожижевська, Данціж, Туркул та улоговину озера Несамовите. Наостанок загальний растр обрізали по межах цього полігону за допомогою алгоритму Clip Raster by Mask Layer, що суттєво оптимізувало обсяг даних та пришвидшило подальші обчислення.

Наступним кроком стала **векторизація інфраструктури та мережі стежок** для аналізу рекреаційного навантаження. Базовим джерелом векторних об'єктів виступила відкрита картографічна платформа OpenStreetMap (OSM) [25]. Використовуючи модуль QuickOSM у QGIS, дослідники автоматизовано експортували дані за специфічними тегами. Це дозволило виділити марковані туристичні маршрути, водні об'єкти (зокрема полігон озера Несамовите та лінійні шари витоків струмків), а також точкові об'єкти інфраструктури (місця для кемпінгу, геодезичні тріангуляри на вершинах). Після експорту отримані векторні дані ретельно очистили від топологічних помилок, а атрибутивні таблиці розширили для внесення детальної інформації про стан стежок, включаючи їхню ширину, наявність маркування та тип покриття.

Найбільшим викликом в оцінці антропогенної трансформації є те, що офіційна мережа стежок (дані OSM) не відображає реальної картини переміщення людей. Для вирішення цієї проблеми здійснюється **моделювання реального туристичного трафіку** за допомогою краудсорсингових геоданих. До ГІС-проєкту було підключено дані Strava Global Heatmap у форматі XYZ Tiles — растровий шар, що базується на мільйонах GPS-треків, завантажених самими туристами та спортсменами. Використовуючи інструмент Add Raster Image, цю теплову карту наклали на ЦМР. Такий підхід дозволив шляхом екранної (ручної) векторизації створити унікальний лінійний шар «Стихійні стежки», який чітко відображає ділянки масштабного сходження мандрівників з основного маршруту, зони «зрізання» серпантинів та густу мережу протоптаних доріжок навколо місць стоянок біля Несамовитого [24].

Для візуального підтвердження масштабів витоптування рослинності та ерозії ґрунту проводиться **інтеграція супутникових знімків (ДЗЗ)**. До бази даних було імпортовано багатоспектральні космічні знімки місії Sentinel-2 (Європейське космічне агентство) з просторовою роздільною здатністю 10 метрів. Для аналізу відбиралися безхмарні знімки за піковий туристичний період (серпень поточного або минулого року). Використання специфічних комбінацій каналів, зокрема «Natural Color» та «Color Infrared», дало змогу чітко дешифрувати межі оголеного ґрунту на тлі альпійських луків та чагарників жерепу.

Таким чином, у середовищі QGIS було успішно сформовано репрезентативну багатошарову цифрову модель досліджуваної ділянки Чорногірського масиву. Вона органічно поєднує точні метричні дані про рельєф, офіційну та стихійну мережі переміщення туристів, а також актуальні дані дистанційного зондування. Створена комплексна база слугує надійним фундаментом для переходу до наступного етапу роботи — безпосереднього проведення морфометричного та оверлейного аналізів ризиків деградації рельєфу.

### 3.2. Морфометричний аналіз рельєфу та виявлення ділянок з високим ризиком деградації

Базовим етапом геоінформаційного моделювання рекреаційного навантаження є морфометричний аналіз. Він дозволяє кількісно оцінити геометричні властивості земної поверхні, які є критичними для розвитку процесів лінійної ерозії та площинного змиву. У середовищі QGIS морфометричний аналіз виконувався на основі підготовленої цифрової моделі рельєфу (Copernicus DEM) за допомогою вбудованих алгоритмів аналізу растру (Raster Terrain Analysis). [22]

Основними морфометричними показниками, що визначають вразливість геокомплексів Чорногірського масиву до антропогенного впливу, є крутизна (Slope) та експозиція (Aspect) схилів.

Важливим етапом дослідження є **аналіз крутизни схилів (Slope)**, оскільки саме цей показник визначає швидкість поверхневого стоку та, відповідно, кінетичну енергію водних потоків, які розмивають туристичні стежки. За допомогою інструменту Slope у середовищі QGIS було згенеровано растрову поверхню, де кожен піксель отримав значення кута нахилу в градусах. Враховуючи специфіку рекреаційної дигресії, отриманий растр піддали процедурі рекласифікації (інструмент Reclassify by table), розбивши безперервну шкалу значень на чотири класи ерозійної небезпеки. До зони слабого ризику (від 0° до 5°) віднесено плоскі ділянки, як-от дно улоговини озера Несамовите, де домінує витоптування та перезволоження, але лінійна ерозія залишається мінімальною. Помірний ризик (від 5° до 15°) характерний для ділянок із незначним змивом ґрунту, де офіційні марковані стежки ще здатні підтримувати свою структуру без суттєвого інженерного втручання. Зона високого ризику (від 15° до 30°) охоплює круті схили, де швидкість води сягає критичних значень, через що стежки найшвидше перетворюються на ерозійні рівчаки, що особливо помітно на підйомах до Говерли та Брескула. Екстремальний ризик (понад 30°) фіксується на ділянках

стрімких урвищ, карових стінок та курумів, де рух туристів безпосередньо провокує гравітаційні процеси, зокрема каменепади та зсуви [20].

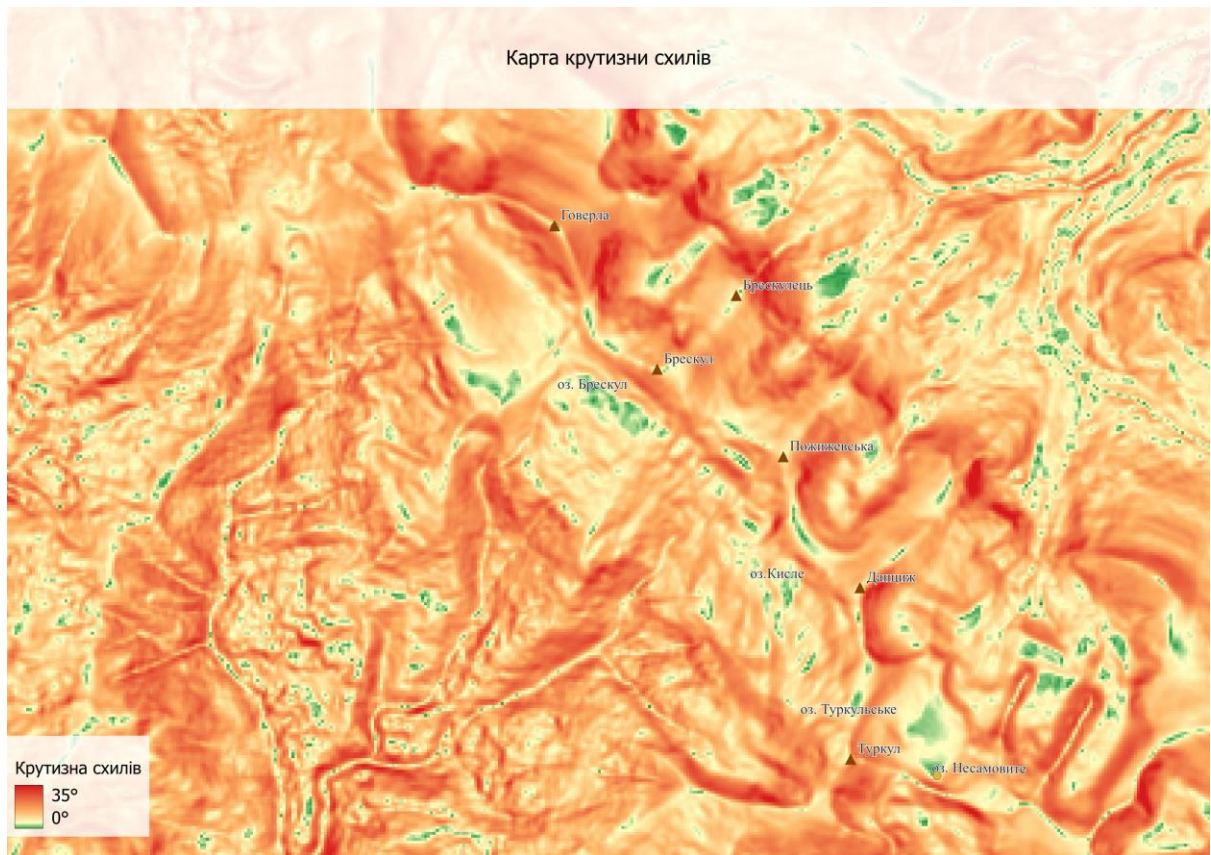


Рис. 1. Карта крутизни схилів

Окрім крутизни, здійснюється **аналіз експозиції схилів (Aspect)**. Орієнтація схилу відносно сторін світу безпосередньо визначає мікрокліматичні умови території: кількість отриманої сонячної радіації, швидкість танення снігу та інтенсивність висихання ґрунту. Завдяки інструменту Aspect було згенеровано відповідний растр із виділенням схилів північних, південних, західних та східних румбів. Цей показник має пряме відношення до стійкості туристичних маршрутів. На південних схилах Чорногори ґрунт пересихає значно швидше, що в комбінації з механічним витоптуванням призводить до інтенсивної дефляції — видування пилу вітром. Натомість на північних та північно-східних схилах, як-от у карі Несамовитого, сніжники зберігаються найдовше. Це формує зони тривалого перезволоження та активізації соліфлюкції, де стежки швидко розбиваються туристами до стану грязьових місив [16].

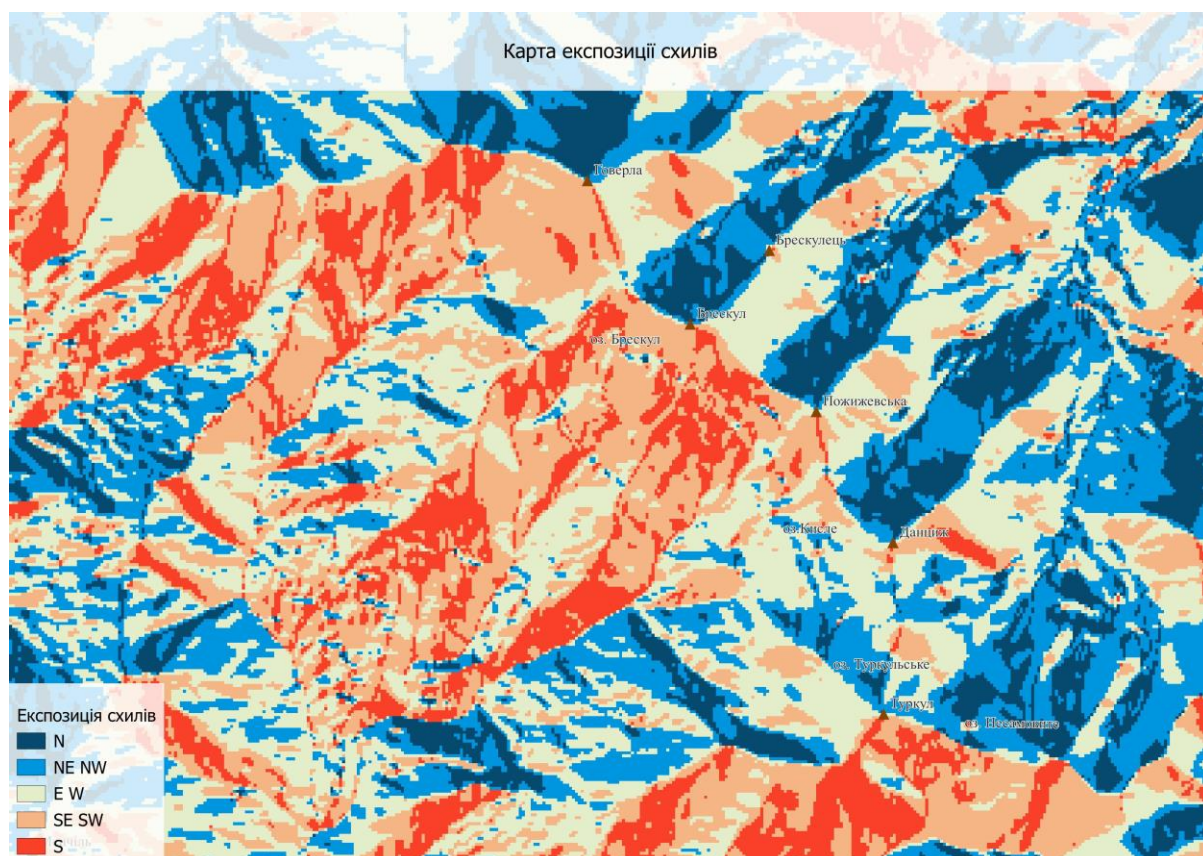


Рис. 2. Карта експозиції схилів

Щоб виявити конкретні ділянки маршруту, які зазнають найбільшої трансформації, застосовується **оверлейний аналіз та просторова локалізація ризиків**. Алгоритм дій у QGIS передбачав перетин векторного шару туристичних стежок, сформованого за даними OSM та Strava, із рекласифікованим растром крутизни. За допомогою інструменту Drape (set Z value from raster) лініям стежок було задано висотні відмітки, а використання алгоритму Add raster values to features (або Zonal Statistics) дозволило автоматизовано витягнути значення ухилу для кожного окремого сегмента маршруту.

Результатом цього етапу стало створення комплексної Карти ерозійної небезпеки туристичних маршрутів. На ній критичні ділянки, де стежка проходить по схилах понад  $15^\circ$ , були візуально виділені червоним кольором. Аналіз цієї карти наочно показав, що найбільший відсоток ерозійно небезпечних сегментів сконцентрований на ділянках "зрізання" серпантинів та на прямих, не спрофільованих підйомах на вершини головного хребта. Саме ці сегменти

потребують першочергового облаштування водовідвідних каналів або терасування [17]. Таким чином, морфометричний аналіз дозволив успішно автоматизувати процес виявлення вразливих ділянок рельєфу на значній площі, перетворивши якісні спостереження на точні просторові координати та об'єктивні кількісні показники.



Рис. 3. Карта ерозійної небезпеки туристичних маршрутів

### 3.3. Просторово-часове моделювання рекреаційного навантаження та оцінка деградації рослинного покриву

Якщо морфометричний аналіз (наведений у попередньому підрозділі) дозволив виділити потенційні зони ерозійного ризику, то наступним кроком є оцінка фактичного стану ландшафтів під впливом туристичного трафіку. Для цього було застосовано методи просторового моделювання (визначення щільності потоків, буферизація) та аналіз даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

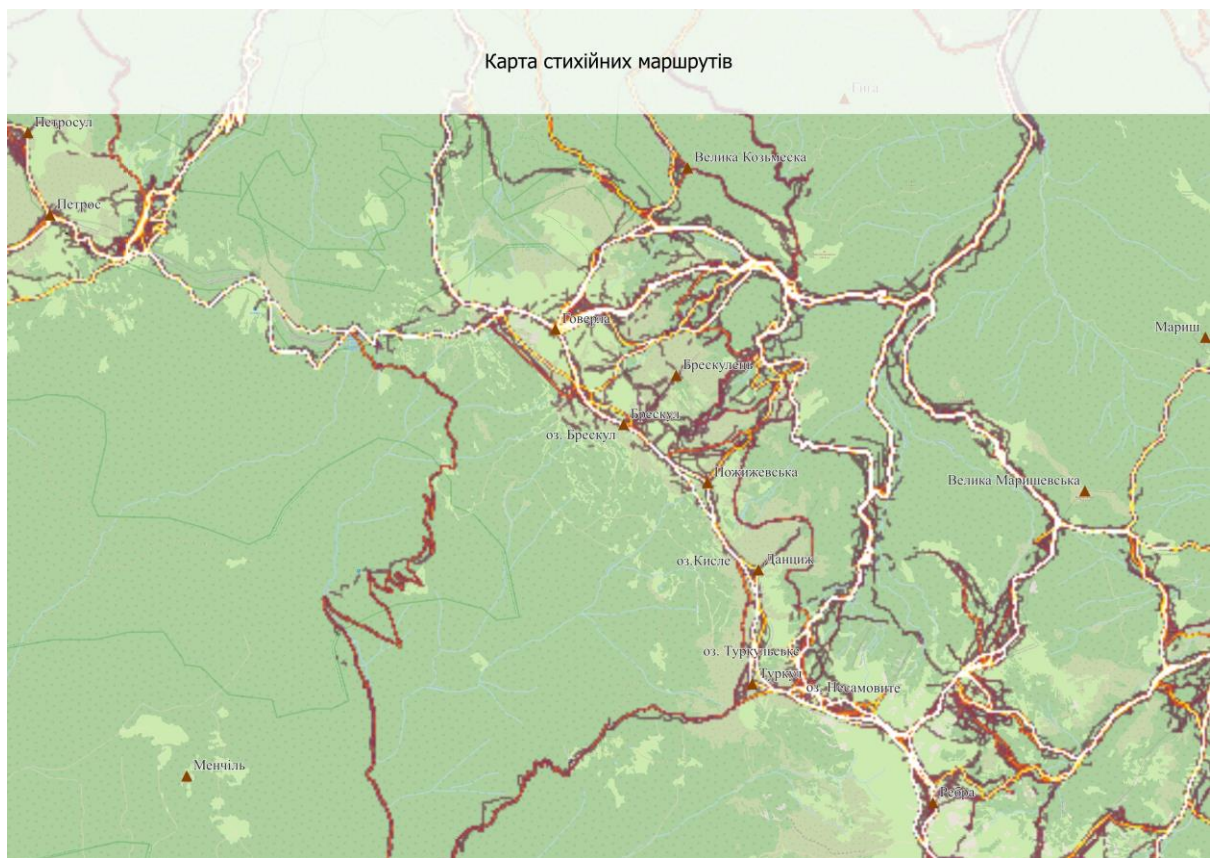


Рис. 4. Карта стихійних маршрутів

Для розуміння реальної картини переміщення рекреантів та **моделювання фактичного просторового розподілу туристів** було використано краудсорсингові геодані платформи Strava (Strava Global Heatmap) [24]. На відміну від офіційних маркованих маршрутів, ця теплова карта акумулює мільйони реальних GPS-треків. У середовищі QGIS цей растровий шар був успішно інтегрований із цифровою моделлю рельєфу. На основі аналізу щільності пікселів, що відповідає яскравості

світіння теплової карти, було виконано екранну векторизацію стихійних стежок. Результати такого моделювання підтвердили масове відхилення туристів від основного маршруту на ділянках "зрізання" серпантинів, зокрема на підйомах до гір Брескул та Данціж. Крім того, зафіксовано формування широких зон витоптування, що сягають 10–15 метрів, у місцях обходу перезволожених ділянок ґрунту.

Особливої уваги під час аналізу потребує улоговина озера Несамовите, яка слугує головним центром тяжіння туристів та місцем неконтрольованої організації кемпінгів. Для кількісної оцінки антропогенного тиску на цей геосайт було застосовано **метод просторової буферизації**. Навколо векторного полігону озера побудували три концентричні буферні зони з радіусами 50, 100 та 200 метрів. Використовуючи інструменти оверлейного перетину (Intersection), дослідники підраховали сумарну довжину стихійних стежок та площу деградованих ділянок (місць встановлення наметів), які потрапляють у кожну із зон. Аналіз чітко засвідчив, що найвища щільність інфраструктурних порушень концентрується саме в межах 50-метрової водоохоронної зони озера. Це створює пряму загрозу змиву оголеного ґрунту та органічних залишків безпосередньо у водойму, що неминуче пришвидшує процеси її евтрофікації, замулення та заболочування [14].

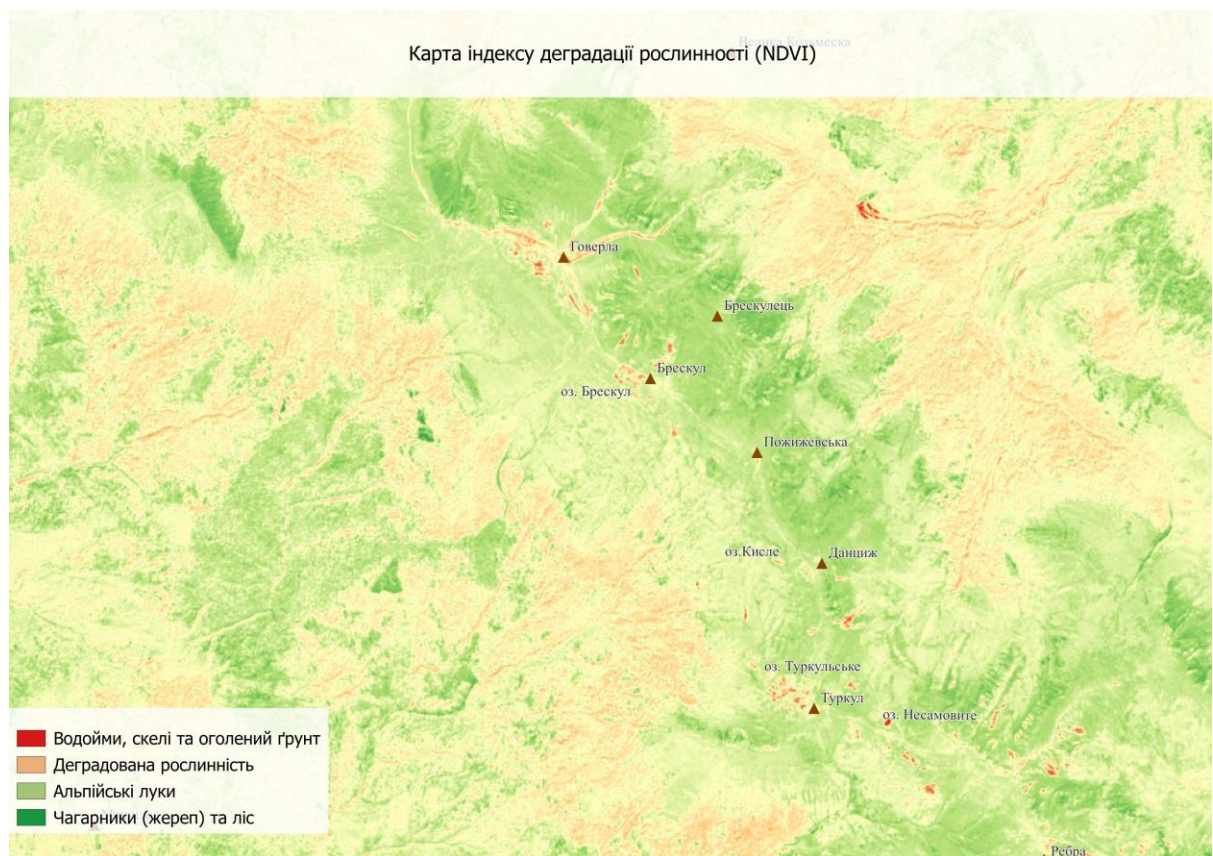


Рис. 5. Карта деградації рослинності

Оскільки першою стадією рекреаційної дигресії гірських ландшафтів є механічне знищення рослинного покриву, що відкриває ґрунт для водної та вітрової ерозії, наступним кроком стала **оцінка деградації рослинності за допомогою вегетаційних індексів (NDVI)**. Для просторової локалізації повністю витоптаних ділянок було залучено багатоспектральні супутникові знімки місії Sentinel-2 (рівень обробки L2A з атмосферною корекцією) за період максимального туристичного навантаження у серпні. У растровому калькуляторі QGIS розраховували нормалізований відносний індекс рослинності за класичною формулою:

$$NDVI = (B08 - B04) / (B08 + B04)$$

де B08 — ближній інфрачервоний канал (NIR), а B04 — червоний канал.

Здорова альпійська рослинність, така як луки чи зарості сосни гірської, активно поглинає червоне світло і відбиває інфрачервоне, тому характеризується

високими показниками індексу (0.6–0.8). Натомість на ділянках оголеного каміння та повністю витоптаного ґрунту вздовж стихійних стежок і в місцях масового кемпінгу біля Несамовитого спостерігається різке падіння значень NDVI до 0.1–0.2. Шляхом рекласифікації отриманого растру було згенеровано Карту деградації рослинного покриву. Завдяки просторовій роздільній здатності у 10 метрів, вона дозволила з високою точністю виділити полігони критичного антропогенного впливу, де природна здатність екосистеми до самовідновлення є повністю вичерпаною.

### 3.4. Оцінка рекреаційної ємності ключових геосайтів маршруту

Логічним завершенням просторово-часового моделювання антропогенного тиску на ландшафти Чорногірського масиву є перехід від фіксації наявних порушень до розрахунку гранично допустимих меж використання території. У геоекологічних дослідженнях цей показник визначається через **рекреаційну ємність ландшафту** — здатність природного комплексу приймати певну кількість відпочивальників без загрози незворотної деградації природних компонентів та зниження естетичної цінності самого об'єкта.

Для об'єктивної оцінки спроможності ключових точок тяжіння (геосайтів) досліджуваного маршруту, з-поміж яких найбільш критичного навантаження зазнає улоговина озера Несамовите, було застосовано трирівневу методологію розрахунку за моделлю Родріго Буллона. Вона передбачає послідовне визначення фізичної, реальної та ефективної (екологічної) ємностей [18].



Рис. 6. Карта зон антропогенного впливу

Першим етапом є розрахунок **фізичної рекреаційної ємності (РСС)**, яка визначає абсолютний максимум кількості людей, що можуть одночасно перебувати на об'єкті суто з огляду на просторові характеристики (доступну площу) та просторові нормативи для однієї особи. Формула розрахунку має такий вигляд:

$$PCC = (S/N) * (T/t)$$

де S — корисна площа геосайту, придатна для рекреації; N — нормативний просторовий ліміт на одного рекреанта (для високогірних заповідних територій еталонним є норматив 20–50 м<sup>2</sup> на одну особу або на один намет у таборі); T — тривалість добової активності геосайту (приймається за 12 годин для літнього сезону); t — середній час перебування одного туриста на об'єкті (2 години для транзитних екскурсантів).

У середовищі QGIS було проведено точне картометричне визначення корисної площі (S) улоговини озера Несамовите. Для цього із загальної площі кару за допомогою растрового калькулятора та інструментів векторного вирізання були повністю виключені непридатні та екологічно вразливі зони: водне дзеркало озера, стрімкі карові стінки з крутизною схилів понад 15° (виявлені під час морфометричного аналізу), а також торфовища та перезволожені ділянки навколо витоків струмків (локалізовані за низькими значеннями індексу NDVI). Чиста придатна площа для короткочасного відпочинку та облаштування стоянок становила приблизно 18500 м<sup>2</sup>. За умови нормативу 50 м<sup>2</sup> на особу, базовий просторовий ліміт (РСС) склав 2220 відвідувань на добу.



Рис. 7. Картосхема ефективної рекреаційної площі урочища озера Несамовите

Наступним етапом є розрахунок **реальної рекреаційної ємності (RCC)**. Оскільки фізична ємність є суто теоретичною і не враховує природні лімітуючі фактори території, для визначення реальної спроможності на базовий показник  $PCC$  накладаються коефіцієнти екологічних та погодних обмежень ( $Cf$ ). Цей розрахунок здійснюється за формулою:

$$RCC = PCC * (1 - Cf_1) * (1 - Cf_2) * (1 - Cf_n)$$

Сам коефіцієнт розраховується за формулою  $Cf = M/L$ , де  $M$  — граничне значення лімітуючого фактора, а  $L$  — загальний обсяг показника. Для Чорногірського високогір'я було враховано два ключові обмеження. Першим є коефіцієнт кліматичного обмеження, який бере до уваги кількість днів із несприятливими погодними умовами у високогір'ї (зливи, шквалистий вітер, туман, грози), коли переміщення туристів стає небезпечним або зводиться до мінімуму. За даними багаторічних спостережень метеостанції «Пожижевська», у

піковий літній період (липень – серпень) кількість таких днів тримається на рівні 20%, тому  $Cf\_1 = 0.20$ .

Другим фактором виступає коефіцієнт ерозійної вразливості ґрунтового покриву, що визначає частку площі геосайту з екстремально низькою стійкістю до витоптування. Оскільки понад 35% площі улоговини навколо озера представлено торф'янисто-глейовими ґрунтами на альпійських луках, які миттєво руйнуються під кроками людей, цей показник приймається за 0.35. Введення цих природних поправок різко скорочує первинну цифру:

$$RCC = 2220 * (1 - 0.20) * (1 - 0.35) = 2220 * 0.80 * 0.65 = 1154 \text{ особи/добу}$$

Фінальним етапом є визначення **ефективної (екологічної) рекреаційної ємності (ЕСС)**. Цей показник відображає реальну кількість відвідувачів, яку заповідна територія може прийняти за умови наявного рівня менеджменту та інфраструктури, адже він безпосередньо враховує спроможність адміністрації парку контролювати туристичний потік (FM). Розрахунок здійснюється за формулою:

$$ЕСС = RCC * FM$$

Показник управління (FM) оцінюється за шкалою від 0 до 1, де одиниця означає ідеальне інфраструктурне облаштування. З огляду на поточний стан маршруту, зокрема відсутність стаціонарних водовідводів, брак інспекторського контролю на місці та відсутність спрофільованих настилів у грязюкових зонах, рівень менеджменту цього геосайту оцінено лише у 0.40. Відтак, фінальна екологічна ємність улоговини озера Несамовите становить:

$$ЕСС = 1154 * 0.40 = 462 \text{ особи на добу}$$

Для потреб нічного кемпінгу, зважаючи на середню площу намету та необхідні санітарні розриви, цей показник трансформується у суворий граничний ліміт — не більше 35–40 наметів одночасно.

Здійснений **порівняльний аналіз** розрахункових лімітів та фактичного навантаження виявив критичний екологічний дисбаланс. Співставлення

отриманого науково обґрунтованого ліміту ( $ECC = 462$  особи/добу) з результатами аналізу теплових карт Strava та експертними оцінками заповідника показує, що у вихідні дні липня та серпня фактична кількість відвідувачів улоговини озера значно перевищує 1200–1500 осіб на добу. Водночас кількість одночасно встановлених наметів у найтепліші вікенди сягає 90–110 одиниць.

Це свідчить про катастрофічне перевищення екологічної ємності ландшафту в 3–3.5 рази. Саме цей математично доведений овертуризм виступає першопричиною утворення виявлених великих плям деградації рослинності (де  $NDVI < 0.2$ ) навколо водойми. Отже, матеріали проведеного аналізу рекреаційної ємності є прямим обґрунтуванням для нагального впровадження жорстких управлінських рішень та інженерної модернізації території, які детально розглядатимуться у наступному розділі роботи.

**Висновки до Розділу 3** Застосування методів геоінформаційного аналізу дозволило перевести дослідження антропогенної трансформації Чорногірського масиву з площини якісних описових оцінок у площину точного просторового моделювання. Інтеграція цифрової моделі висот (Copernicus DEM), краудсорсингових треків переміщення туристів та супутникових знімків (Sentinel-2) у середовищі QGIS дала змогу створити комплексну картографічну модель рекреаційного навантаження.

Проведений морфометричний та оверлейний аналізи підтвердили гіпотезу про те, що найбільший ризик розвитку глибокої лінійної ерозії виникає в місцях неконтрольованого сходження туристів з маркованих маршрутів на схили крутизною понад 15-20 градусів. Водночас аналіз вегетаційного індексу NDVI навколо озера Несамовите локалізував масштабні площі повного знищення рослинного покриву. Отримані аналітичні матеріали та розроблені карти є об'єктивною базою для розробки практичних рекомендацій щодо інженерного облаштування стежок та оптимізації туристичного навантаження на досліджувану територію.

## РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ РЕКРЕАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЧОРНОГІРСЬКОМУ МАСИВІ

### 4.1. Інженерне облаштування та стабілізація туристичних маршрутів

Результати геоінформаційного моделювання, наведені у попередньому розділі, беззаперечно доводять, що пасивні методи охорони природи (зокрема, просте встановлення заборонних інформаційних щитів) в умовах сучасного масового туризму є неефективними. Стратегія збереження Чорногірського масиву має базуватися на активній ревіталізації порушених геокомплексів та превентивному інженерному облаштуванні маршрутів. Головне завдання таких заходів — локалізувати туристичний потік у межах підготовленого коридору і не дати йому розпорошуватися по вразливому альпійському рельєфу.

Спираючись на створені карти ерозійної небезпеки та крутизни схилів, пропонується комплекс інженерних заходів, який має бути чітко диференційований залежно від морфометричних умов конкретної ділянки. Оскільки основним агентом лінійної ерозії на розбитих стежках є поверхневі дощові води, першочерговим завданням стає **управління поверхневим стоком**. На ділянках маршруту, де за даними просторового аналізу крутизна схилу перевищує  $15^\circ$  (зокрема на зтяжних підйомах до гір Брескул та Пожижевська), необхідно перехоплювати воду ще до досягнення нею критичної кінетичної енергії. Для цього передбачено облаштування системи поперечних водовідвідних валів. Їх формують із місцевого каміння або просмолених дерев'яних колод, вкопаних поперек стежки під кутом  $30\text{--}45^\circ$ . Ці вали ефективно перехоплюють потік і скидають воду на узбіччя в непошкоджену рослинність, яка відіграє роль природного фільтра та губки. Відстань між водовідводами розраховується індивідуально залежно від ухилу і в середньому становить 15–20 метрів.

На екстремально стрімких ділянках із крутизною понад  $30^\circ$ , де зафіксовано активні процеси гравітаційного осипання та зсувів (наприклад, карові стінки та

серпантини), звичайних водовідводів виявляється недостатньо. Тут застосовується **терасування та стабілізація ґрунту** за допомогою габіонних конструкцій — міцних сіток, щільно заповнених місцевим уламковим матеріалом (пісковиками). Габіони виконують функцію надійних підпірних стінок, які утримують ґрунт від сповзання і водночас формують безпечні горизонтальні сходинки для руху туристів. Використання саме місцевого каміння замість бетону чи пластику дозволяє цим інженерним спорудам гармонійно інтегруватися в природний ландшафт, не порушуючи естетичної цінності геосайтів [27].

Окремого підходу потребує **локалізація витоптування на перезволожених ділянках**. Як показав оверлейний аналіз експозиції схилів та індексу NDVI, найбільш масштабне площинне розширення стежок (до 10–15 метрів) відбувається на північних схилах та в улоговинах, особливо навколо озера Несамовите. Саме там тривалий час зберігається сніг та виходять ґрунтові води, і туристи, намагаючись обійти грязьові зони, масово знищують альпійські луки. Єдиним дієвим інженерним рішенням у таких випадках є підняття лінії переміщення над рівнем ґрунту шляхом будівництва дерев'яних настилів (екостежок) на гвинтових палях або кам'яних опорах. Це дає змогу повністю припинити механічний тиск на перезволожений ґрунт, зберегти природний гідрологічний режим (вода вільно протікає під настилом) та дозволити деградованій рослинності, зокрема сфагновим мохам, відновитися у тіні під дошками.

Важливу роль відіграє також **облаштування мікроінфраструктури у зонах концентрації рекреантів**, адже стихійні стежки часто виникають через відсутність організованих місць для короткочасного відпочинку. На ключових видових майданчиках, таких як вершини гір чи брівки кару Несамовитого, доцільно створювати спеціальні розширені платформи. Окантовка цих зон великими валунами або дерев'яними поручнями слугуватиме дієвим психологічним бар'єром, що чітко маркуватиме межу та захищатиме вразливі урвища від руйнування.

Застосування всіх описаних методів інженерної стабілізації безперечно вимагає значних фінансових та трудових ресурсів. Проте саме їх впровадження на

критично вразливих відрізках маршруту, локалізованих під час просторового аналізу, дозволить зупинити незворотну деградацію Чорногірського масиву і перевести туристичний потік у стає та контрольоване русло.

## 4.2. Геоінформаційне проектування альтернативних шляхів та перерозподіл туристичних потоків

Як було доведено в попередньому підрозділі, значне перевищення екологічної ємності на ключових ділянках Чорногірського маршруту вимагає не лише пасивних обмежень, а й активного просторового перерозподілу рекреантів. Більшість наявних туристичних стежок масиву формувалися стихійно десятиліттями тому. Вони часто прокладені за принципом найкоротшої відстані — лінійно, «в лоб» по стрімких схилах, що суперечить сучасним стандартам сталого трейлобудування (Trail building).

Для розв'язання цієї проблеми в роботі застосовано алгоритм просторового моделювання найменшої вартості шляху (Least Cost Path analysis) у середовищі QGIS. Цей інструмент дозволяє математично точно прокласти нову траєкторію маршруту, яка буде максимально комфортною для туриста і водночас завдасть мінімальної шкоди ландшафту.

Процес геоінформаційного проектування розпочався зі **створення інтегрованої «Поверхні вартості» (Cost Surface)** — єдиного растрового шару, де кожному пікселю території було присвоєно певний коефіцієнт (вартість) проходження. Чим вища вартість, тим менш бажаним є прокладання стежки через цю ділянку. За допомогою інструменту Raster Calculator було об'єднано два ключові критерії. Першим виступає морфометричний бар'єр на основі цифрової моделі рельєфу, що враховує крутизну схилів. Ділянкам з ухилом від  $0^\circ$  до  $8^\circ$ , які є оптимальними для ходьби, присвоєно найнижчу вартість — 1. Схилам від  $8^\circ$  до  $15^\circ$  встановлено вартість 5, тоді як круті ділянки понад  $15^\circ$  отримали статус абсолютного бар'єра (вартість 100) задля унеможливлення проектування маршруту через зони підвищеного ерозійного ризику. Другим критерієм став біофізичний бар'єр на основі індексу NDVI. Перезволожені торфовища, що деградують найшвидше, та щільні зарості жерепу (сосни гірської) також отримали статус

просторових бар'єрів. Це гарантує, що нова стежка не потребуватиме суцільних санітарних рубок і не перетвориться на болото після першого дощу.

Наступним кроком стало безпосереднє **моделювання оптимальної траєкторії**. Після налаштування поверхні опору дослідники використали алгоритм *r.cost*, що є інтегрованим інструментом геообробки GRASS GIS [26]. Задавши початкову та кінцеву точки (вершину гори Говерла і ділянку озера Несамовите), програма автоматично вирахувала лінію найменшого сумарного опору. На відміну від наявної стихійної стежки, яка піднімається на Говерлу майже вертикально і має глибокі ерозійні рівчаки, згенерована ГІС-моделлю лінія набула форми класичного серпантину. Алгоритм автоматично спроектував плавні траверси схилу, оминаючи локальні мікроулоговини та скельні виступи й стабільно утримуючи середній кут нахилу в межах екологічно безпечних 8–12 градусів.



Рис. 8. Картосхема проектування альтернативного маршруту

Практичне впровадження розроблених геоінформаційних моделей відкриває шлях до реалізації **стратегії перерозподілу туристичних потоків**, зокрема концепції мікродисперсіювання. Створення дублюючих екостежок та прокладання на місцевості спроектованих серпантинів дозволить перевести на них до 60% туристичного трафіку. Завдяки цьому стане можливою ревіталізація території: старі, ерозійно-небезпечні "прямі" підйоми будуть виведені з експлуатації, перекриті фашинними загородженнями та залишені для природного відновлення шляхом задерніння. Крім того, здійснюється ефективне зонування навантаження. На ділянках підходу до озера Несамовите просторове проектування дозволяє розвести потоки на "вхідний" та "вихідний", ліквідувавши ефект зустрічного розходження груп, що залишається головною причиною площинного розширення стежок.

Таким чином, використання аналітичних можливостей QGIS перетворює процес облаштування території з інтуїтивного на науково обґрунтований, забезпечуючи проектування туристичної інфраструктури, що є гармонійно інтегрованою в рельєф Чорногірського масиву.

#### **4.3. Функціональне зонування та просторове управління туристичними потоками**

Інженерне облаштування маршрутів є необхідним, але недостатнім заходом для збереження високогірних ландшафтів. Будь-яка інженерна споруда має свою межу міцності, тому другим ключовим напрямом оптимізації є адміністративне управління самими рекреаційними потоками на основі розрахованої екологічної ємності території.

Базуючись на результатах геоінформаційного аналізу, пропонується впровадити в практику Карпатського НПП модель динамічного функціонального зонування та просторового дисперсіювання (розсіювання) туристів.

Одним із ключових напрямів є **жорстке регулювання кемпінгу в районі озера Несамовите**. Аналіз буферних зон та індексу NDVI виявив катастрофічний рівень деградації рослинності в безпосередній близькості до водойми. Оскільки озеро має льодовикове походження і розташоване у вразливій субальпійській зоні, воно не здатне до швидкої самоочистки [28]. Головною рекомендацією у цьому контексті є повна заборона встановлення наметів та розведення багать у межах усього льодовикового кару озера Несамовите. Натомість необхідно створити альтернативну, офіційно облаштовану зону для кемпінгу нижче по схилу, на межі лісового поясу, де ґрунти є стійкішими до витоπτування, а ліс забезпечує природний захист від вітру. Цю нову локацію варто обладнати стаціонарними місцями для вогнищ, дерев'яними настилами під намети та екотуалетами закритого типу, щоб мінімізувати дискомфорт для туристів від перенесення стоянки. Саму ж територію навколо озера слід перевести у статус зони виключно денного відвідування з можливістю лише транзитного проходу.

Важливим кроком є також **дисперсіювання (розсіювання) туристичних маршрутів**. Аналіз теплової карти Strava показав гіперконцентрацію відвідувачів на кількох магістральних ділянках, як-от маршрут від бази "Заросляк" на Говерлу. Це неминуче призводить до ефекту "пляшкового горла", коли на вузьких стежках

туристи змушені розходитися, інтенсивно витоптуючи узбіччя [24]. Для вирішення цієї проблеми пропонується запровадити систему одностороннього руху на найкрутіших і найпопулярніших ділянках у пікові дні. Наприклад, підйом можна організувати "синім" маршрутом, а спуск — "зеленим", що вдвічі зменшить площу витоптування під час зустрічного розходження груп. Крім того, варто популяризувати серед мандрівників альтернативні, менш відомі маршрути Чорногірського хребта через маркетингові канали парку, щоб ефективно зняти пікове навантаження з Говерли та Несамовитого.

Наступним необхідним заходом виступає **сезонне регулювання або введення "екологічних пауз"**. На основі аналізу карти експозиції схилів було встановлено, що північні схили зберігають сніговий покрив та надмірну зволоженість ґрунту аж до початку літа. Рух туристів по такому перезволоженому ґрунту завдає найбільшої шкоди, перетворюючи стежки на суцільні грязьові потоки. Тому рекомендується запровадити практику гнучких екологічних пауз, що передбачає тимчасове (на 2–3 тижні) закриття певних сегментів маршруту в період активного танення снігу або затяжних злив. При цьому інформація про статус маршрутів має оперативно оновлюватися в режимі реального часу на офіційному сайті парку та на спеціальних інформаційних табло біля підніжжя гір.

Зрештою, значну роль відіграє **інформаційно-психологічне зонування**. Замість стандартних заборонних табличок про штрафи, які відвідувачами часто ігноруються, пропонується активно використовувати методи екологічного нейджингу (підштовхування). Встановлення інформаційних стендів перед ерозійно небезпечними ділянками дозволить наочно пояснити туристам суть проблеми. Завдяки використанню створених під час дослідження карт NDVI та 3D-моделей рельєфу можна доступно продемонструвати, чому саме "зрізання" серпантину на конкретному схилі вбиває рослинність. Такий сучасний підхід значно підвищує рівень екологічної свідомості та стимулює самоконтроль серед відвідувачів [29].

#### **4.4. Перспективи використання БПЛА та краудсорсингових ГІС для сталого екологічного моніторингу**

Запропоновані в попередніх підрозділах заходи інженерного облаштування потребують регулярного контролю їхньої ефективності. Базовий моніторинг за допомогою супутникових знімків середньої роздільної здатності (таких як використаний у роботі Sentinel-2 з пікселем 10x10 м) є дієвим інструментом для оцінки загальної площі деградації рослинності (наприклад, розростання кемпінгів). Проте він не дозволяє фіксувати мікрорельєфні зміни — утворення первинних ерозійних рівчаків шириною 20–50 см, які є найнебезпечнішою стадією руйнування туристичних стежок.

Для переходу від реактивного (ліквідація наслідків) до превентивного (запобігання ерозії) управління територією Чорногірського масиву необхідне впровадження інноваційних методів просторового моніторингу: безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та партисипативного (краудсорсингового) картографування.

**Застосування дронів (БПЛА) для мікоморфометричного моніторингу**  
Використання комерційних дронів, оснащених RGB та мультиспектральними камерами, відкриває можливості для надточного геоінформаційного аналізу найбільш вразливих геосайтів (улоговина оз. Несамовите, підйоми на г. Говерла та г. Брескул).

Перспективним напрямом екологічного моніторингу стає використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що охоплює кілька ключових завдань. Насамперед це **створення надточних цифрових моделей поверхні (ЦМП)**: за допомогою методів фотограмметрії на основі серій знімків з дрона генеруються ЦМП із просторовою роздільною здатністю до 1–5 см на піксель. Це дозволяє адміністрації парку фіксувати найменші міліметрові зміни в глибині ерозійних траншей. На цю базу спирається **волюметричний (об'ємний) аналіз змиву ґрунту**. Проведення регулярних польотів (наприклад, на початку та в кінці

туристичного сезону) над одними й тими ж ділянками дає змогу шляхом віднімання двох ЦМП за допомогою інструменту Raster Calculator у QGIS точно вирахувати об'єм втраченого або переміщеного ґрунту в кубічних метрах. Окрім цього, здійснюється швидка **інспекція інженерних споруд** — дрони дозволяють без додаткового фізичного навантаження на інспекторів оцінювати стан водовідвідних каналів та габіонних конструкцій, оперативно виявляючи місця їхнього замулення чи руйнування.

Враховуючи величезну площу Чорногірського масиву та об'єктивно обмежений штат служби охорони природно-заповідного фонду, надзвичайно ефективним рішенням стає **залучення туристів до моніторингу** через краудсорсингові ГІС. Цей підхід (збір даних натовпом) дозволяє перетворити тисячі відвідувачів на своєрідних "екологічних сенсорів". Впровадження такої концепції передбачає **створення спеціалізованих Web-ГІС додатків** на базі платформ типу ArcGIS Survey123 або QField. Через мобільний застосунок мандрівники зможуть самостійно фіксувати локації екологічних порушень: повалені дерева на стежці, зруйновані маркувальні стовпчики, місця незаконного розведення багать, нові стихійні сміттєзвалища або глибокі грязьові ділянки.

Завдяки **інтеграції фотофіксації з GPS-координатами**, кожне таке повідомлення автоматично отримуватиме точну просторову прив'язку та фотографію проблеми, які в режимі реального часу відображатимуться на інтерактивній карті (дашборді) безпосередньо в офісі парку. Логічним доповненням цієї системи є **безперервний аналіз GPS-треків**. Як доведено у цій роботі, використання відкритих даних на кшталт Strava Global Heatmap є надійним індикатором формування стихійних маршрутів. Постійний моніторинг подібних теплових карт дозволить адміністрації завчасно виявляти місця масового "зрізання" серпантинів і оперативно перекривати їх маркувальними стрічками або фізичними бар'єрами ще до того, як там остаточно зникне дерновий покрив [19].

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання — здійснено комплексну оцінку та просторово-часове моделювання рекреаційного навантаження на геокомплекси Чорногірського масиву з використанням сучасних методів геоінформаційних систем (ГІС) та даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

За результатами проведеного дослідження було встановлено, що в умовах стрімкого зростання неорганізованого туристичного потоку високогірні ландшафти Українських Карпат зазнають інтенсивної рекреаційної дигресії. Оскільки традиційні описові методи екологічного моніторингу виявилися недостатніми для ефективного управління територією, доведено, що інтеграція цифрових моделей рельєфу, краудсорсингових просторових даних та багатоспектральних супутникових знімків у середовищі QGIS є найоптимальнішим підходом для точної локалізації зон ерозійного ризику.

Аналіз природних умов Чорногірського масиву показав, що його альпійський та субальпійський пояси відзначаються найнижчою стійкістю до антропогенного впливу. Короткий вегетаційний період, значна кількість опадів, крутизна схилів та наявність легкорозмивних ґрунтів роблять ці геокомплекси вкрай вразливими до механічного витоптування, яке дуже швидко переростає у потужний площинний змив та глибоку лінійну ерозію. Для дослідження цих процесів на основі глобальної цифрової моделі висот (Copernicus DEM) було згенеровано растрові поверхні крутизни та експозиції схилів. Завдяки застосуванню оверлейного аналізу та зональної статистики вдалося створити Карту ерозійної небезпеки туристичних маршрутів. Вона наочно продемонструвала, що найбільш критичними ділянками, які потребують негайного втручання, є сегменти стихійного "зрізання" серпантинів та прямі підйоми на головний хребет (зокрема на горах Говерла, Брескул та Пожижевська), де крутизна схилу перевищує 15–20 градусів [23].

Окрім того, використання теплової карти Strava Global Heatmap дозволило векторизувати реальну мережу стихійних маршрутів. Застосування методу

буферизації навколо озера Несамовите довело, що максимальна концентрація інфраструктурних порушень та місць несанкціонованого кемпінгу фіксується саме в межах 50-метрової водоохоронної зони. Цей факт додатково підтверджується аналізом вегетаційного індексу (NDVI), розрахованого за супутниковими знімками Sentinel-2, який виявив наявність масштабних ареалів повного знищення рослинного покриву в цих локаціях [24].

Спираючись на отримані просторові дані, було розроблено комплекс практичних заходів щодо інженерної стабілізації маршрутів, чітко адаптований до конкретних морфометричних умов ділянок. Серед іншого запропоновано облаштування поперечних водовідвідних валів на схилах середньої стрімкості, встановлення габіонних підпірних стінок на екстремальних ухилах, а також будівництво піднятих дерев'яних настилів (екостежок) у зонах тривалого перезволоження північних експозицій. Підсумовуючи результати, обґрунтовано нагальну необхідність переходу адміністрації Карпатського НПП до інноваційних методів управління територією. Для цього рекомендовано впровадити регулярний мікроморфометричний моніторинг за допомогою БПЛА задля контролю об'ємів змиву ґрунту, а також активно використовувати партисипативні Web-ГІС додатки, щоб залучати самих туристів до збору актуальних просторових даних про поточний стан маршрутів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hose T.A. European geotourism – geological interpretation and geoconservation promotion fortourists. geological heritage: its conservation and management. Madrid, 2000.

2. Geotourism: the tourism of geology and landscape / ed. by D. Newsome, R. K. Dowling. Goodfellow Publishers, 2010. URL: <https://doi.org/10.23912/978-1-906884-09-3-21> (date of access: 20.05.2026).

3. Культурна спадщина в Атласній геоінформаційній системі сталого розвитку України: Л.Г. Руденко, К.А. Поливач, В.С. Чабанюк та ін./ за ред. Л.Г. Руденка. – 2018. – 172 с.

4. Колтун О.В., Ковальчук І.П. Антропогенна геоморфологія: Навч. посібн.; за ред.проф. І.П. Ковальчука. Львів, Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 194 с.

5. Ковальчук І.П., Дубіс Л. Ф. Сучасна українська геоморфологія: здобутки, проблеми, перспективи (до 70-річчя кафедри геоморфології і палеогеографії ЛНУ імені Івана Франка). Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2021. Вип. 1 (12). С. 179–196.

6. Кравчук Я. Рекреаційна оцінка рельєфу Українських Карпат / Я. Кравчук, Ю. Зінько, В. Брусак, Р. Гнатюк, Д. Кричевська // Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій : збірник наук. праць. – Львів : Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – С. 267–273.

7. Руденко В. П. Довідник з географії природно-рекреаційного потенціалу України / В. П. Руденко. – Київ : Вища школа, 1993. – 315 с.

8. Ковальчук І. П. Актуальні питання динамічної геоморфології Українських Карпат. Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських

Карпат і прилеглих територій: збірник наук. праць (присвячений 100-річчю від дня народження засновника кафедри геоморфології і палеогеографії професора Петра Цися). Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2014. С. 89–97.

9. Стецюк В. В. Основи геоморфології / В. В. Стецюк, І. П. Ковальчук. – Київ, «Вища школа», 2005. – 495 с.

10. Фізична географія України (загальні закономірності природи) : Навчальний посібник. – Суми : Інститут стратегій інноваційного розвитку і трансферу знань, 2022. – 128 с.

11. Кравчук Я. С. Геоморфологія Полонинсько-Чорногірських Карпат / Я. С. Кравчук. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2005. – 300 с.

12. Кравчук Я. С. Рельєф Українських Карпат / Я. С. Кравчук. – Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 1999. – 136 с.

13. Флора і рослинність Карпатського заповідника / [Стойко С.М., Мілкіна Л.І., Тасенкевич Л.О. та ін.]. – К.: Наук. думка, 1982. – 220 с.

14. Нестерук Ю. Рослинний світ Українських Карпат: Чорногора. Екологічні мандрівки / Ю. Нестерук. – Львів: Бак, 2003. – 520 с.

15. Географо-екологічні маршрути Чорногори : навч. посібник / І. М. Рожко, В. П. Матвіїв, В. П. Брусак. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка. – 224 с.

16. Мельник А.В. Українські Карпати: еколого-ландшафтознавче дослідження / А.В. Мельник. – Львів: Логос, 1999. – 286 с.

17. Палієнко В. П. Сучасна динаміка рельєфу України / В. П. Палієнко. – Київ : Наукова думка, 2005. – 268 с.

18. Boullón R. C. Planificación del espacio turístico / R. C. Boullón. – México : Trillas, 1985. – 245 p.

19. Marion J. L. Recreation Ecology Research Findings: Implications for Carrying Capacity and Visitor Use Management / J. L. Marion // Environmental Management. – 2016. – Vol. 58, No. 3. – P. 415-428.

20. Leung Y.-F. Sustainable Tourism and Natural Resource Management / Y.-F. Leung, J. L. Marion // Journal of Forestry. – 2000. – Vol. 98, No. 10. – P. 16-21.
21. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. URL: <http://qgis.org>
22. Copernicus Open Access Hub. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) Level-2A Data. URL: <https://scihub.copernicus.eu/>
23. Copernicus Digital Elevation Model (COP-DEM), 30m resolution. European Space Agency, 2021. URL: <https://spacedata.copernicus.eu/>
24. Strava Global Heatmap. Strava, Inc., 2024. URL: <https://www.strava.com/heatmap>
25. OpenStreetMap contributors. Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>. URL: <https://www.openstreetmap.org>
26. GRASS Development Team. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software, Version 7.8. Open Source Geospatial Foundation, 2023. URL: <https://grass.osgeo.org>
27. Науково-методичні засади реформування рекреаційної сфери / Кравців В.С та ін. Львів : НАН України, 1999. 78 с.
28. Закон України «Про природно-заповідний фонд України» від 16.06.1992 № 2456-XII (із змінами та доповненнями). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12>
29. Проект організації території Карпатського національного природного парку, охорони, відтворення та рекреаційного використання його природних комплексів і об'єктів. Яремче, 2012.