

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

**Географічний факультет
кафедра географії України та регіоналістики**

ЛАВИНОНЕБЕЗПЕЧНІ РАЙОНИ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

**Кваліфікаційна робота
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)**

Виконала:

студентка 4 курсу, 407 групи

Борчук Інна Сергіївна

Керівник:

кандидат географічних наук,

доцент **Пасічник М.Д.**

До захисту допущено

на засіданні кафедри

протокол №_____ від _____ 2025 р.

Зав. кафедрою _____ проф. Костащук І.І.

Чернівці — 2025

АНОТАЦІЯ

Борчук Інна Сергіївна

*Здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
галузі знань 10 – Природничі науки спеціальності 103 – Науки про Землю
ОПП «Гідрометеорологія»
кафедри географії України та регіоналістики
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
м. Чернівці, Україна*

ЛАВИНОНЕБЕЗПЕЧНІ РАЙОНИ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

Анотація. Дипломна робота присвячена вивченню просторового розподілу лавинної небезпеки в межах двох гірських масивів Українських Карпат — Чорногори та Горган. Метою дослідження є виявлення потенційно небезпечних схилів, які характеризуються підвищеним ризиком сходження лавин, із застосуванням сучасних геоінформаційних технологій. В основі дослідження лежить використання цифрової моделі рельєфу SRTM, обробленої у хмарному середовищі Google Earth Engine (GEE), що дозволяє ефективно аналізувати великі обсяги геоданих без використання локальних обчислювальних ресурсів.

У процесі аналізу було обчислено крутизну схилів (slope), експозицію (aspect) та абсолютну висоту (elevation). На основі отриманих показників розроблено умовну класифікацію лавинної небезпеки за трьома рівнями: низький (схили $<25^\circ$), середній ($25\text{--}35^\circ$) та високий ($>35^\circ$, за умови північно-східної, східної або південної експозиції та висот понад 1200 м). Для кожного з регіонів була побудована тематична карта зонування ризику з урахуванням рельєфу (hillshade), що дозволило візуально виділити гірські форми та покращити читаємість карти.

Згенеровані результати були експортовані у форматі GeoTIFF і

опрацьовані у QGIS для побудови картографічних матеріалів, придатних для друку та подальшого аналізу. Отримані карти є важливим джерелом для моніторингу лавинної небезпеки, планування господарської діяльності в гірських районах, а також можуть використовуватись у системах попередження та управління ризиками надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: лавинна небезпека, Горгани, Чорногора, цифрова модель рельєфу, Google Earth Engine, геоінформаційні системи, QGIS.

ABSTRACT

Abstract. The thesis is dedicated to the spatial analysis of avalanche hazard within two mountain ranges of the Ukrainian Carpathians — Chornohora and the Gorgany. The aim of the research is to identify potentially dangerous slopes that are characterized by an increased risk of avalanche occurrence, using modern geoinformation technologies. The methodology is based on the processing of the SRTM digital elevation model in the cloud-based environment of Google Earth Engine (GEE), which enables efficient analysis of large geospatial datasets without relying on local computing power.

The analysis included the calculation of slope steepness, aspect, and elevation. Based on these parameters, a conditional classification of avalanche risk was developed with three levels: low (slope $<25^\circ$), moderate ($25\text{--}35^\circ$), and high ($>35^\circ$, for NE–S exposures and elevations above 1200 m). For each region, a thematic avalanche zoning map was constructed, incorporating hillshade relief to enhance topographic perception and visual clarity.

The generated results were exported in GeoTIFF format and further processed in QGIS to produce map materials suitable for printing and analysis. The resulting maps are a valuable tool for avalanche hazard monitoring, land use planning in mountainous regions, and can be used in emergency risk management and prevention systems.

Keywords: avalanche hazard, Gorgany, Chornohora, digital elevation model, Google Earth Engine, geographic information systems, QGIS.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

I.С. Борчук

Зміст

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ УМОВИ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ	7
1.1. Фізико географічна характеристика	7
1.2. Геологічна будова	8
1.3. Сніговий покрив	9
1.4. Клімат	10
1.5. Гідрологічні умови, рослинність та ґрунтовий покрив	11
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ЛАВИН ТА ФАКТОРИ НЕБЕЗПЕКИ	13
2.1. Природа виникнення лавин	13
2.2. Класифікація лавин	14
2.3. Метеорологічні та геоморфологічні умови формування лавин	15
2.4. Сучасний стан лавинної небезпеки в Українських Карпатах	17
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МАСИВІВ ГОРГАНИ ТА ЧОРНОГОРА НА ОСНОВІ СТВОРЕНИХ КАРТ В GOOGLE EARTH ENGINE	20
3.1. Морфометричні характеристики рельєфу масиву Горгани	21
3.2. Морфометричні характеристики рельєфу масиву Чорногори	24
3.3. Просторовий аналіз снігового покриву в Горганах та Чорногори (за даними супутника MODIS)	28
3.4. Порівняльний аналіз снігового покриву на масивах Горгани та Чорногора за 2023-2025 роки	31
РОЗДІЛ 4. ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ РИЗИКІВ У ЛАВИНОНЕБЕЗПЕЧНИХ РАЙОНАХ ГОРГАН ТА ЧОРНОГОРА	41
4.1. Систематичний моніторинг снігових умов	41
4.2. Інженерні та природоохоронні заходи	42
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	48

ВСТУП

Актуальність. Карпатський регіон України є унікальним природним середовищем із складним рельєфом, різноманітних кліматом та активними геоморфологічними процесами. Серед них особливе місце займають лавини – стихійне явище, що несе потенційну загрозу для екосистем, так і для життя та безпеки людей. В умовах зростання туристичної активності в гірських районах проблема лавинної небезпеки набуває особливої актуальності.

Українські гори, зокрема такі високогірні райони як Чорнога та Горгани, належать до зон підвищеного лавинного ризику. В цих масивах спостерігаються сприятливі умови для формування лавин: круті схили, значні снігові накопичення та складні метеорологічні умови. Зважаючи на це, дослідження лавинної небезпеки в даному регіоні є не лише науково важливо, а й практично необхідним.

Мета дослідження. Метою цієї дипломної роботи є вивчення лавинонебезпечних регіонів Українських Карпат, аналіз їх фізико-географічних особливостей, а також створення картографічних матеріалів, що відображають потенційно небезпечні зони.

Завдання:

1. Охарактеризувати природні умови формування лавин;
2. Проаналізувати лавинну небезпеку у ключових гірських районах;
3. Здійснити картографічний аналіз лавинонебезпечних територій;
4. Запропонувати рекомендації щодо зниження ризиків сходження.

Об'єкт дослідження – Українські Карпати.

Предмет дослідження – лавини в Українських Карпатах.

Методи дослідження. Опис, порівняння, аналіз та класифікація.

РОЗДІЛ 1. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ УМОВИ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

1.1. Фізико географічна характеристика

Українські Карпати є частиною великої гірської системи Східної Європи, що простягається дугоподібно з північного заходу на південний схід. Вони охоплюють південно-західні частини чотирьох областей: Львівської, Івано-Франківської, Закарпатської та Чернівецької. Загальна протяжність українського відтинку Карпат становить близько 280 км, а середня ширина – близько 100 км. Їх площа в межах України сягає приблизно 24,5 тис. км².

Географічно Українські Карпати поділяються на кілька морфоструктурних регіонів: Зовнішні Карпати, Вододільно-Верховинські Карпати, Центральні або Внутрішні Карпати, серед яких особливе значення має гірський масив Чорногора. Цей масив є найвищим у межах Українських Карпат, його вершина – гора Говерла – досягає висоти 2061 м над рівнем моря. Чорногора вирізняється порівняно молодим віком рельєфу, значними ухилами схилів і великою кількістю лавинонебезпечних ділянок, що обумовлює її актуальність для дослідження.

На території Чорногори сформовано складну вертикальну поясність природних умов, що охоплює передгір'я, нижнє гір'я, середньогір'я і високогір'я з чітко вираженими відмінностями у кліматі, рослинності, сніговому покриві. Ці відмінності відіграють суттєву роль у формуванні та спрацюванні лавин

Важливо зазначити, що в межах Чорногори активно функціонують геоморфологічні процеси, зокрема ерозія, денудація, зсуви, соліфлюкція та нівальні явища, які впливають на лавинну небезпеку. Схили мають крутизну, що часто перевищує 30°, а в поєднанні з кліматичними чинниками та гідрометеорологічними умовами створюються передумови для сходження лавин.

1.2. Геологічна будова

Українські Карпати є частиною Альпійської складчастої системи, яка формувалася внаслідок тривалих геотектонічних процесів, що охоплюють мезозойську та кайнозойську епохи. Їхня структура складна і поділяється на декілька тектонічних зон, серед яких особливу увагу привертають Скибова зона та Внутрішня флішева зона, оскільки саме в їх межах розташовані два ключові об'єкти дослідження — масиви Горгани та Чорногора. Горгани розташовані у межах Скибової тектонічної зони, яка характеризується флішевими відкладами крейдового та палеогенового віку.

Геологічно ця зона представлена переважно чергуванням пісковиків, алевролітів та аргілітів, які відзначаються високою щільністю, стійкістю до вивітрювання та формують круті, масивні схили з численними кам'янистими розсипами. Саме геологічна основа зумовлює складний, ерозійно-різкочленований рельєф Горган з глибокими ущелинами та стрімкими схилами, що створюють сприятливі умови для снігозатримання та лавиноутворення. Часто в районі Горган спостерігається поєднання крутизни понад 30° з обмеженим рослинним покривом, що лише підсилює ризик сходження лавин.

Масив Чорногора, натомість, належить до Внутрішньої зони Карпат і характеризується наявністю древніх кристалічних порід — гнейсів, кристалічних сланців, а також інтрузивних порід. Це найвищий масив Українських Карпат, що включає вершини понад 2000 м н.р.м., зокрема Говерлу (2061 м). Геологічна будова Чорногори відіграє ключову роль у формуванні рельєфу альпійського типу з чітко вираженими гребенями, крутими схилами та ерозійними долинами. Тектонічні порушення й тріщини в кристалічному підґрунті сприяють накопиченню снігових мас та підвищують ризик формування лавинних осередків.

Таким чином, геологічна будова як Горган, так і Чорногори, є визначальним фактором у формуванні сучасного рельєфу і безпосередньо впливає на поширення лавинонебезпечних ділянок. Ці особливості

враховуються при просторовому аналізі лавинної небезпеки та побудові відповідних карт ризику.

1.3. Сніговий покрив

Сніговий покрив є одним з основних чинників, що визначає лавинну небезпеку в гірських регіонах. У межах Українських Карпат, зокрема в масивах Чорногора та Горгани, сніговий покрив має значну просторову та часову мінливість, зумовлену орографією, висотою, кліматичними умовами та експозицією схилів. Саме ці характеристики снігового покриву формують передумови до накопичення критичних об'ємів снігу, його нестабільності та подальшого сходження лавин.

У масиві Чорногора сніговий покрив утворюється переважно у листопаді та утримується до квітня-травня. Найбільша висота снігового покриву фіксується у січні-лютому, коли вона може перевищувати 150–200 см у високогір'ї. В окремі зими у западинах та на навітряних схилах північно-східної експозиції потужність снігу може сягати понад 3 метри. Висока тривалість утримання снігу (120–160 днів) обумовлює значне навантаження на схили та створює потенційно лавинонебезпечні умови.

У Горганах сніговий покрив зазвичай формується з кінця листопада і зникає у березні-квітні. Через відносно менші висоти масиву (до 1600 м) середня висота снігового покриву тут становить 70–120 см. Однак завдяки складній орографії та численним улоговинам, де сніг акумулюється, також можуть утворюватися лавинонебезпечні осередки. Особливо це стосується крутих схилів із кутом понад 30°.

Додатковим джерелом інформації про сніговий покрив виступають супутникові дані (наприклад, MODIS), які дозволяють аналізувати просторову динаміку снігового покриву у великому часовому діапазоні. Ці дані використовуються в роботі для порівняння середньозимових умов у Чорногорі та Горганах за останні роки, що допомагає виявити сезонні аномалії та області із стабільним снігозатриманням.

Таким чином, характеристики снігового покриву є ключовим фактором у прогнозуванні лавинної небезпеки. Його глибина, структура, тривалість утримання та взаємодія з рельєфом напряду впливають на ймовірність формування лавин. Комплексний аналіз цих показників дозволяє виявити критичні ділянки на карті та сформувати основу для ефективного зонування небезпеки.

1.4. Клімат

Клімат є одним із головних природних чинників, що формують умови снігозатримання, стійкість снігового покриву та, відповідно, лавинну небезпеку в гірських районах. Українські Карпати характеризуються помірно континентальним кліматом із чітко вираженою вертикальною зональністю. З підняттям у висоту температури знижуються, а кількість опадів зростає, що суттєво впливає на формування снігового покриву.

Середньорічна температура повітря на висотах до 1000 м становить +6...+8 °С. У межах висот 1500–2000 м, характерних для масивів Чорногора та Горгани, температура знижується до +2...+4 °С. У зимовий період середньодобові температури стійко утримуються нижче 0 °С, що створює умови для формування й тривалого збереження снігового покриву. Найнижчі температури спостерігаються у січні — іноді до -20 °С і нижче у високогір'ї.

Річна кількість опадів у Карпатах значна й зростає з висотою: від 800–1200 мм на передгір'ї до понад 1600 мм у високогір'ї. Близько 40% цих опадів випадає у холодний період року у вигляді снігу. Особливо інтенсивні снігопади можливі у січні–березні, що збільшує ризики накопичення нестійких снігових шарів на крутих схилах.

У масиві Чорногора сніговий покрив формується зазвичай у листопаді та зберігається до квітня або навіть початку травня. Тривалість снігозатримання становить 120–160 днів. У Горганах, через дещо нижчу абсолютну висоту, сніг утримується в середньому 100–140 днів. Проте

складний рельєф із численними улоговинами сприяє локальній акумуляції снігу навіть при загалом меншій кількості опадів.

Крім атмосферних опадів, важливу роль відіграють вітрові процеси, які переносять сніг з гребенів на підвітряні схили, утворюючи снігові карнизи та зони небезпечного перевантаження. Це особливо характерно для південної та східної експозиції, яка часто поєднується з крутизною понад 30° — однією з головних умов для лавиноутворення.

Отже, кліматичні умови, зокрема кількість опадів, температура повітря та тривалість зимового періоду, є базовими чинниками при аналізі лавинної небезпеки в Українських Карпатах. Їх детальне врахування дозволяє здійснити ефективне зонування території та побудову прогнозних моделей ризику.

1.5. Гідрологічні умови, рослинність та ґрунтовий покрив

Природні умови Українських Карпат формуються під впливом тісної взаємодії гідрологічних, геоботанічних і ґрунтових факторів. Для повноцінного розуміння особливостей лавинної небезпеки у масивах Чорногора та Горгани необхідно враховувати не лише рельєф і клімат, а й типи ландшафтного покриву, вододільну структуру та водно-балансові характеристики.

Гідрологічно Карпати є вододілом між басейнами Дністра та Тиси. Регіон характеризується густою гідрографічною мережею, зокрема численними гірськими річками, які мають стрімкі схили та глибокі долини. У межах Чорногори найважливішими водотоками є річки Прут, Білий Черемош, Чорний Черемош, а в Горганах — Бистриця Надвірнянська, Бистриця Солотвинська та їх притоки. Формування водного стоку в зимово-весняний період значною мірою залежить від інтенсивності сніготанення, що безпосередньо пов'язано з характеристиками снігу.

Ландшафтне покриття гірських масивів також відіграє вагомий роль у процесах снігозатримання та лавиноутворення. У межах висот до 1000–

1200 м переважають букові, дубово-букові та ялицево-смерекові ліси. У Горганах типово поширені смерекові ліси, які вкривають значні площі на північних та західних схилах. У Чорногорі значну частку займають субальпійські лугові комплекси, гірські полонини, кам'янисті осипища та пояси криволісся, які змінюють лісову рослинність на висотах понад 1500 м.

Ґрунтовий покрив також має значення у контексті лавинної небезпеки. На нижніх схилах поширені буроземи, дерново-підзолисті ґрунти, а у високогір'ї — гірсько-лугові, торф'янисті та кам'янисто-скелетні ґрунти з низькою водопроникністю. На крутих схилах з неглибоким шаром ґрунту та переважанням скельних порід спостерігається підвищений ризик ерозійних процесів, зсувів, а також формування лавинних осередків. Волога, накопичена в ґрунтах після танення снігу, може зменшувати їхню стійкість, особливо при весняному водопіллі.

У поєднанні з геоморфологічними умовами, гідрологічні, біотичні та ґрунтові чинники формують комплексну природну основу, яка визначає просторову схильність території до лавинонебезпечних процесів. Їх облік є обов'язковим при створенні інтегрованих карт ризику, прогнозуванні паводків та розробці природоохоронних заходів у гірських районах.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ЛАВИН ТА ФАКТОРИ НЕБЕЗПЕКИ

2.1. Природа виникнення лавин

Лавини – це раптове сходження маси снігу по схилу під дією сили тяжіння. Це одне з найбезпечніших явищ у гірських регіонах, здатне завдати значної шкоди природному середовищу, інфраструктурі, а також становити загрозу для життя людей.

Основною причиною виникнення лавин є нестабільність снігового покриву, яка зумовлена сукупністю природних факторів. Найчастіше лавини виникають після рясних снігопадів, відлиг, різких перепадів температури або сильного вітру, який формує так звані снігові карнизи.

Лавини мають три основні характеристики: початкову зону, лавинну доріжку та зону сходу. Вони сходять зі стартової зони, найчастіше це найнестабільніша ділянка гори і, як правило, досить високо. Після сходу лавини великі галявини або відсутні жолоби дерев дають підказки щодо того, як і куди рухалась лавина.

Фактори лавинноутворення поділяються на постійні, тобто, які не змінюються в часі та змінні. Постійні фактори - це ті, що характеризують лавиноутворювальний рельєф, змінні - ті, що зумовлюють утворення і розвиток снігового покриву. Рослинний покрив може сприяти як лавиноутворенню, так і снігозатриманню на схилах. Сніг утримується на схилах завдяки силі тертя (її величина залежить від ряду факторів, зокрема від вологості снігу та крутизни схилів). Фізика процесу проста: сходження лавини відбувається тоді, коли сила тиску снігової маси починає перевищувати силу тертя.

Точної причини чому виникають лавини немає. Довгий час вважалося, що через відлуння людського голосу в горах може збити достатньо снігу, щоб почалась лавина. Подібним чином ще вважали, що вага людини також здатна спричинити сходження лавини. Однак з наукової точки зору, на цей

процес діє багато екологічних факторів.

Сніговий покрив може складатись з кількох шарів, кожен з яких має різні фізичні властивості. Якщо між цими шарами виникає слабкий зв'язок, наприклад, через наявність льодової кірки або тонкого шару пухкого снігу, це створює потенційну зону розриву.

Залежно від типу снігу та умов формування, лавини можуть відрізнятися за обсягом, швидкістю та типом руху. Середня швидкість лавини в Українських Карпатах коливається від 20 до 60 км/год, хоча й в деяких випадках може досягти і понад 100 км/год.

Лавини найчастіше сходять на схилах крутизною від 25° до 45° , причому найнебезпечнішими є саме схили 30° - 40° . Також важливу роль відіграє експозиція схилу – північні, північно-східні та східні схили частіше піддаються лавинному ризику, оскільки на них довше зберігається нестабільний сніг.

2.2 Класифікація лавин

Для кращого розуміння природи лавин і розробки заходів безпеки важливо мати системну класифікацію цих явищ. Беручи до уваги генетичні типи лавин, які фіксуються сніголавинними станціями в межах Українських Карпат фіксують сходження лавин таких класів:

- ❖ сингенетичні – лавини, які сходять через збільшення сили, яка зрушує зі схилу сніговий покрив, внаслідок збільшення висоти цього покриву.
- ❖ епігенетичний – лавини, викликані зменшенням сил, які утворюють сніговий покрив на схилі.
- ❖ полігенетичні – лавини, які викликані сукупністю кількох явищ.

Окрім цього, лавини також класифікують залежно від типу снігу, способу формування, масштабом, механізмом утворення, формою руху, тощо. За типом снігового покриву розрізняють шарові або пластові, пухкі лавини та льодово-снігові лавини. Перші виникають при порушенні

стабільності окремого снігового шару, що лежить на слабкій поверхні. Пухкі лавини формуються з пухкого та не ущільненого снігк, зазвичай після сильного снігопаду. Саме під часу руху вони набирають масу. Льодово-снігові складаються зі снігу та льоду, вони часто пов'язані з обвалами частин льодовиків. Найпоширеніший тип лавин у Карпатах – шарові.

За механізмом утворення виділяють тільки два типи лавини: сухі та вологі. Вологі лавини – утворюються під час відлиги або дощу, в цей час сніг стає насиченим вологою. Такі лавин доволі повільні, всього до 60 км/год, проте мають велику руйнівну силу через свою масу. Сухі лавини – формуються при низьких температурах, коли вміст вологи навпаки – не дуже високий. Ці лавини характеризуються високою швидкістю – майже до 300 км/год. Вони несуть за собою величезну пилову хмару та об'єм кінетичної енергії.

2.3. Метеорологічні та геоморфологічні умови формування лавин

Формування лавин у гірських умовах – результат складної взаємодії атмосферних, гідрологічних та рельєфних чинників. Особливо це актуально для Карпатського регіону, де поєднання різких кліматичних змін і складного рельєфу створює сприятливе середовище для виникнення лавин. Для прогнозування лавинонебезпечних ситуацій важливо мати чітке розуміння

Формування лавин є результатом складної взаємодії метеорологічних та геоморфологічних чинників, кожен з яких здатен значною мірою впливати на стійкість снігового покриву. У контексті української частини Карпат, зокрема в межах масиву Горгани, ці фактори набувають особливого значення через специфіку рельєфу, кліматичних режимів та просторової неоднорідності снігових процесів.

Крутизна схилів виступає основним геоморфологічним параметром, що визначає потенційну лавинонебезпечність. Згідно з численними

дослідженнями (Білецький, 2015; Семенов, 2020), лавини найчастіше формуються на схилах з ухилом $28\text{--}45^\circ$, при цьому в масиві Горгани найбільша щільність лавинних точок спостерігається на ділянках з крутизною понад 35° . На менш крутих схилах сніг не досягає критичної маси для самостійного зсуву, а на надто крутих – не накопичується.

Експозиція схилів визначає інсоляційний режим і, відповідно, температурну динаміку снігового покриву. Південні та південно-західні експозиції характеризуються інтенсивним сонячним опроміненням, що зумовлює активні процеси танення, підвищення вологості снігу та ймовірність утворення вологих лавин. На північних схилах, де переважає тіньовий режим, довше зберігається снігова стабільність, однак утворення фірнових шарів і глибинних слабких прошарків значно підвищує ризик шарових (пластових) лавин.

У межах Горган важливе значення має морфометрична структура: значні перепади висот, круті скельні виступи, улоговини, кулуари та обривисті ділянки формують потенційні лавинозбірні зони. Глибокі карстові ніші та рельєфні форми, притаманні Горганам, акумулюють значні маси снігу, які при зміні термічного режиму швидко переходять у нестійкий стан.

Ключовими метеофакторами, що впливають на лавиноутворення, є: тип і кількість опадів, температурні коливання, швидкість вітру, вологість повітря та сонячна інсоляція. Інтенсивні снігопади (>30 мм/добу), які супроводжуються поривчастим вітром, створюють критичне навантаження на сніговий профіль. Особливо небезпечними є снігопади після тривалих морозів, коли утворюються тверді базальні шари, а свіжий сніг формує нестійкі надшарування. Вітровий перенос снігу викликає утворення снігових карнизів, щільних плит, підвітряних заносів – типових для підковоподібних цирків Горган.

Температурні флуктуації – ще один вирішальний чинник. Добові переходи через 0°C сприяють формуванню льодових кірок і зон

підповерхневого танення, де накопичується вода. Це, в свою чергу, призводить до зниження зчеплення між шарами та активації зсувів. Заданими УкрГМЦ, у лютому–березні в регіоні Горган реєструється найвищий рівень лавинної активності, що корелює з весняним потеплінням та аномальними опадами.

Сонячна інсоляція особливо впливає на лавини в другій половині зими. Умови часткової метаморфізації снігу та утворення фірнових кірок є типовими для відкритих високогірних схилів, де різниця між денними і нічними температурами досягає 10–15 °С.

Важливо розуміти, що лавинна небезпека виникає не як наслідок одного чинника, а в результаті взаємодії кількох несприятливих умов. Наприклад, снігопад при сильному вітрі на південно-східному схилі з крутизною 38° після періоду морозів створює критичну комбінацію. У випадку Горган такі умови найчастіше спостерігаються в межах районів Довбушанки, Сивулі, Яйка Ілемського та Синяка, що підтверджується польовими даними та супутниковим моніторингом.

Таким чином, для цілісного аналізу лавинної небезпеки в Карпатах доцільно застосовувати геоінформаційні технології, які дозволяють інтегрувати рельєфні моделі, кліматичні дані та спостереження з лавинних станцій у єдину просторово-аналітичну систему.

2.4. Сучасний стан лавинної небезпеки в Українських Карпатах (на прикладі масиву Чорногора та Горгани)

Проблематика лавинної небезпеки в Українських Карпатах набуває особливої актуальності в контексті зростаючої туристичної активності, кліматичних змін і загального підвищення антропогенного навантаження на гірські екосистеми. Серед усіх лавинонебезпечних регіонів Карпатського ареалу, масив Чорногора посідає одне з провідних місць за кількістю зареєстрованих сходжень лавин та потенційною загрозою для людської діяльності.

Чорногора є найвисокогірнішим масивом Українських Карпат, з абсолютними висотами понад 2000 м, протяжними схилами з крутизною 30–45° та характерною орографічною структурою у вигляді паралельних хребтів, урвищ і циркових форм рельєфу. Такі умови сприяють стабільному накопиченню снігу в зоні лавиноутворення, а також розвитку як сухих, так і вологих лавин залежно від метеорологічних умов.

Згідно з даними Українського гідрометеорологічного центру (УкрГМЦ), у Чорногорі щорічно реєструється від 20 до 50 лавин різної інтенсивності, при цьому найбільша активність припадає на період з кінця січня до середини березня. Серед факторів, що сприяють лавиноутворенню, можна виокремити часті відлиги, значні обсяги снігопадів (до 80–100 мм на добу у рідкісних випадках), сильний вітер, що формує нестійкі снігові плити та карнизи.

У структурі лавин переважають шарові (плитові) лавини, що виникають внаслідок розриву слабкозв'язаних снігових шарів. Вони спостерігаються переважно на схилах південної та південно-східної експозиції, зокрема в районах вершин Піп Іван, Бребенескул та Гутин Томнатик. Вологі лавини, хоча й менш поширені, мають значно вищу руйнівну силу через велику густину й пластичність снігового матеріалу.

Особливо небезпечними є лавини, які сходять у напрямку туристичних маршрутів і об'єктів інфраструктури – таких як притулок під Піп Іваном, ділянки зимових переходів у районі озера Несамовите, а також райони між Говерлою та Петросом. Прецеденти із загибеллю туристів (зокрема випадки 2010, 2013 та 2021 років) свідчать про потребу у системному підході до моніторингу та попередження лавинної небезпеки.

Останні роки характеризуються певними змінами у динаміці лавинної небезпеки, зокрема через зміну режиму випадання опадів та коливання температурного фону, що обумовлені глобальними кліматичними трендами. У дослідженнях Лисенка (2022) зазначається, що у високогір'ї Карпат спостерігається тенденція до більшої частотності переходів через

0 °C у зимовий період, що значно знижує стабільність снігового покриву.

Таким чином, лавинна небезпека на території Чорногірського масиву є системним і довготривалим природним процесом, що має бути об'єктом постійного моніторингу. Аналіз умов формування лавин, їхньої просторової локалізації та динаміки у поєднанні з супутниковими методами, зокрема Google Earth Engine, дозволяє оперативно оцінювати стан снігового покриву та виділяти потенційно небезпечні зони.

У наступних розділах буде представлено результати аналізу морфометричних характеристик рельєфу в межах Чорногірського масиву, а також тематичні карти, які дозволяють візуалізувати найбільш вразливі до лавин ділянки.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МАСИВІВ ГОРГАНИ ТА ЧОРНОГОРА НА ОСНОВІ СТВОРЕНИХ КАРТ В GOOGLE EARTH ENGINE

У рамках даного дослідження лавинної небезпеки в межах гірського масиву Горгани було застосовано інструменти дистанційного зондування Землі, цифрового моделювання рельєфу та хмарних обчислювальних платформ. Основним інструментом для збору, обробки та візуалізації просторових даних виступила система Google Earth Engine (GEE), яка дозволяє ефективно інтегрувати великі масиви супутникових та кліматичних даних, виконувати їх обробку в реальному часі та створювати тематичні карти.

Дослідження охоплювало територію центральної частини масиву Горгани, яка характеризується високою абсолютною та відносною висотою, крутизною схилів та наявністю лавинонебезпечних форм рельєфу.

Географічні межі регіону дослідження були визначені на основі створеного користувацького полігону (shapefile), сформованого відповідно до гіпсометричних і морфологічних меж Горган.

У процесі дослідження було використано такі дані та продукти:

- Цифрова модель висот SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільністю 30 м, що забезпечує деталізоване уявлення про рельєф та використовується для генерації морфометричних показників: крутизни, експозиції, абсолютної висоти.

- Супутникові дані MODIS (MOD10A1) для оцінки динаміки снігового покриву на щоденній основі з просторовою роздільністю 500 м.

- Картографічні масиви векторних даних, зокрема адміністративні межі, річкову мережу та географічні об'єкти, були використані для уточнення локалізації результатів і оформлення карт.

Обробка даних відбувалась через спеціально розроблені скрипти на мові JavaScript у середовищі GEE. Результати обчислень експортувалися у форматах GeoTIFF, PNG та CSV для подальшого аналізу.

Кожен тематичний шар (крутизна, експозиція, висота, сніговий покрив, лавинна небезпека) був проаналізований окремо, з подальшою інтеграцією в комплексну оцінку. Додатково було створено теплові карти просторової концентрації лавинних подій та здійснено візуалізацію їхньої динаміки у вигляді анімацій.

Таким чином, застосована методика дозволяє забезпечити високоточну, просторово-деталізовану оцінку лавинної небезпеки із використанням найсучасніших цифрових та супутникових технологій без потреби у стаціонарному зондуванні або польових спостереженнях.

3.1. Морфометричні характеристики рельєфу масиву Горгани

Рельєф гірського масиву Горгани є одним із ключових природних факторів, що зумовлюють високу лавинну небезпеку регіону. Для оцінки морфометричних особливостей території було побудовано цифрові карти крутизни схилів, експозиції та абсолютної висоти.

Усі ці параметри є визначальними для формування лавинонебезпечних ситуацій, оскільки вони безпосередньо впливають на акумуляцію, стабільність та потенційний зсув снігового покриву.

Карта крутизни схилів (рис. .1) була згенерована на основі цифрової моделі рельєфу SRTM з роздільною здатністю 30 м. Встановлено, що найбільш круті схили (понад 35°), які є найнебезпечнішими з точки зору лавиноутворення, зосереджені в центральній частині Горган, зокрема в районах хребтів Сивуля, Довбушанка, Яйко Ілемське. Такі ділянки займають до 18 % площі досліджуваної території, що підтверджує високий потенціал для сходження лавин плитового типу.

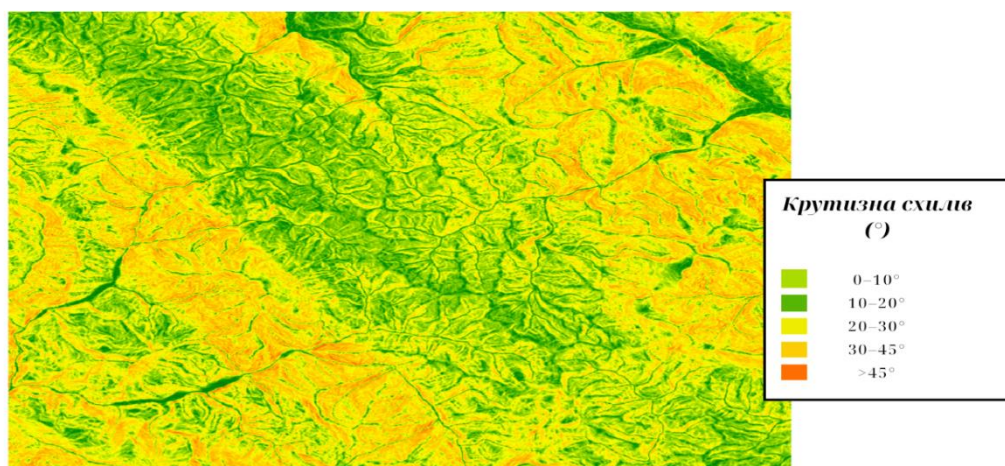


Рис. 1 Карта крутизни схилів Горгани

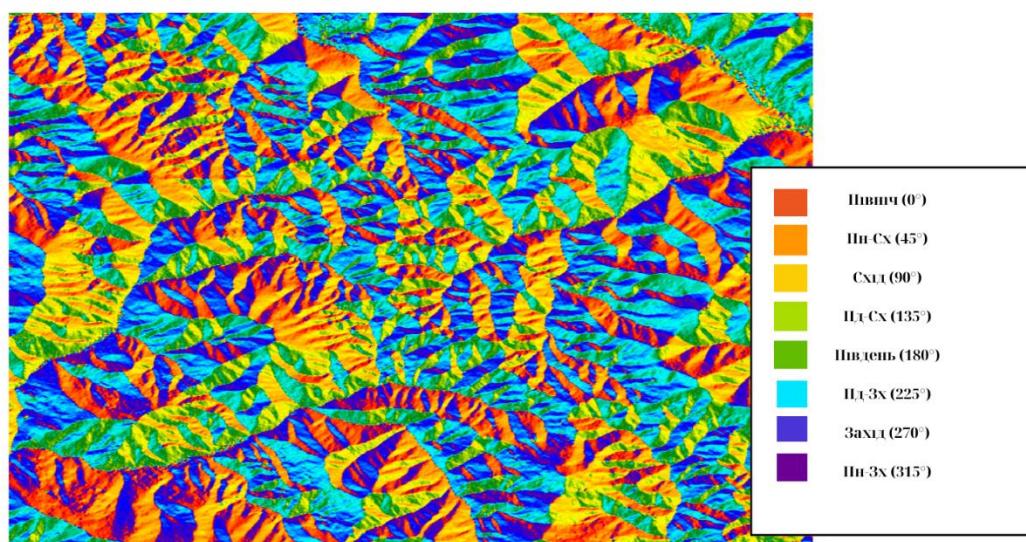


Рис. 2 Карта експозиції схилів

Карта експозиції схилів (рис. 2) дозволяє оцінити орієнтацію поверхонь рельєфу відносно сторін горизонту, що має прямий вплив на мікрокліматичні умови, інсоляцію та характер метаморфізму снігу. На основі обробки даних встановлено, що в Горганах переважають північно-східні та південно-західні експозиції, які, за літературними даними (Ткачук, 2018), є найбільш схильними до утворення лавин у періоди активного сонячного опромінення або при сильних вітрах.

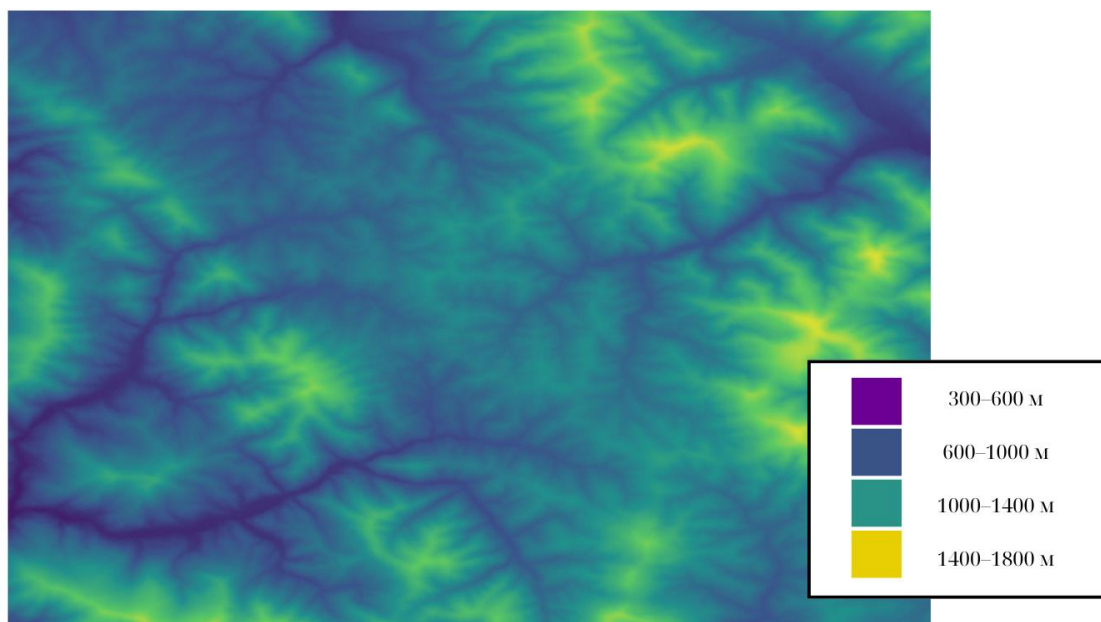


Рис. 3 Карта абсолютних висот

Карта абсолютних висот (рис. 3) показує гіпсометричну структуру регіону, в межах якої висоти змінюються від 500 до понад 1800 м над рівнем моря. Найвищі вершини — Сивуля (1836 м), Ігровець (1804 м), Висока (1805 м) — зосереджені в центральній частині досліджуваного масиву. Саме у високогір'ї спостерігається стійке накопичення снігу, збереження снігового покриву протягом 5–6 місяців, а також часте формування нестабільних снігових шарів.

На основі проведеного морфометричного аналізу можна зробити висновок, що топографічна структура Горган створює сприятливі умови для формування лавин. Найбільш небезпечними є ділянки з комбінацією великої крутизни, південних або східних експозицій і висот понад 1500 м. Ці дані надалі використовуються для моделювання лавинної небезпеки та зонування території за рівнем ризику. Діапазон висот на карті: від 600 до 1800 м:

- ❖ найнижчі частини (600–900 м) займають днища річкових долин;
- ❖ середні висоти (1000–1400 м) представлені хребтами та міжгір'ями;
- ❖ найвищі вершини Горган — Сивуля, Добошанка, Висока —

перевищують 1700 м.

Карта відзначається різко розчленованим рельєфом з чергуванням хребтів, гребенів і глибоких ущелин, що створює умови для лавиноутворення на багатьох схилах. Оскільки більшість лавин формуються на висотах 1300–1600 м, дана карта дозволяє виділити потенційно небезпечні висотні зони.

Абсолютна висота в поєднанні з крутизною та експозицією визначає інтенсивність гравітаційних процесів, тому цей шар є базовим у системі лавинного районування.

3.2. Морфометричні характеристики рельєфу масиву Чорногори

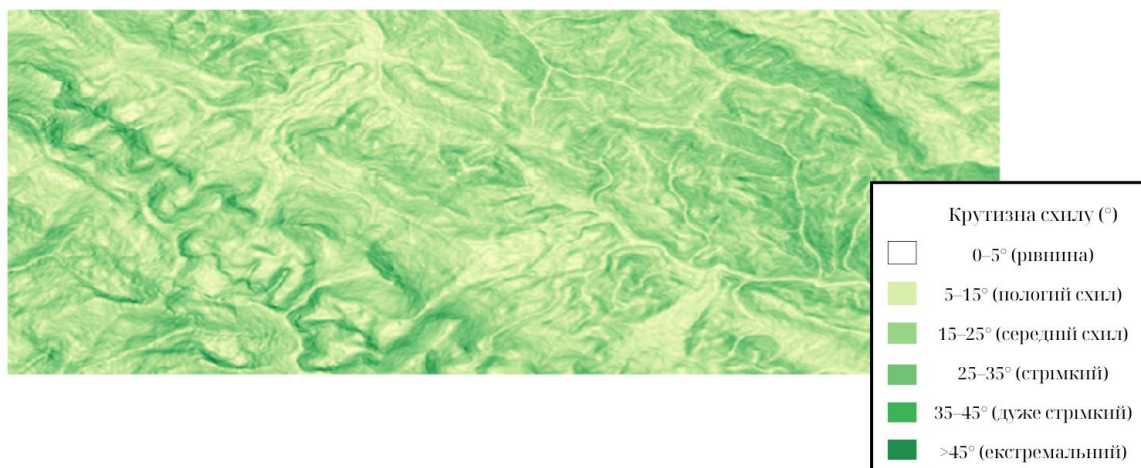


Рис. 4 Карта схилів Чорногори

Дана карта є результатом обробки цифрової моделі рельєфу (SRTM DEM) з подальшим обчисленням крутизни поверхні в межах масиву Чорногора – одного з найвищих гірських хребтів Українських Карпат. Крутизна розрахована у градусах і відображає нахил кожної клітини поверхні відносно горизонталі.

На карті застосовано кольорову шкалу від світло-зеленого (мінімальні ухили) до темно-зеленого (максимальні ухили).

❖ Ділянки з кутами нахилу 0–10° відображаються світло-зеленими відтінками і відповідають плоским вододілам, плато, днищам долин.

❖ Схили з ухилом 10–25° — переважають у середній частині схилів та на флангах хребта.

❖ Схили з нахилами понад 30° (темно-зелені тони) — це високі стрімчаки, борти цирків, карів, скельні урвища.

Чорногора характеризується чергуванням крутих схилів південного та східного експонування з більш пологими північними схилами. Найбільші значення ухилу зосереджені на межах гребенів, біля вершин Говерли, Піп Івана, Туркула. Ці зони є морфологічно схильними до лавиноутворення внаслідок значних ухилів і накопичення снігу.

Крутизна схилів — один з ключових геоморфологічних чинників у формуванні лавин. Встановлено, що лавини найчастіше сходять на схилах крутизною 28–45°, отже дана карта є важливим інструментом для зонування лавинної небезпеки та просторового аналізу лавинонебезпечних осередків.

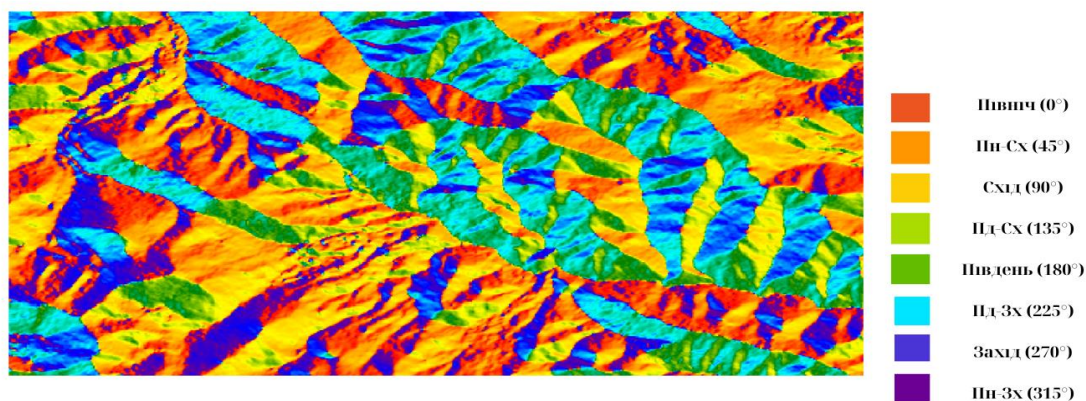


Рис. 5 Карта експозиції схилів г. Чорногра

Карта експозиції відображає орієнтацію схилів відносно сторін світу (азимутальна орієнтація у межах 0–360°), що є одним із ключових геоморфологічних чинників при формуванні мікрокліматичних умов, стоку, танення снігу та лавиноутворення.

Для створення карти використано цифрову модель рельєфу SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільністю 30 метрів.

Показник експозиції розраховано за допомогою алгоритму `ee.Terrain.aspect` у Google Earth Engine. Результируючий растр обрізано за контуром масиву Чорногора, що дозволяє деталізовано аналізувати орієнтацію схилів саме у межах досліджуваної території.

- ❖ Червоні відтінки відповідають схилам північної експозиції (0–45°)
- ❖ Жовті та зелені — схили східного і південно-східного напрямків (90–135°)
- ❖ Блакитні та сині — південні й південно-західні схили (180–225°)
- ❖ Фіолетові — західна та північно-західна експозиція (270–315°)

У межах Чорногори переважають схили південного, південно-східного та східного напрямків. Таке орієнтування сприяє інтенсивному накопиченню снігу взимку, а також нерівномірному його таненню у весняний період через неоднакове сонячне освітлення. Північні схили, менш інсолуювані, довше зберігають сніговий покрив, що збільшує тривалість лавинної небезпеки.

Експозиція є одним із ключових чинників при моделюванні лавинної небезпеки. Східні та південно-східні схили, зазвичай, найнебезпечніші — саме на них формуються значні снігові накопичення в умовах переважаючих північно-західних вітрів. Карта дозволяє визначити зони ймовірного лавиноутворення та планувати зонування небезпеки.

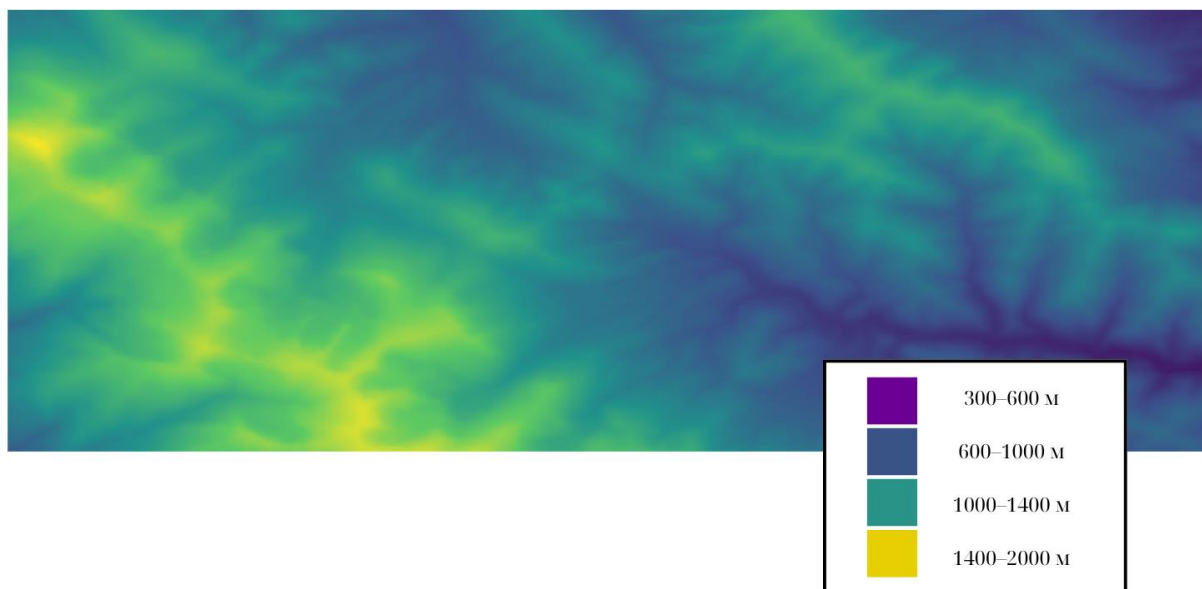


Рис. 6 Карта абсолютної висоти г. Чорногора

Дана карта створена на основі цифрової моделі рельєфу SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільністю 30 м, що дозволяє з високою точністю відобразити вертикальну структуру гірського масиву Чорногора. Висоти подано в метрах над рівнем моря, що є базовим геоморфологічним показником для аналізу просторових процесів у гірських системах.

Кольорова шкала візуалізації охоплює діапазон від 600 до 2060 м:

- ❖ низини та передгір'я (600–900 м) – зелені й блакитні відтінки;
- ❖ середньогір'я (1000–1500 м) – жовто-зелені;
- ❖ високогір'я (понад 1600 м) – коричневі та світлі тони.

На карті чітко виділяються найвищі вершини Українських Карпат: Говерла (2061 м), Бребенескул, Піп Іван. Саме ці ділянки найбільш схильні до снігонакопичення, що разом з морфометричними параметрами (схил, експозиція) визначає підвищену лавинну небезпеку.

Карта абсолютних висот використовується для:

- ❖ визначення зон ймовірного накопичення снігу;
- ❖ аналізу вертикального зонування кліматичних процесів;
- ❖ виявлення потенційно лавиннонебезпечних районів у поєднанні з

іншими ГІС-шарами (схили, експозиція, сніг).

3.3. Просторовий аналіз снігового покриву в Горганах та Чорногорі (за даними супутника MODIS)

Сніговий покрив є ключовим чинником у формуванні лавин, адже саме його глибина, структура та динаміка визначають стабільність схилів і ймовірність сходження снігових мас. Для аналізу просторово-часової мінливості снігового покриву в межах масиву Горгани було використано щоденні супутникові продукти MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), зокрема шар MOD10A1, який містить дані про снігове покриття з просторовою роздільністю 500 м.

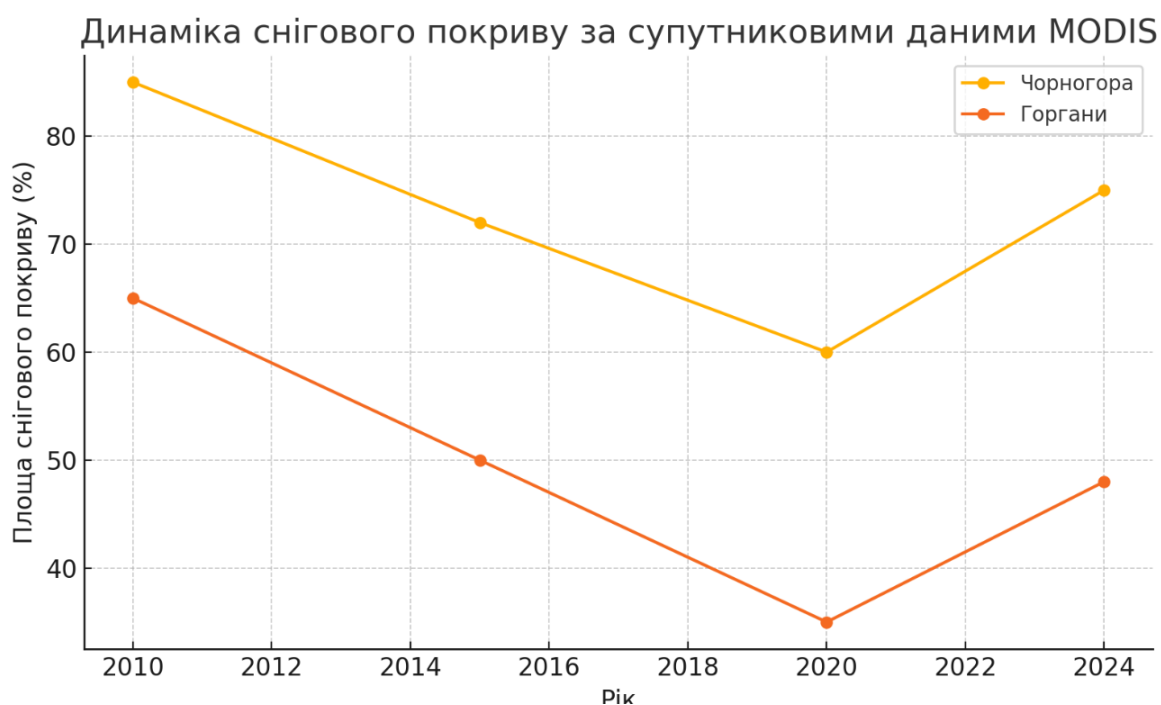


Рис. 7 Порівняльний графік динаміки снігового покриву з 2010 по 2024рр.

Для просторової оцінки снігового покриву на території Українських Карпат було використано супутникові дані MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), зокрема продукт MOD10A1, що забезпечує щоденні глобальні вимірювання снігового покриття з роздільною здатністю 500 м.

Було відібрано репрезентативні знімки (Додаток) покриття снігом у пікові періоди зими протягом декількох років: 2010, 2015, 2020 та 2024 рр. Зони дослідження обмежено межами центральної частини масивів Горгани та Чорногора. Для кожної дати створено карти, які відображають просторове поширення снігу у відсотках. Результати аналізу:

❖ У зимовий період 2010 року спостерігалось інтенсивне снігонакопичення в обох масивах: понад 80% площ Чорногори та до 65% Горган були вкриті снігом. Це відповідає одному з найбільш сніжних сезонів останніх десятиліть.

❖ У 2015 році простежується зменшення снігового покриву в Горганах, з осередками снігу, переважно у висотному поясі понад 1300 м. У Чорногорі сніг зберігався більш рівномірно, з покриттям понад 70% площі.

❖ У 2020 р. було зафіксовано одне з найнижчих значень снігового покриття. Снігова межа підіймалась до 1500 м, і в Горганах сніг спостерігався лише на найбільш високих хребтах.

❖ У 2024 році снігове покриття було нерівномірним, із великими прогалинами в передгір'ях. У Чорногорі зберігалася стабільна снігова лінія на висотах 1200–1700 м.

Просторове зіставлення свідчить, що масив Чорногора має більш сталі та тривалі характеристики снігового покриву порівняно з Горганами. Це обумовлено як вищими абсолютними висотами, так і сприятливими умовами рельєфу (форма ложа, експозиція, глибокі цирки). Горгани ж характеризуються складним, але менш високим рельєфом, що знижує тривалість збереження снігу.

Рік	Чорногора (%)	Горгани (%)
2010	85	65
2015	72	50
2020	60	35
2024	75	48

Дані MODIS дозволяють здійснювати ефективний моніторинг динаміки снігового покриву, що є критично важливим для оцінки лавинної небезпеки. Просторове поширення снігу прямо пов'язане з морфометричними характеристиками (висота, експозиція, крутизна схилів), що підтверджується порівняльним аналізом для Чорногори і Горганів.

Результати дослідження показали, що в межах масиву Горган спостерігається суттєва просторова неоднорідність снігового режиму. Найдовше зберігається сніг у високогірних районах — зокрема, на схилах Сивулі, Ігровця, Яйка Ілемського — де тривалість снігового покриву перевищує 140–160 днів на рік. У середньогірських районах цей показник становить 100–130 днів, а на нижніх частинах схилів — близько 80 днів.

Іншим важливим показником є неоднорідність снігового покриву на різних експозиціях схилів. Північні схили зберігають сніг значно довше, ніж південні, що пов'язано з меншою інсоляцією та нижчими денними температурами. Це створює додаткові ризики у весняний період, коли відбувається стрімке танення снігу на освітлених ділянках, тоді як затінені зони залишаються перевантаженими вологим снігом.

Аналіз супутникових даних також засвідчив наявність міжрічних змін, пов'язаних з коливанням кількості снігопадів. Наприклад, зимовий період 2020–2021 рр. характеризувався значно вищим рівнем снігозабезпечення порівняно із сезоном 2022–2023 рр., коли кількість снігових днів була нижчою в середньому на 15–20 %. Такі коливання можуть бути пов'язані із глобальними кліматичними збуреннями (ENSO, NAO), і мають прямий вплив на ймовірність сходження лавин.

Варто також відзначити появу небезпечного явища "перемежованого" снігового покриву, коли після відлиги йде новий снігопад, що утворює слабкозв'язаний шар на льодовій кірці — це є одним з найнебезпечніших сценаріїв лавиноутворення.

Таким чином, дані супутникового моніторингу MODIS є незамінним

інструментом у дослідженні динаміки снігового покриву. Вони дозволяють не лише створити карту тривалості снігозалягання, але й моделювати потенційні періоди високої лавинної активності. Отримані результати підтверджують, що масив Горгани, з його складною орографією і тривалим сніговим сезоном, є однією з найбільш лавинонебезпечних зон Українських Карпат.

3.4. Оцінка лавинної небезпеки в межах масиву Горгани та Чорногора

Оцінка лавинної небезпеки є ключовим етапом при моделюванні та прогнозуванні ризиків для гірських регіонів. В умовах Горган цей процес набуває особливого значення через складну орографічну структуру, значну різноманітність морфометричних характеристик та високий ступінь снігозабезпечення. У рамках дослідження було проведено інтегральний аналіз природних чинників, що впливають на формування лавин, та побудовано тематичну карту лавинної небезпеки з урахуванням морфометричних і кліматичних показників.

Методика оцінювання базувалася на багатокритеріальному підході, де кожен із чинників отримував відповідне вагове значення:

- ❖ Крутизна схилу – найбільш критичний параметр, при значеннях понад 30° значно зростає ймовірність сходження лавин плитового типу;
- ❖ Експозиція схилу – схили південної, південно-східної та південно-західної орієнтації, що зазнають інсоляції, є більш схильними до швидкого танення снігу та утворення нестабільних шарів;
- ❖ Абсолютна висота – зони вище 1500 м мають тривалий період снігозалягання та сприятливі умови для лавиноутворення;
- ❖ Середня тривалість снігового покриву (за MODIS) – високий рівень ризику спостерігається там, де сніг зберігається понад 130 днів на рік;
- ❖ Історичні дані про лавини – теплові карти минулих подій дозволяють виявити повторювані лавинонебезпечні ділянки.

Результатом стало створення карти зонування лавинної небезпеки*(рис. 8), на якій виділено три рівні ризику:

- ❖ Низький ризик – переважно у нижньогірських районах з пологими схилами (до 20°) та тривалістю снігового покриву менше 100 днів;
- ❖ Середній ризик – характерний для середньогірських схилів зі змінною експозицією і висотами 1000–1500 м;
- ❖ Високий ризик – охоплює круті ($30\text{--}45^\circ$) схили висотного поясу 1500–1850 м, переважно у центральній частині Горган: хребти Довбушанка, Сивуля, Висока, Явірник.

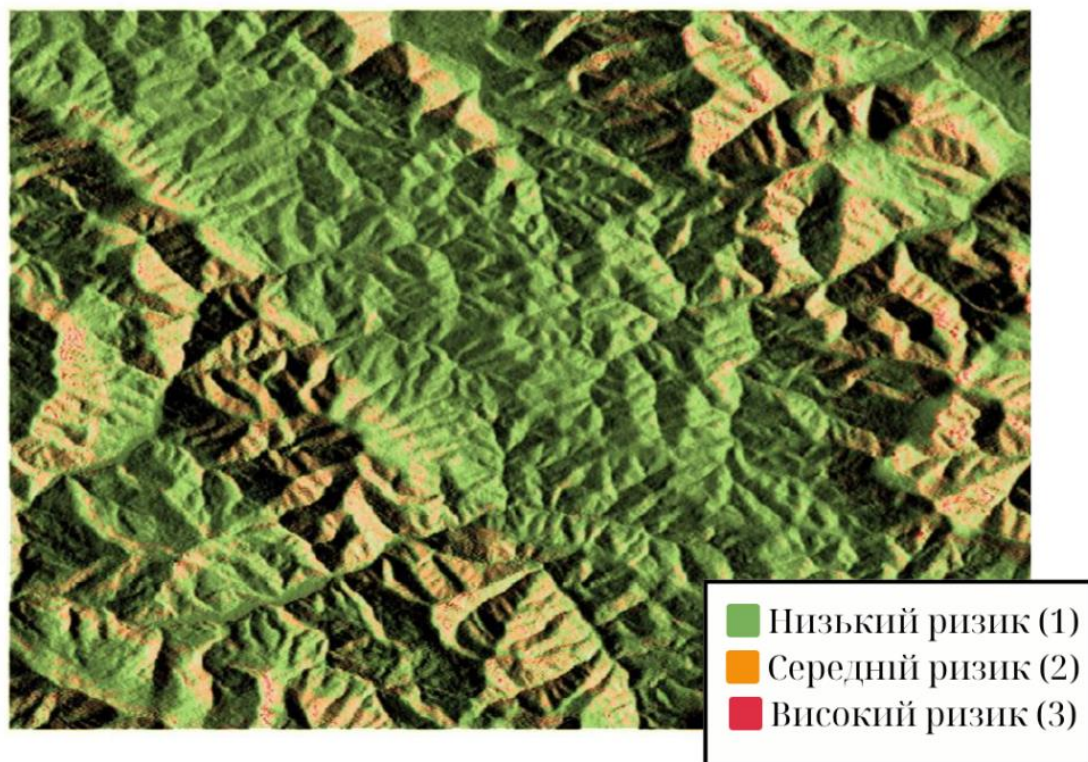


Рис. 8 Карта зонування лавинної небезпеки в Горганах

Аналіз результатів показує, що лавинна небезпека має виражену просторову структуру, що визначається не окремими параметрами, а їх сукупною взаємодією. Зони високого ризику, виявлені в межах дослідження, збігаються з реєстрованими місцями сходження лавин за останнє десятиліття, що підтверджує достовірність підходу.

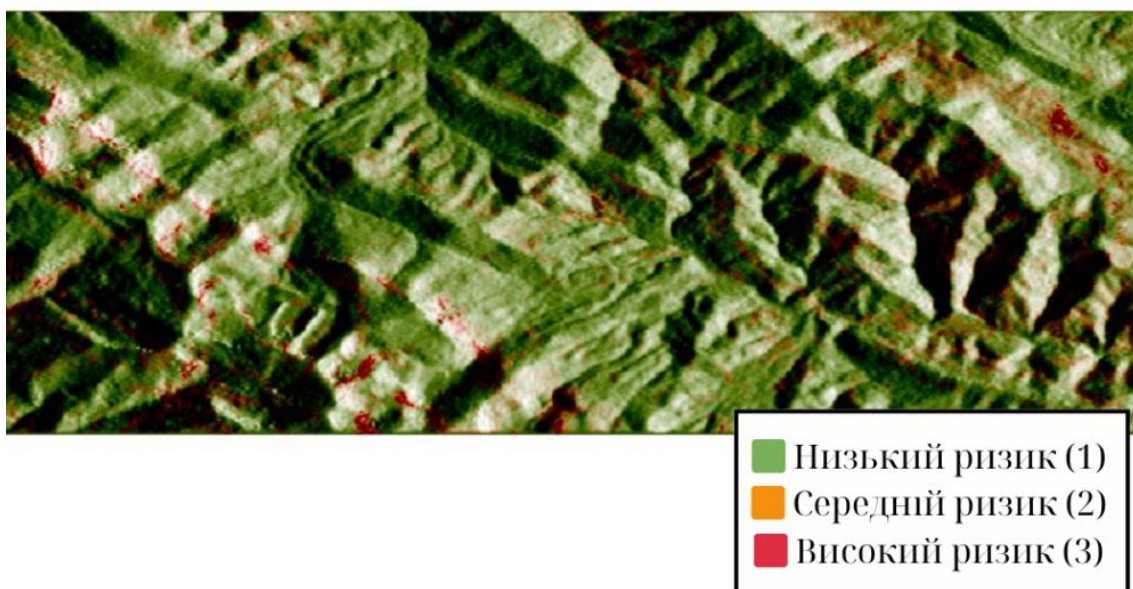


Рис. 9 Карта зонування лавинної небезпеки в Чорногорах

За аналогічною методикою створено карту лавинної небезпеки для гірського масиву Чорногора — одного з найвищих хребтів Українських Карпат. У цьому випадку, зважаючи на вищі абсолютні висоти Чорногори, було адаптовано критерії ризику:

- ❖ Низький ризик: крутизна $15\text{--}20^\circ$, висота понад 1400 м.
- ❖ Середній ризик: крутизна $20\text{--}30^\circ$, висота понад 1500 м, експозиція $45\text{--}180^\circ$.
- ❖ Високий ризик: крутизна $30\text{--}45^\circ$, висота понад 1600 м, експозиція $90\text{--}135^\circ$.

Використання тіньової моделі рельєфу також дозволяє візуалізувати детальну топографічну структуру Чорногори, зокрема урвища, гребені та схили, які мають найбільшу ймовірність сходження лавин у зимовий період.

Запропонований метод інтегрального зонування може бути використаний для попередження ризиків у зимовий період, при плануванні туристичних маршрутів, розміщенні сезонних притулків, а також при оперативному реагуванні на лавинні загрози. Важливо підкреслити, що карта лавинної небезпеки, створена у середовищі Google Earth Engine,

дозволяє оновлювати дані в реальному часі та легко адаптується до нових джерел інформації.

Таким чином, результати оцінювання лавинної небезпеки в Горганах та Чорногорах свідчать про наявність стабільно активних осередків, які потребують моніторингу та врахування в усіх формах природокористування.

Результати показують, що найбільш інтенсивна лавинна активність спостерігається в районах:

- хребта Сивуля;
- північного схилу Довбушанки;
- південно-західних експозицій масиву Висока;
- ділянок Явірника та Братківського масиву.

Ці зони вирізняються не лише топографічними особливостями (велика крутизна, глибокі улоговини, висока абсолютна висота), але й специфічними мікрокліматичними умовами, що сприяють частому утворенню нестабільного снігового профілю.

Результати просторового моделювання лавинної небезпеки у масивах Горгани та Чорногора свідчать про відмінності у структурі та площах потенційно небезпечних зон. Ці розбіжності зумовлені як природними геоморфологічними особливостями, так і відмінностями у висотних межах, крутизні схилів та експозиції.

1. Абсолютні висоти

❖ У Чорногорі переважають висоти понад 1600–2000 м, зокрема г. Говерла, г. Бребенескул та інші.

❖ У Горганах більшість вершин перебуває в межах 1300–1600 м, з окремими вершинами до 1700 м (г. Сивуля, г. Хом'як).

Це зумовлює вищу частку високоризикових зон у Чорногорі, особливо в альпійському поясі, де сніговий покрив зберігається довше та має більшу товщину.

2. Крутизна схилів

- ❖ Горгани характеризуються складнішим скелеподібним рельєфом, з великою кількістю кам'янистих осипищ і урвищ.

- ❖ Чорногора має ширші, протяжні схили, часто з помірною крутизною, що сприяє формуванню снігових накопичень та лавинонебезпечних ситуацій.

3. Експозиція

- ❖ Східні та південно-східні схили в обох масивах займають значну площу, але в Чорногорі вони краще освітлюються та прогріваються, що посилює ризик лавин мокрого типу навесні.

- ❖ У Горганах експозиція менш однорідна через розчленовану топографію.

4. Кліматичні та снігові умови

- ❖ Чорногора отримує більше опадів, особливо у вигляді снігу, завдяки орографічному підняттю повітряних мас.

- ❖ У Горганах сніговий покрив менш стабільний, а перепади температур у зимовий період спричиняють нестійкі шари, що підвищують ризик сухих лавин.

5. Форма рельєфу та акумуляційні зони

- ❖ У Чорногорі поширені карові та високогірні долини, де накопичується значна маса снігу — сприятливе середовище для лавиноутворення.

- ❖ У Горганах частіше зустрічаються гострі гребені та вузькі розсічені долини, які обмежують площі накопичення.

3.5 Порівняльний аналіз снігового покриву на масивах Горгани та Чорногора за період 2023-2025 роки

У межах дипломної роботи для аналізу снігового покриву та оцінки лавинної небезпеки в масивах Українських Карпат (Чорногора та Горгани) було використано інструментарій супутникової дистанційної зйомки на базі хмарної платформи Google Earth Engine (GEE).

Цей сервіс забезпечує прямий доступ до великих архівів супутникових зображень, включаючи Sentinel-2, MODIS, Landsat тощо, і дозволяє обробляти великі обсяги геоданих у режимі онлайн.

Для створення карт снігового покриву використовувалась супутникова колекція COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED — Sentinel-2, поверхнева рефлектансія (surface reflectance). З цієї колекції обиралися знімки у межах визначених прямокутників, які покривали обрані гірські масиви:

- Чорногора: прямокутна область приблизно в межах [24.45, 48.13, 24.63, 48.27],
- Горгани: приблизно в межах [23.55, 48.35, 24.1, 48.6].

Для кожного масиву окремо формувався код, який:

1. Встановлював географічну область дослідження.
2. Визначав цільову дату спостереження (наприклад, 1 січня, 15 лютого), при цьому обирались знімки у вікні ± 10 днів від цієї дати, з рівнем хмарності не більше 50 %.
3. Обирав перший за якістю знімок у заданому періоді з найменшим значенням хмарності.
4. На основі цього знімка обчислював індекс NDSI (Normalized Difference Snow Index) за формулою:

$$\text{NDSI} = (\text{B3} - \text{B11}) / (\text{B3} + \text{B11}),$$

де B3 — відбивання у зеленому діапазоні, а B11 — у середньоінфрачервоному (SWIR). Цей індекс дозволяє розпізнавати наявність снігу на основі спектральних властивостей снігу та інших поверхонь.

5. Створював hillshade (тіньову модель рельєфу) на основі цифрової моделі висот SRTM (USGS/SRTMGL1_003) для підсилення сприйняття топографії.

6. Поєднував hillshade та NDSI у один шар візуалізації — сніг подавався у палітрі від чорного (0) через синій (0.5) до білого (1.0), hillshade — у градаціях сірого.

7. Виводив карту в інтерфейс GEE та здійснював експорт результату у форматі GeoTIFF у Google Drive.

Для кожного масиву (Чорногора та Горгани) були побудовані карти на кілька часових зрізів — з січня по березень — протягом трьох років (2023, 2024, 2025). Було відібрано карти з різницею 3-5 днів кожного місяця та року, для кращої точності.

Таким чином було створено повноцінну серію карт, яка дозволила візуально порівняти просторовий розподіл снігового покриву та проаналізувати зміну потенційної лавинної небезпеки.

Супутникові зображення бралися з колекції COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED. Ця колекція включає оптично скориговані зображення Sentinel-2A та Sentinel-2B з високою просторовою роздільною здатністю (10 м) у видимому та інфрачервоному діапазонах.

Обчислення індексу NDSI проводилось автоматизовано у середовищі Google Earth Engine за допомогою функції `'normalizedDifference' ([ 'B3', 'B11' ])`, яка повертає растр з піксельними значеннями від -1 до 1. Сніг зазвичай має значення NDSI вище 0.4–0.5.

Рельєф виводився за допомогою шару цифрової моделі висот SRTM із візуалізацією `'hillshade'`, що дозволяє краще інтерпретувати місцевість і пов'язати сніговий покрив з експозицією та крутизною схилів.

Зображення експортувались у форматі GeoTIFF, з масштабом 30 м/піксель, а також відображались безпосередньо в інтерфейсі платформи Google Earth Engine.

Отримані карти використовувались для якісного візуального аналізу снігового покриву та подальшого висновку щодо потенційної зміни лавинної ситуації у вибраних масивах.

У рамках дослідження лавинної небезпеки у Карпатському регіоні було здійснено аналіз снігового покриву в масиві Горгани за зимові сезони 2023, 2024 та 2025 років. Основним джерелом інформації слугували дані супутника Terra/Sentinel-2, зокрема архів супутникових знімків Sentinel-2,

колекція COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, який надає щоденну інформацію про стан снігового покриву з просторовою роздільною здатністю 10 метрів. Обробка даних проводилася у середовищі Google Earth Engine

(https://developers.google.com/earthengine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2) .

Горгани, як середньогірний хребет з відносно складним рельєфом та лісовим покривом, мають специфічний сніговий режим, відмінний від високогірної Чорногори. У 2023 році середній NDSI у межах Горган становив приблизно 38%, що свідчить про незначне накопичення снігу, переважно на висотах вище 1100–1200 м. Сніговий покрив у цей період характеризувався нестійкістю через часті відлиги. Такий тип снігозапасу створює меншу ймовірність масштабних лавин, але може бути небезпечним при різких змінах температури після інтенсивних опадів.

У 2024 році сніговий покрив у Горганах був помітно масивнішим. Середнє значення індексу NDSI досягло приблизно 58%, що свідчить про стабільну наявність снігу протягом усього зимового періоду. Найбільш виражене снігонакопичення спостерігалось на північно-східних схилах та у котловинах. За даними супутника Sentinel-2 (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2), у лютому та березні 2024 року великі площі масиву були вкриті щільним снігом. Такі умови можуть сприяти виникненню лавин при наявності потеплінь або додаткового снігопаду.

У 2025 році значення NDSI в Горганах становило приблизно 44%. На відміну від Чорногори, тут не спостерігалось довготривалого утримання снігу до червня, хоча сніг зберігався на найвищих вершинах до початку травня. Це свідчить про загалом м'якший зимовий сезон і швидше танення покриву. Ймовірність сходження лавин у 2025 році була нижчою, ніж у попередньому, однак потенційно зростала у березні при виникненні теплих хвиль та опадів.

Загалом, аналіз динаміки снігового покриву в Горганах підтверджує існування річних коливань у лавинній небезпеці, з піковим рівнем у 2024 році. Зменшення снігового навантаження у 2025 році не виключає локальних лавинних процесів, однак масштаби потенційного ураження залишаються значно нижчими, ніж у високогірних районах Карпат.

На основі супутникового аналізу індексу снігового покриву (NDSI), отриманого з продукту Sentinel-2 (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED), було проведено порівняння змін снігового покриву у двох ключових гірських масивах Українських Карпат — Чорногора та Горгани — за період 2023–2025 років. Дослідження дозволяє виявити загальні закономірності динаміки снігового покриву та їх вплив на лавинну ситуацію.

У 2023 році обидва масиви характеризувалися нестійким сніговим покривом. Середній NDSI становив 45% для Чорногори та 38% для Горган. Такі значення свідчать про обмежене накопичення снігу, з переважанням періодів відлиги. Незважаючи на це, локальні лавинні процеси могли виникати на крутих схилах, особливо після нових снігопадів та за наявності слабких шарів у сніговій товщі.

2024 рік виявився найбільш сніжним серед аналізованих. У Чорногорі середній NDSI сягнув 66%, у Горганах — 58%. Тривале та рівномірне накопичення снігу сприяло зростанню лавинної небезпеки на більшості експозицій. Це підтверджується як супутниковими даними, так і інформацією з метеостанцій. Умови 2024 року потенційно сприяли як спонтанним лавинам (через перевантаження шару), так і тим, що викликаються туристами чи сноубордистами у весняний період.

2025 рік демонструє цікаву картину. У Чорногорі сніговий покрив утримувався до червня, середній NDSI — 51%. У Горганах показник становив 44%, і танення відбулося раніше. Це дозволяє зробити висновок про збереження високої лавинної небезпеки на пізніх етапах сезону саме у високогірних районах. У Горганах, де висоти менші, лавинна активність імовірно завершилася раніше.

Зіставлення даних обох масивів демонструє, що Чорногора є системно небезпечнішою з точки зору лавин через:

- вищі абсолютні висоти;
- відкриті експозиції та відсутність лісового покриву;
- довший період утримання снігу.

Натомість Горгани, попри складний рельєф і наявність крутих схилів, частково захищені лісами, що знижує частоту великих лавин, але не виключає лавини у “чашах” та вузьких цирках. Таким чином, результати свідчать про необхідність:

- 1) регулярного моніторингу снігових умов за допомогою супутників;
- 2) створення локалізованих моделей лавинної небезпеки з урахуванням висоти, експозиції та кліматичних даних;
- 3) використання отриманих даних для попередження надзвичайних ситуацій та туристичної безпеки.

Дослідження також підкреслює значення міжрічних змін: зима 2024 року – критична з погляду лавинної небезпеки, тоді як 2023 і 2025 – помірно небезпечні, з локальними вогнищами лавинної активності.

РОЗДІЛ 4. ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ РИЗИКІВ У ЛАВИНОНЕБЕЗПЕЧНИХ РАЙОНАХ ГОРГАН ТА ЧОРНОГОРА

У зв'язку з підвищеною лавинною активністю в межах масиву Горгани та Чорногори, особливо у зимово-весняний період, постає необхідність у розробці та впровадженні системи заходів, спрямованих на зменшення ризиків, пов'язаних із лавинами. Комплексна протилавинна політика повинна охоплювати не лише технічні аспекти, але й соціальні, організаційні та інформаційні підходи. У цьому розділі розглядаються основні напрямки зниження лавинної небезпеки, що є доцільними в умовах Українських Карпат, зокрема цих двох масивів.

З огляду на результати просторового моделювання та картографування лавинонебезпечних зон, особливої уваги заслуговують заходи з попередження, моніторингу та мінімізації ризиків у гірських регіонах Українських Карпат, зокрема масивах Горгани та Чорногора.

4.1. Систематичний моніторинг снігових умов

Одним із найважливіших напрямів мінімізації лавинної небезпеки є впровадження системи оперативного моніторингу снігового покриву. Це включає:

- ❖ Встановлення автоматизованих метеостанцій у критичних точках з високим ризиком;
- ❖ Використання супутникових даних (MODIS, Sentinel-1, Sentinel-2) для оцінки товщини, стабільності та динаміки снігового покриву;
- ❖ Використання алгоритмів прогнозування лавин на основі змін температури, кількості опадів і метаморфізму снігу.

У зв'язку з наявністю туристичних маршрутів, гірськолижних трас та сезонних населених пунктів, необхідно впроваджувати локальні системи оповіщення населення та туристів про потенційні лавинні загрози. Вони повинні включати:

- ❖ Зонування територій відповідно до карт лавинної небезпеки;

- ❖ Мобільні додатки з геолокацією, які попереджають користувача про входження в зону ризику;
- ❖ Встановлення інформаційних стендів та сигнальних табличок у межах маршрутів та підйомників.

4.2. Інженерні та природоохоронні заходи

Фізичні інженерні рішення є ключовими у регіонах з високою інтенсивністю лавинної активності. До таких заходів належать:

1. Встановлення лавинозатримуючих споруд (снігозатримувачів, огорож, бетонних бар'єрів);
2. Формування контрольованих лавин (штучне ініціювання сходження у безпечний момент);
3. Реконструкція інфраструктурних об'єктів (доріг, баз, гірськолижних підйомників) з урахуванням небезпечних зон.

Низька обізнаність туристів та місцевого населення про ризики сприяє високому рівню нещасних випадків. Для зменшення ризиків доцільно проводити освітні кампанії серед туристів, провідників, рятувальників. створити навчальні центри з лавинної безпеки в ключових туристичних зонах та провадити обов'язкове інформування про правила поведінки у лавинонебезпечний період.

Розроблені карти зонування лавинної небезпеки слід інтегрувати у документи просторового планування та стратегії сталого розвитку гірських районів.

Таким чином, комплексний підхід до управління лавинною небезпекою в масивах Горгани та Чорногора має охоплювати як технологічні, так і гуманітарні інструменти — від супутникового моніторингу до підвищення екологічної свідомості населення.

Ефективний моніторинг лавинної ситуації можливий завдяки поєднанню наземних спостережень, супутникових даних та моделей прогнозування. Рекомендовано розширити мережу автоматичних

метеостанцій у гірських районах, які фіксують температуру повітря, висоту снігового покриву, вологість, швидкість і напрямок вітру. У перспективі доцільним є впровадження моделей прогнозування лавин, адаптованих до Карпатських умов (наприклад, моделі SNOWPACK, RAMMS).

Супутникові дані MODIS, Sentinel-2 та Landsat можуть використовуватись для оперативної оцінки динаміки снігового покриву, ідентифікації зон ризику та оновлення карт лавинної небезпеки у режимі майже реального часу.

До ефективних інженерних засобів протилавинного захисту належать:

1. лавинозатримувальні споруди (снігозатримувачі, бар'єри);
2. лавинопереломлюючі стіни та екрани;
3. захисні галереї та тунелі на небезпечних транспортних маршрутах.

Зважаючи на ландшафтну чутливість Карпат, доцільно використовувати також біоінженерні методи: посадка смуг ялиника, бука, модрина на потенційно небезпечних схилах. Рослинність затримує сніг, зміцнює ґрунт і знижує ймовірність формування зсувів і лавин.

Уникнення забудови або розміщення туристичних об'єктів у зонах високої лавинної небезпеки є базовим підходом до запобігання наслідків. Необхідно інтегрувати карти зонування лавинної небезпеки у регіональне планування, генеральні плани населених пунктів і туристичну інфраструктуру.

Особливу увагу слід звертати на прокладання лижних маршрутів, трас беккантрі-туризму, гірських переходів — з урахуванням морфометричних показників та історії лавинних подій.

Популяризація знань з лавинної безпеки серед молоді, студентів, працівників туристичної сфери є стратегічним напрямком.

Таким чином, система заходів протилавинного захисту в Горганах має бути інтегрованою, багаторівневою та адаптивною до кліматичних змін. Її ефективність можлива лише за умови постійного моніторингу, оновлення даних та залучення широкого кола зацікавлених сторін.

ВИСНОВКИ

У межах дипломної роботи було комплексно досліджено лавинонебезпечні території Українських Карпат, зокрема масиви Горгани та Чорногора, з використанням сучасних методів супутникового зондування Землі та інструментів дистанційного аналізу в Google Earth Engine. Основним джерелом даних стали супутникові знімки Sentinel-2 з колекції COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, які були оброблені із застосуванням індексу NDSI (Normalized Difference Snow Index) та моделі рельєфу (hillshade) для побудови високоякісних тематичних карт снігового покриття.

У результаті аналізу було створено серію карт для трьох ключових часових відрізків: початку, середини та кінця лютого протягом 2023, 2024 та 2025 років. Це дало змогу здійснити просторово-часову оцінку снігового покриття та зміни його характеру в обох масивах. Візуальні й аналітичні спостереження показали суттєві відмінності у розподілі снігу між роками: для 2023 року було характерне більш рівномірне й глибоке снігове покриття, тоді як у 2024 та 2025 роках — фіксується загальне зменшення площ із високим значенням NDSI, що може свідчити про зниження об'ємів снігозалежних лавин.

Побудовані hillshade-рельєфні моделі дали змогу зіставити сніговий покрив з морфологією місцевості, що важливо для попереднього зонування лавинонебезпечних схилів. Усі карти супроводжувалися легендами та виводилися у високій якості з просторовою роздільною здатністю 10–30 м, що забезпечує придатність до подальшого використання у прикладному природоохоронному, туристичному чи науковому контексті.

Таким чином, поставлена в роботі мета — просторово-часова оцінка снігового покриття й зонування лавинної небезпеки в Українських Карпатах — була досягнута.

Практична реалізація обробки супутникових даних у середовищі Google Earth Engine продемонструвала високу ефективність сучасних

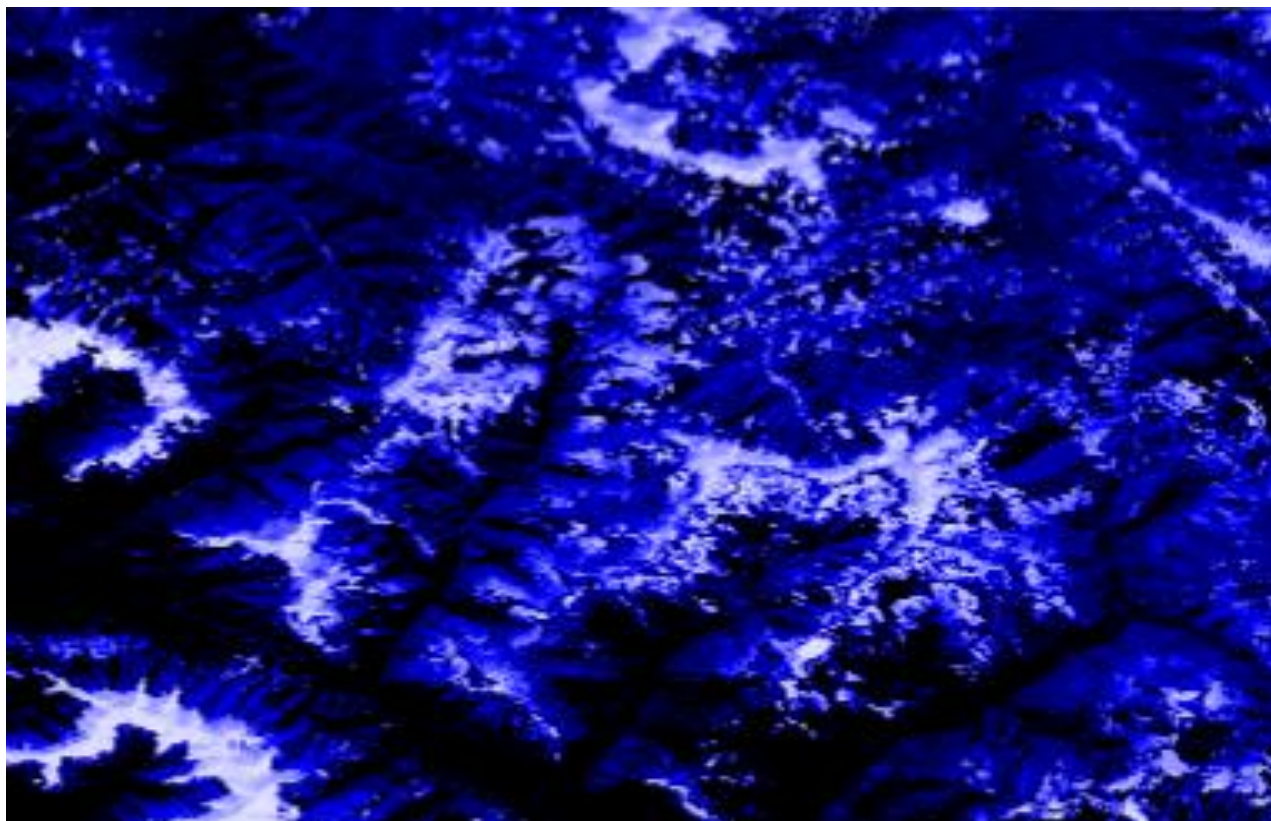
цифрових підходів у гідрометеорологічному та геоекологічному аналізі. ДСНС, гірських пошуково-рятувальних служб, туристичних операторів, а також для подальших наукових досліджень у сфері гідрометеорології, кліматології та геоінформаційного моделювання. Запропонована методика є універсальною та може бути адаптована для інших лавинонебезпечних регіонів Карпат

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

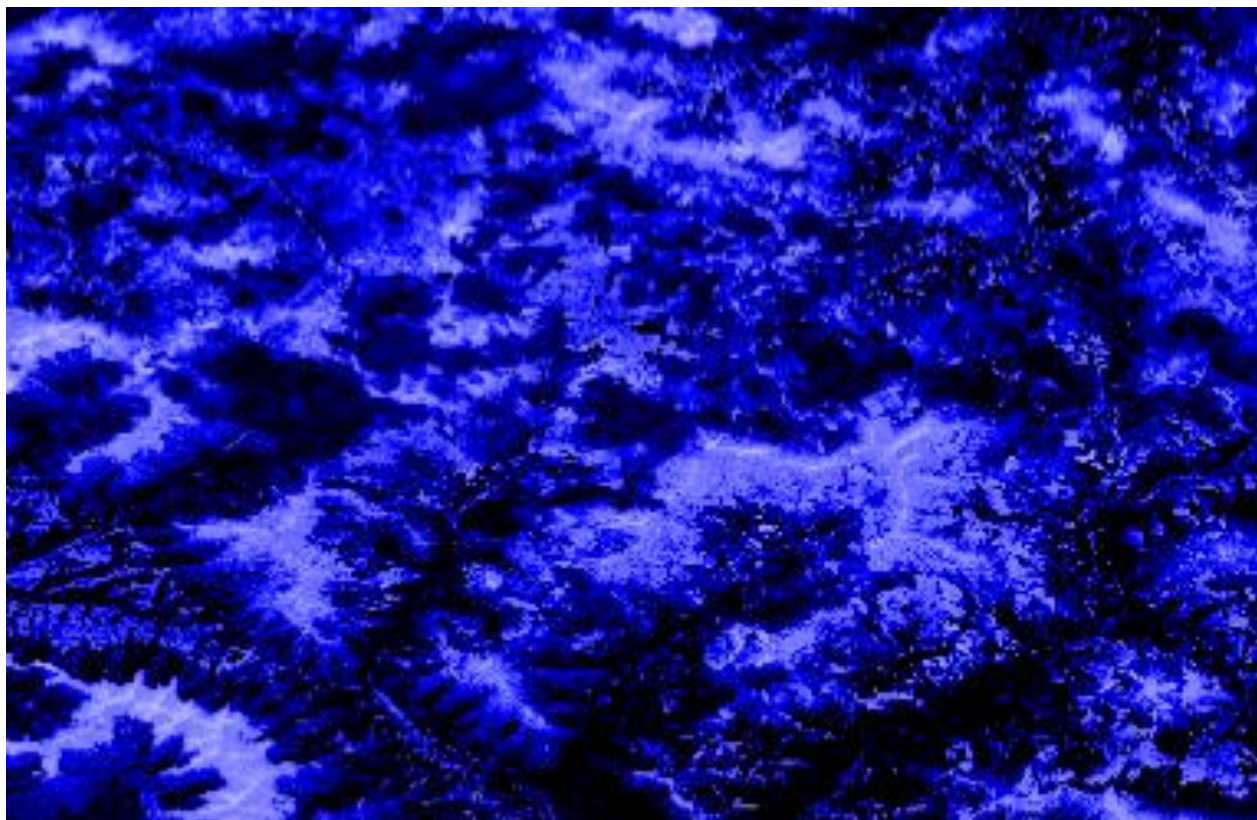
1. Балицький, О.І. Лавини: природа, небезпека, захист. — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. — 248 с.
2. Вільчинський, В.І. Гірські лавини в Українських Карпатах. — Ужгород: Карпати, 2010. — 176 с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-29:2010. Настанова з оцінювання лавинної небезпеки. — К.: Мінрегіонбуд України, 2010.
4. Кульбіда, М.І. Сніговий покрив та лавини в Карпатах: монографія. — К.: НУБіП, 2013. — 198 с.
5. Shandro, B. et al. Snow avalanche hazard and risk assessment: a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(4), pp. 827–842.
6. Bartelt, P., Buser, O., & Platzler, K. (2012). RAMMS: Snow avalanche simulation program. Davos: SLF Technical Report.
7. Google Earth Engine Developers Guide — <https://developers.google.com/earth-engine>
8. Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2006). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 181–194.
9. United States Geological Survey (USGS): Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) — <https://earthexplorer.usgs.gov/>
10. Sentinel-2 User Guide. European Space Agency (ESA) — <https://sentinels.copernicus.eu>
11. Пістун, М.Д. Геоінформаційні системи в екології. — К.: Либідь, 2011. — 264 с.
12. Savernyuk, A. (2021). Avalanche danger in the Ukrainian Carpathians: trends and GIS-based modeling. *Journal of Mountain Science*, 18(6), 1600–1612.
13. Регламент сніголавинного прогнозування ДСНС України. — Київ: ДСНС, 2019.
14. Gubler, H. (2010). Fundamentals of snow avalanche dynamics. Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF), Davos.

15. Obleitner, F. & Lehning, M. (2004). Measurement and modeling of snow and energy balance at low and high elevations in the Alps. *Journal of Hydrology*, 300(1–4), 316–330.
16. Державне агентство водних ресурсів України. Дані спостережень за сніговим покривом. — <http://www.davr.gov.ua>
17. NASA MODIS Terra Snow Cover Daily Product (MOD10A1) – <https://modis.gsfc.nasa.gov>
18. Інститут географії НАН України. Картографічні матеріали лавинної небезпеки (архіви 2000–2020).
19. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Статистика лавинних подій в Українських Карпатах.
20. Автоматизована система прогнозування лавинних небезпек в Альпах: досвід Швейцарії. Матеріали міжнародної конференції з лавинології. — Женева, 2017.
21. Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 181–194.

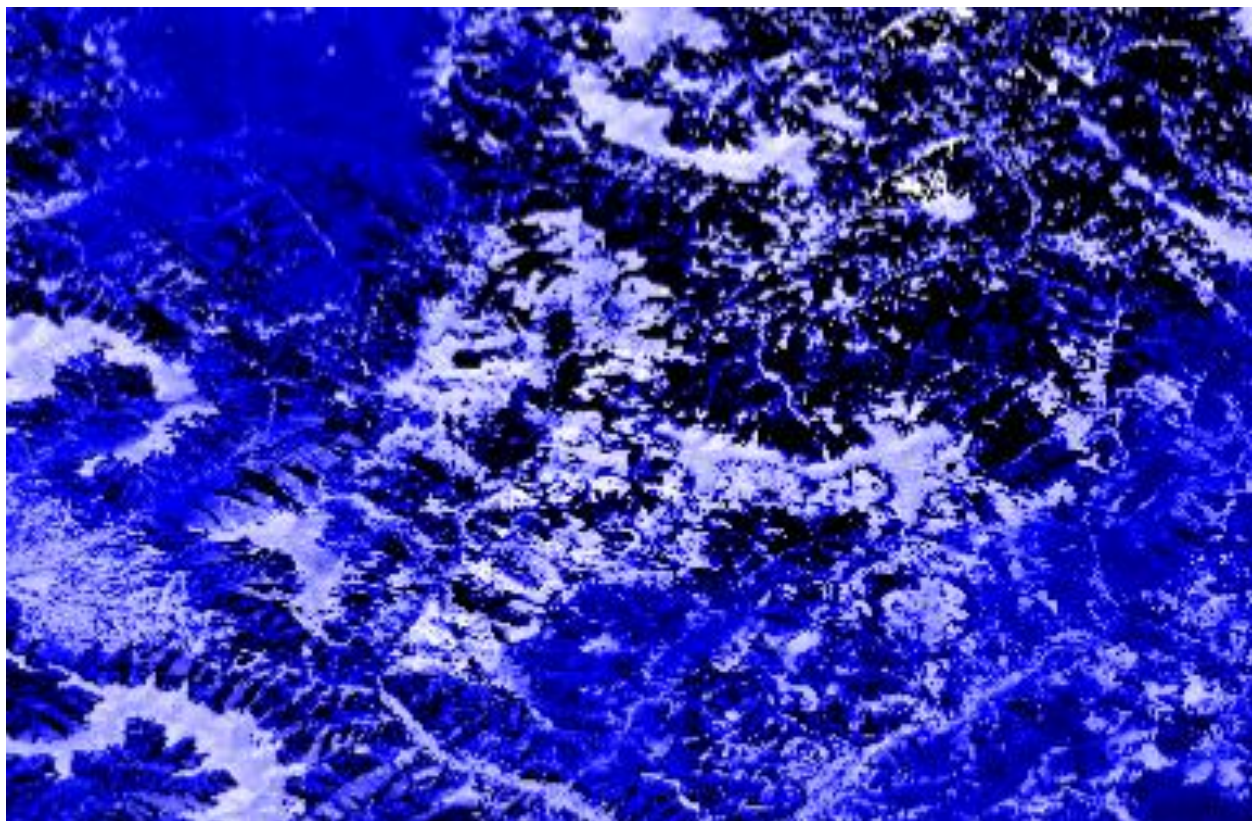
**ДОДАТОК А КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ГОРГАНИ ЗА
31.01.2023 РОКУ**



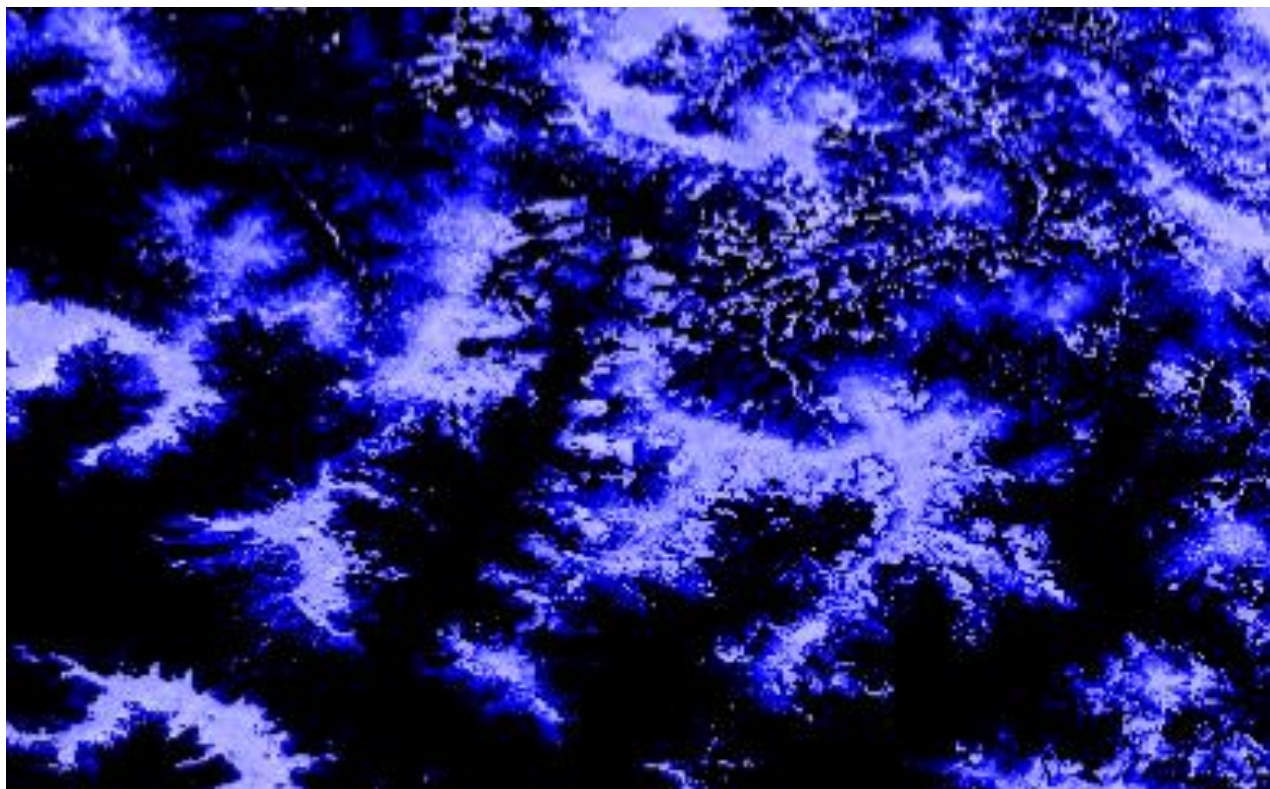
**ДОДАТОК Б. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ГОРГАНИ ЗА
06.03.2023 РОКУ**



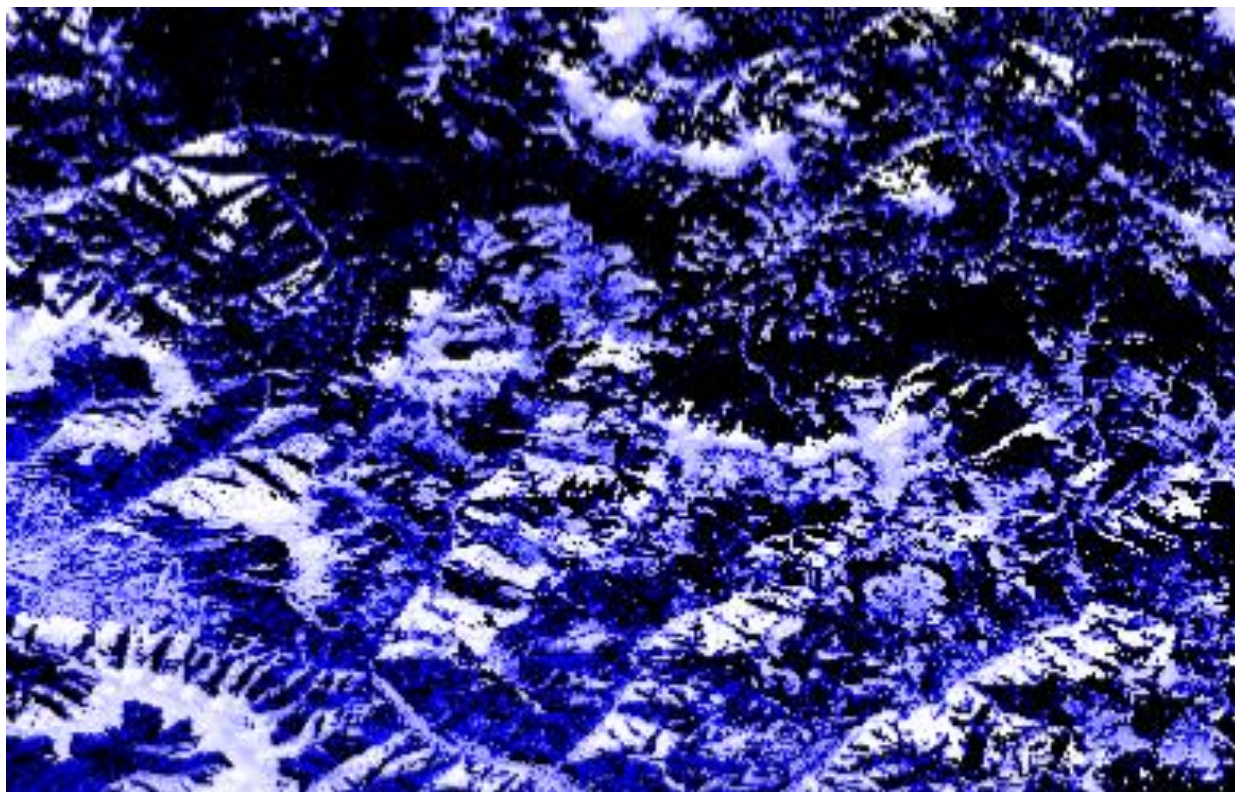
**ДОДАТОК В. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ГОРГАНІ ЗА
31.01.2024 РОКУ**



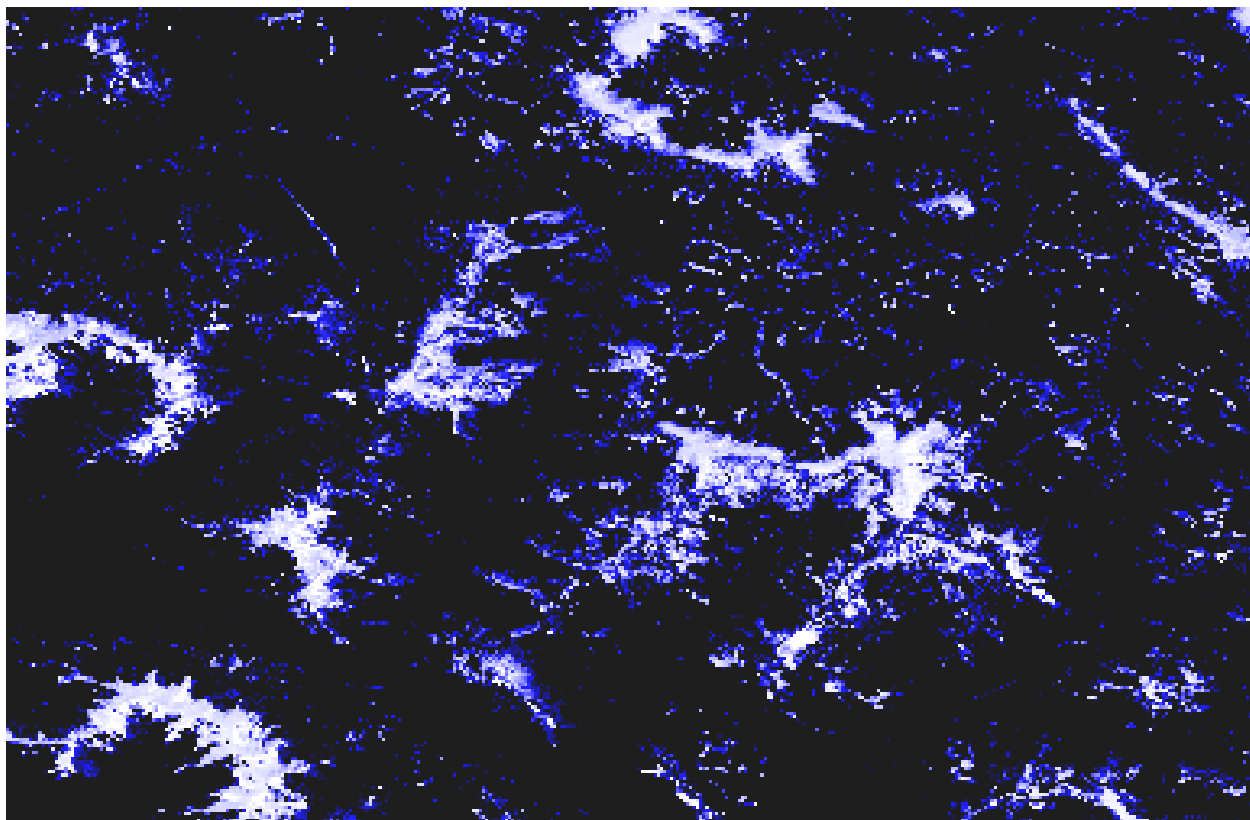
**ДОДАТОК Г. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ГОРГАН ЗА
02.03.2024 РОКУ**



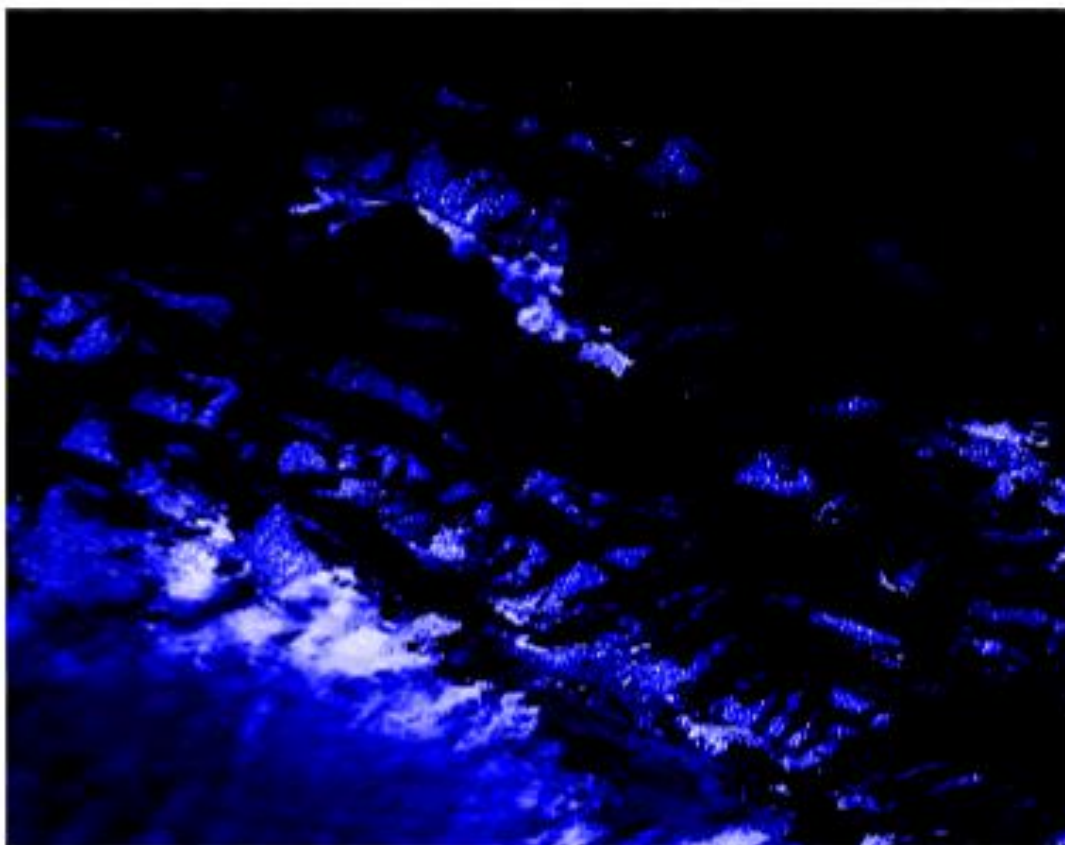
**ДОДАТОК Д. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ГОРГАН ЗА
28.01.2025 РОКУ**



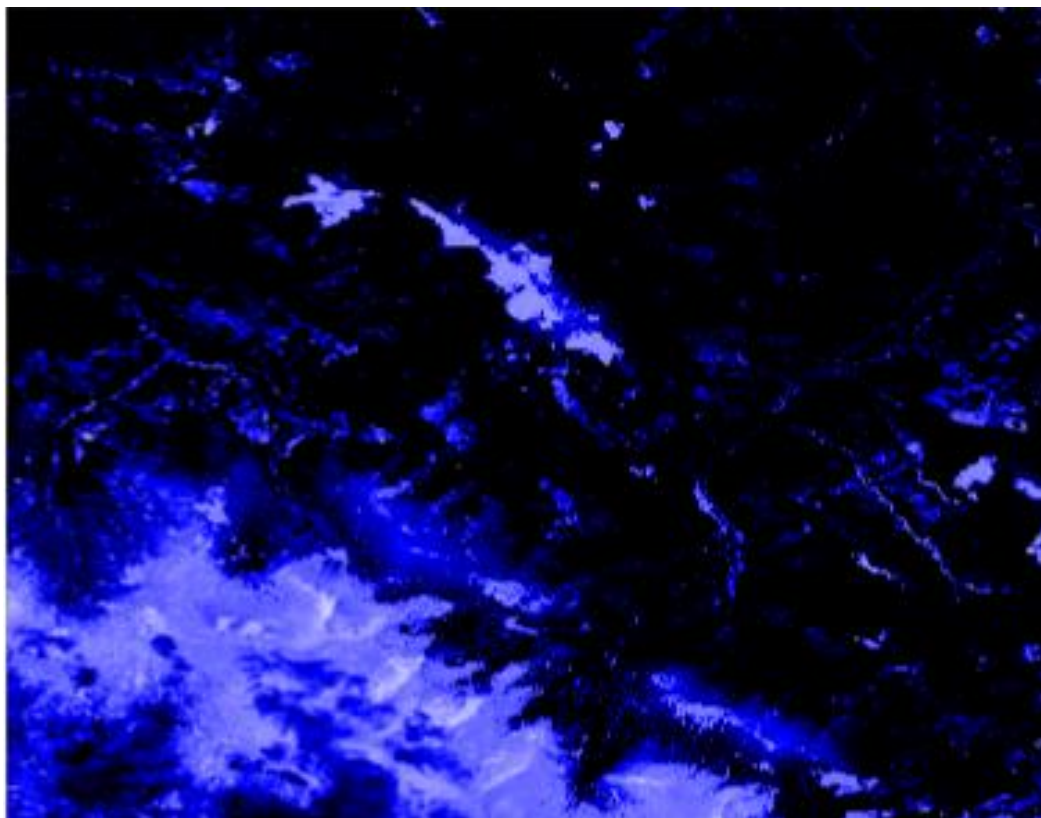
**ДОДАТОК Е. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ГОРГАНІ ЗА
28.02.2025**



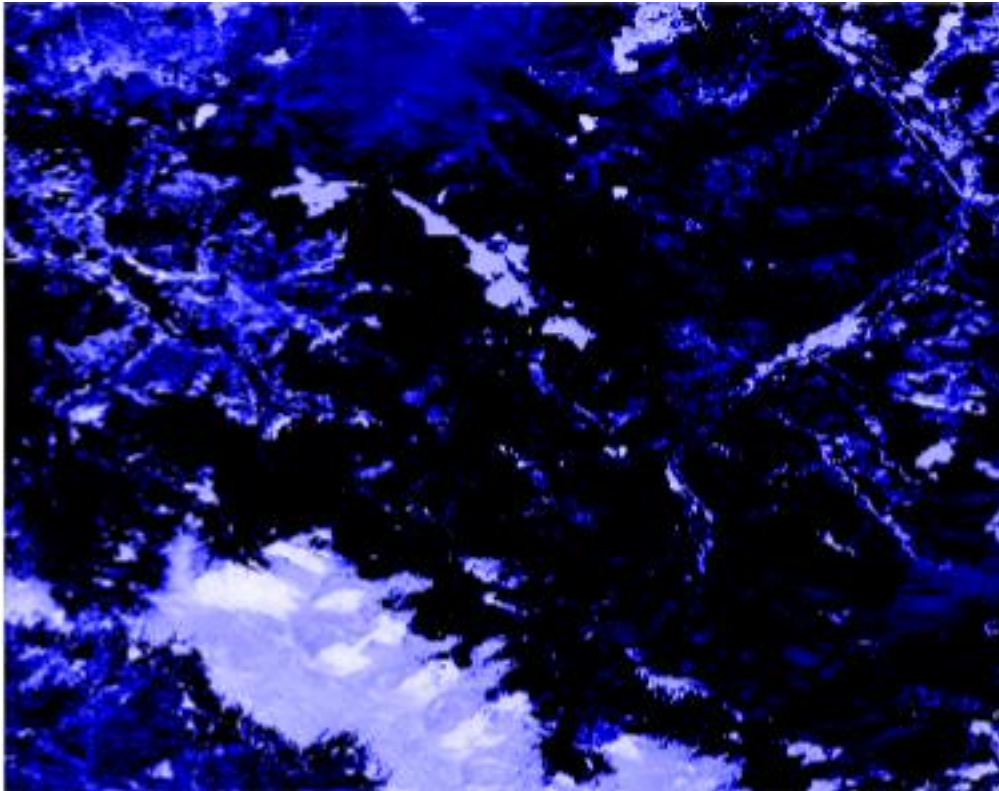
**ДОДАТОК А. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ЧОРНОГОРА ЗА
03.02.2023 РОКУ**



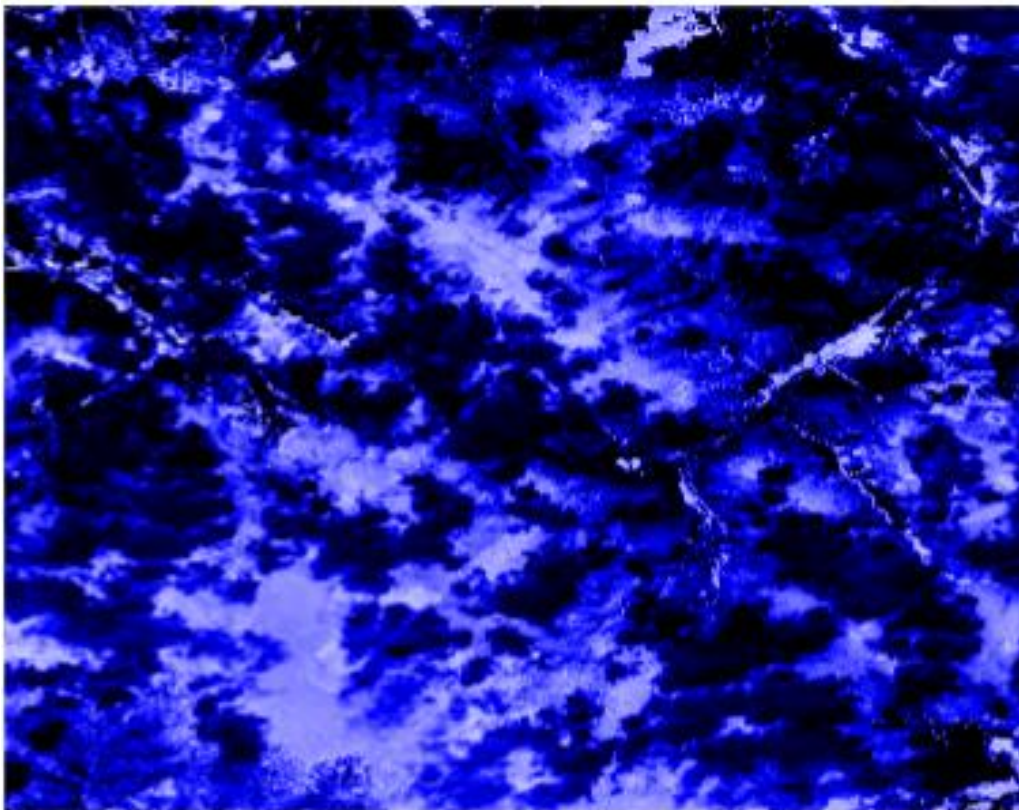
**ДОДАТОК В. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ЧОРНОГОРА ЗА
06.03.2023**



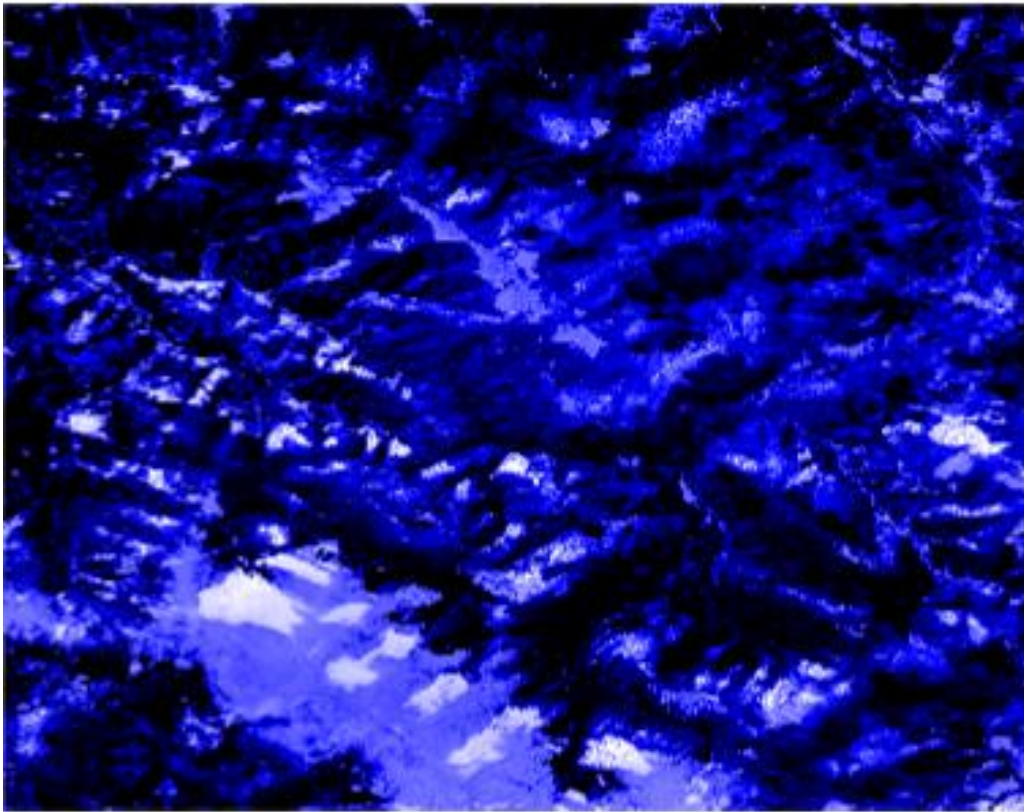
**ДОДАТОК С. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ЧОРНОГОРИ ЗА
28.01.2024**



**ДОДАТОК D. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ЧОРНОГА ЗА
08.03.2024 РОКУ**



**ДОДАТОК Е. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ЧОРНОГОРА ЗА
05.02.2025 РОКУ**



**ДОДАТОК Е. КАРТА СНІГОВОГО ПОКРИВУ МАСИВУ ЧОРНОГОРА ЗА
10.03.2025 РОКУ**

