

Тарас КРАВЕЦЬ, кандидат географічних наук,
доцент кафедри артилерійської розвідки,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5398-7441>

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
79026, м. Львів, вул. Героїв Майдану, 32, Україна

ГЕОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ ТА ТРИВИМІРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Обґрунтовано актуальність використання цифрових моделей рельєфу (DEM) та тривимірної візуалізації як ефективних інструментів сучасного географічного аналізу місцевості. У статті розглянуто методичні засади застосування DEM у поєднанні з геоінформаційними технологіями для дослідження морфологічних характеристик рельєфу та просторової структури території. Особливу увагу приділено можливостям тривимірної представлення місцевості, яке забезпечує підвищення наочності інтерпретації геопросторових даних. Проаналізовано основні етапи географічного аналізу місцевості, зокрема формування тривимірної моделі, оцінювання крутизни схилів, визначення умов прохідності та аналіз видимості. Запропоновано структурно-логічну модель географічного аналізу місцевості, яка відображає послідовність виконання дослідження та взаємозв'язок його основних етапів. У роботі також узагальнено залежність ефективності використання території від характеристик рельєфу, що дозволяє формалізувати вплив морфологічних параметрів на просторові можливості місцевості.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу (DEM), географічний аналіз, тривимірна візуалізація, рельєф місцевості, просторовий аналіз, геоінформаційні технології.



Taras KRAVETS, PhD in Geography, Associate Professor,
Department of Artillery Reconnaissance
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5398-7441>
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy
79026, Lviv, 32 Heroes of Maidan street, Ukraine

GEOGRAPHICAL ANALYSIS OF TERRAIN USING DIGITAL ELEVATION MODELS AND 3D VISUALIZATION

The purpose of this article is to analyze the methodological foundations and practical capabilities of using digital elevation models (DEM) and three-dimensional visualization for geographical analysis of terrain. The study is focused on substantiating the transition from traditional two-dimensional cartographic approaches to integrated spatial analysis based on modern geoinformation technologies. Particular attention is paid to the interpretation of terrain morphology, assessment of slope steepness, visibility conditions, and spatial structure of the territory within a unified analytical framework.

Methodology. The research is based on the integration of digital elevation models into a geoinformation environment with subsequent three-dimensional visualization of terrain. Methods of spatial analysis, visual interpretation, and cartographic generalization were applied to assess terrain characteristics. The study includes the analysis of slope steepness, terrain passability, and visibility conditions using 3D models, as well as the development of a structural-logical model describing the sequence of geographical analysis. A generalized functional relationship between terrain characteristics and the efficiency of spatial use was also formulated.

Results. The results demonstrate that the use of digital elevation models combined with three-dimensional visualization significantly enhances the clarity, accuracy, and analytical depth of geographical analysis. The integration of terrain parameters such as slope, elevation differences, and visibility allows for a comprehensive assessment of spatial properties of the territory. It is shown that complex terrain with high slope variability reduces spatial accessibility, while areas with moderate slopes and favorable visibility conditions provide better opportunities for effective use. The developed structural-logical model reflects the последовательность перехода from raw geospatial data to analytical interpretation and decision-making. The proposed approach enables the transformation of descriptive terrain analysis into a more systematic and quantitative process.

Scientific novelty. The scientific novelty of this study lies in the development of an integrated approach to geographical analysis of terrain based on the combined use of DEM and 3D visualization. For the first time, a последовательная схема перехода from terrain visualization to analytical interpretation and further formalization of results is proposed. The study also introduces a generalized relationship between terrain characteristics and spatial efficiency, which expands the methodological framework of modern geographical and geoinformation research.

Practical significance. The results of the study can be applied in geographical, geomorphological, and geoinformation research, as well as in spatial planning and territorial analysis. The proposed approach enables:

- Improved interpretation of terrain morphology;
- Enhanced assessment of spatial accessibility and visibility conditions;
- Integration of multiple terrain parameters into a unified analytical framework;
- Increased reliability of spatial analysis results;
- Effective use of DEM in applied geospatial tasks.

Thus, the application of digital elevation models in combination with three-dimensional visualization represents an important step in the development of modern methods of geographical analysis. Further research may focus on improving quantitative models of terrain assessment, integrating DEM with remote sensing data, and expanding the use of three-dimensional geospatial analysis in various scientific and applied domains.

Key words: digital elevation model (DEM), geographical analysis, 3D visualization, terrain, spatial analysis, GIS technologies.



Постановка науково-практичної проблеми. Питання географічного аналізу місцевості є одним із ключових у сучасній географії, картографії та геоінформаційному забезпеченні просторових досліджень. Рельєф як базовий компонент природного середовища визначає просторову структуру території, впливає на формування природних процесів і відіграє важливу роль у різних видах прикладного аналізу. Точність та повнота його дослідження безпосередньо залежать від якості вихідних геопросторових даних і методів їх обробки.

Суттєвою проблемою є обмеженість традиційних підходів до аналізу рельєфу, які базуються на використанні двовимірних картографічних матеріалів. Представлення місцевості у вигляді горизонталей і відміток висот ускладнює розуміння просторових форм рельєфу, особливо в умовах складної морфології поверхні. Це призводить до зниження наочності аналізу та підвищує ризик помилок при оцінюванні характеристик території.

Також зростання обсягів геопросторових даних і розвиток геоінформаційних технологій створили передумови для переходу до нових методів дослідження місцевості. Проте на практиці залишається недостатньо опрацьованим питання ефективної інтеграції цифрових моделей рельєфу у процес географічного аналізу. Відсутність узагальнених підходів до їх використання обмежує можливості повноцінного застосування DEM для оцінювання морфологічних характеристик рельєфу та просторових властивостей території.

Залишається, актуальною проблема комплексного врахування різних характеристик рельєфу у межах єдиного аналітичного підходу. Окрім параметри, такі як крутизна схилів, умови видимості та просторова доступність, як правило, розглядаються ізольовано, що не дозволяє отримати цілісне уявлення про структуру місцевості. Відсутність інтегрованих моделей аналізу ускладнює оцінювання території та

знижує обґрунтованість отриманих результатів.

Недостатньо дослідженим залишається питання формалізації впливу характеристик рельєфу на ефективність використання території. Відсутність узагальнених залежностей між морфологічними параметрами рельєфу та просторовими можливостями місцевості обмежує можливості кількісного аналізу та прийняття обґрунтованих рішень на основі геопросторових даних.

Таким чином, існує необхідність у розробці комплексного науково-практичного підходу до географічного аналізу місцевості, який базується на використанні цифрових моделей рельєфу та тривимірної візуалізації. Такий підхід має забезпечити інтеграцію різних характеристик рельєфу, підвищити наочність та точність аналізу, а також створити основу для формалізації просторових залежностей і подальшого розвитку методів географічних досліджень.

Актуальність і новизна дослідження.

Актуальність цього дослідження зумовлена поступом географічного аналізу місцевості в умовах активного розвитку геоінформаційних технологій та широкого використання цифрових моделей рельєфу. Традиційні підходи, що базуються на використанні двовимірних картографічних матеріалів, не забезпечують достатнього рівня наочності та повноти відображення просторових характеристик рельєфу, що обмежує можливості їх ефективного використання у сучасних географічних дослідженнях. На відміну від існуючих підходів, у роботі запропоновано перехід від описового та візуального аналізу рельєфу до його формалізованої кількісної оцінки на основі інтегрального показника ефективності використання території.

Метою цієї статті є обґрунтування підходу до географічного аналізу місцевості на основі цифрових моделей рельєфу та тривимірної візуалізації, а також оцінка можливостей їх використання для дослідження морфологічних

характеристик рельєфу, умов видимості та просторової структури території. Основна увага приділяється інтеграції різних параметрів рельєфу у межах єдиного аналітичного підходу, що забезпечує перехід від описового представлення місцевості до її комплексної оцінки.

У роботі розглянуто методичні аспекти використання цифрових моделей рельєфу у геоінформаційному середовищі, зокрема формування тривимірних моделей місцевості, виконання аналізу крутизни схилів, оцінювання умов видимості та узагальнення отриманих результатів. Проаналізовано можливості застосування DEM для інтегрованого дослідження просторових характеристик території та визначення взаємозв'язків між окремими елементами рельєфу.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці комплексного підходу до географічного аналізу місцевості, який поєднує можливості цифрових моделей рельєфу та тривимірної візуалізації з формалізованою кількісною оцінкою просторових характеристик території. На відміну від існуючих підходів, що переважно ґрунтуються на ізолюваному аналізі окремих параметрів рельєфу або їх візуальній інтерпретації, у роботі запропоновано інтегральний показник ефективності використання території, який враховує сукупний вплив крутизни схилів, умов видимості та складності рельєфу в межах єдиної аналітичної моделі.

Уперше формалізовано взаємозв'язок між морфологічними характеристиками рельєфу та просторовими можливостями території шляхом введення інтегральної функції ефективності, що дозволяє перейти від якісного опису місцевості до її кількісної інтерпретації та порівняльного оцінювання різних ділянок за єдиним критерієм. Запропонований підхід забезпечує можливість системного врахування взаємодії ключових параметрів рельєфу та підвищує обґрунтованість прийняття рішень на основі геопросторових даних.

Зв'язок теми статті з важливими науково-практичними завданнями. Тема статті безпосередньо пов'язана з актуальними науково-практичними завданнями розвитку сучасної географії, картографії та геоінформаційних технологій, зокрема у сфері вдосконалення методів просторового аналізу місцевості. В умовах стрімкого розвитку геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі та цифрових геопросторових даних особливого значення набуває підвищення точності, наочності та аналітичних можливостей дослідження рельєфу як базового компонента території.

Використання цифрових моделей рельєфу та тривимірної візуалізації створює науково обґрунтовану основу для вирішення широкого кола прикладних завдань, пов'язаних із географічним аналізом місцевості, дослідженням морфології рельєфу, оцінюванням просторових характеристик території та моделюванням природних процесів. Інтеграція різних параметрів рельєфу у межах єдиного аналітичного підходу дозволяє враховувати складність просторової структури території та підвищує достовірність результатів географічних досліджень.

Наукова значущість дослідження полягає у розвитку методичних підходів до географічного аналізу місцевості на основі цифрових моделей рельєфу. Запропонований підхід дозволяє не лише візуалізувати рельєф, але й здійснювати його комплексну інтерпретацію з урахуванням взаємозв'язків між морфологічними характеристиками та просторовими властивостями території. Це сприяє поглибленню теоретичних засад сучасної географії та розширює можливості застосування геоінформаційних технологій у наукових дослідженнях.

Практична цінність статті полягає у створенні передумов для впровадження цифрових моделей рельєфу та тривимірної візуалізації у процес географічного аналізу місцевості. Отримані результати можуть бути використані при проведенні геоморфологічних досліджень, оцінюванні територій, просторовому плануванні, а також у навчальному процесі підготовки фахівців у галузі географії, картографії та геоінформаційних систем. Це дозволяє підвищити якість інтерпретації геопросторових даних та забезпечити більш обґрунтоване використання інформації про рельєф.

Таким чином, дослідження використання цифрових моделей рельєфу у поєднанні з тривимірною візуалізацією є важливим науково-практичним завданням, що сприяє розвитку сучасних методів географічного аналізу місцевості, підвищенню якості геопросторових досліджень та створює основу для подальшого вдосконалення геоінформаційних технологій у різних сферах наукової та прикладної діяльності.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених застосуванню цифрових моделей рельєфу, розвитку геоінформаційних систем та методам просторового аналізу, низка аспектів географічного дослідження місцевості на основі DEM залишається недостатньо опрацьованою. У більшості робіт основна увага зосереджується або на технічних питаннях побудови цифрових моде-

лей рельєфу, або на окремих видах аналізу (крутизна схилів, експозиція, видимість), тоді як їх інтегроване використання у межах єдиного географічного підходу розглядається обмежено.

Однією з невирішених частин проблеми є відсутність комплексного підходу до географічного аналізу місцевості, який би враховував сукупність морфологічних характеристик рельєфу та їх взаємозв'язок. Наявні дослідження, як правило, розглядають окремі параметри ізольовано, що не дозволяє сформувати цілісне уявлення про просторову структуру території та обмежує можливості її комплексної оцінки.

Іншою важливою, але недостатньо дослідженою проблемою є відсутність узагальнених методичних підходів до поєднання цифрових моделей рельєфу з тривимірною візуалізацією у процесі географічного аналізу. Хоча можливості 3D-представлення місцевості широко використовуються у практиці, їх роль як інструменту аналітичної інтерпретації рельєфу та формування просторових висновків розкрита недостатньо.

Крім того, залишається відкритим питання формалізації впливу характеристик рельєфу на просторові властивості території. У науковій літературі бракує узагальнених залежностей, які б дозволяли кількісно оцінювати взаємозв'язок між морфологічними параметрами рельєфу (крутизною схилів, умовами видимості тощо) та ефективністю використання території. Це створює методологічний розрив між описовим географічним аналізом і його кількісною інтерпретацією.

Таким чином, існує потреба у розробці комплексного підходу до географічного аналізу місцевості, який би поєднував використання цифрових моделей рельєфу, тривимірної візуалізації та інтегрованих методів оцінювання просторових характеристик території. Заповнення цих науково-методичних прогалин дозволить підвищити достовірність результатів географічних досліджень та створить основу для подальшого розвитку сучасних методів просторового аналізу.

Аналіз останніх досліджень за темою дослідження. Сучасні дослідження у сфері географічного аналізу місцевості значною мірою пов'язані з розвитком цифрових моделей рельєфу та методів їх візуалізації. Одним із ключових напрямів є вдосконалення тривимірного представлення геопросторових даних. Зокрема, у роботі Ruzinog та співавторів [1] здійснено огляд основних підходів до 3D-візуалізації рельєфу, включаючи програмні засоби та методи інтеграції геоінформаційних даних. Dübel і Schu-

mann [2] детально досліджують особливості відображення географічних об'єктів у тривимірному середовищі, підкреслюючи важливість візуального аналізу для інтерпретації просторових структур.

Важливу роль у розвитку сучасних цифрових моделей рельєфу відіграють глобальні проекти дистанційного зондування Землі. Зокрема, місія Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), описана Farr та ін. [3], стала одним із базових джерел глобальних DEM. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із місією TanDEM-X, результати якої наведені у роботах Zink та ін. [4] і Rizzoli та ін. [5], де розглянуто процес створення високоточної глобальної цифрової моделі рельєфу та оцінено її якісні характеристики. Ці дослідження заклали основу для широкого використання DEM у географічних та геоінформаційних дослідженнях.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із використанням тривимірної візуалізації у навчанні та формуванні просторового мислення. Yin [6] розглядає інтеграцію 3D-візуалізації та ГІС у освітньому процесі, тоді як Philips та ін. [7] аналізують можливості імерсивної геовізуалізації. Роботи Newcombe [8] і Cohen та Hegarty [9] підкреслюють значення просторового мислення для ефективного аналізу тривимірних об'єктів і географічних структур, що є важливим у контексті використання DEM.

Серед українських досліджень значну увагу приділено методам побудови та використання цифрових моделей рельєфу. Зокрема, Гунько [10] аналізує методи просторової інтерполяції при створенні DEM, визначаючи їх точність та обмеження. Рожі та ін. [11] розглядають геодезичні аспекти формування цифрових моделей рельєфу для геоінформаційних систем, підкреслюючи важливість вихідних даних та методів їх обробки. Chetverikov та ін. [12] досліджують особливості використання DEM для об'єктів культурної спадщини, що демонструє прикладні можливості цифрових моделей у різних галузях. Vovk та ін. [13] аналізують використання безпілотних літальних апаратів для створення ортофотопланів і цифрових моделей рельєфу, що є актуальним джерелом високодетальних геопросторових даних.

Таким чином, аналіз сучасних публікацій свідчить про значний розвиток технологій створення цифрових моделей рельєфу та їх тривимірної візуалізації, а також про широке використання DEM у різних сферах географічних досліджень. Водночас у науковій літературі недостатньо уваги приділено комплексному географічному аналізу місцевості, який би поєднував

візуалізацію, оцінювання морфологічних характеристик рельєфу, аналіз видимості та узагальнення результатів у межах єдиного підходу. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію цифрових моделей рельєфу та тривимірної візуалізації у системний географічний аналіз місцевості.

Виклад основного матеріалу. Сучасні підходи до географічного аналізу місцевості дедалі більше ґрунтуються на використанні цифрових моделей рельєфу як базового елементу геопросторових даних. Цифрова модель рельєфу (Digital Elevation Model, DEM) забезпечує безперервне відображення висот земної поверхні та створює основу для переходу від традиційного описового аналізу місцевості до кількісної оцінки її морфологічних характеристик. На відміну від класичних картографічних матеріалів, де рельєф представлений у вигляді горизонталей та відміток висот, DEM дозволяє розглядати місцевість як цілісну просторову систему з можливістю детального аналізу її властивостей.

Формування цифрової моделі рельєфу здійснюється на основі узагальнення даних дистанційного зондування Землі, матеріалів геодезичних знімань та картографічних джерел. Важливою умовою її ефективного використання є забезпечення узгодженості вихідних даних у межах єдиної системи координат та висотного датуму, що дозволяє уникнути спотворень при подальшому аналізі. Якість DEM, її просторове розрізнення та точність безпосередньо впливають на достовірність результатів географічного аналізу, зокрема при оцінюванні крутизни схилів, визначенні перепадів висот та виявленні морфологічних особливостей рельєфу.

Одним із ключових етапів використання цифрових моделей рельєфу є їх інтеграція у геоінформаційне середовище, що забезпечує можливість комплексного опрацювання різнобачних геопросторових даних. Поєднання DEM із векторними шарами та растровими зображеннями дозволяє сформувавши цілісне уявлення про територію, у якому природні та антропогенні елементи розглядаються у взаємозв'язку. Такий підхід створює передумови для переходу від статичного відображення місцевості до її динамічного аналізу, що враховує просторові залежності та взаємодію окремих компонентів.

Використання тривимірної візуалізації на основі цифрових моделей рельєфу відкриває нові можливості для географічного аналізу. Тривимірне представлення місцевості забезпечує більш наочне відображення форм рельєфу,

дозволяє безпосередньо оцінювати їх просторову структуру та взаємне розташування. Це значно знижує когнітивне навантаження на користувача та підвищує ефективність інтерпретації геопросторових даних, особливо в умовах складного або пересіченого рельєфу.

У межах тривимірного геоінформаційного середовища з'являється можливість виконання географічного аналізу місцевості на якісно новому рівні. Зокрема, цифрові моделі рельєфу дозволяють здійснювати оцінку крутизни схилів, аналіз експозиції поверхні, визначення зон видимості та виявлення ділянок з різними умовами прохідності. Такі параметри є важливими характеристиками просторової структури території та формують основу для подальшої інтерпретації її властивостей.

З метою наочного представлення рельєфу місцевості та підвищення ефективності його інтерпретації використано тривимірну модель, сформовану на основі цифрової моделі рельєфу у геоінформаційному середовищі на прикладі Яворівського полігону. Крім самого рельєфу для побудови моделей у програмному забезпеченні «Сіль» використано також свіжі дані з БПЛА. Такий підхід дозволяє перейти від умовного картографічного відображення до безпосереднього просторового сприйняття форм поверхні та їх взаємного розташування.

Тривимірне подання місцевості дає можливість візуально оцінити морфологічні особливості рельєфу, зокрема перепади висот, крутизну схилів та характер їх просторового розміщення. Крім того, поєднання цифрової моделі рельєфу з іншими геопросторовими даними забезпечує цілісне уявлення про територію та створює основу для подальшого географічного аналізу. Результат такого підходу до візуалізації місцевості наведено на рис. 1., де крім рельєфу відображено будівлі, ліси і ін. Це дає комплексну картину і дозволяє планувати операції на кардинально іншому рівні.

Використання такого представлення значно спрощує аналіз складного рельєфу порівняно з традиційними двовимірними картографічними матеріалами та створює передумови для подальшої кількісної оцінки його характеристик.

Отримана тривимірна модель місцевості створює основу для більш детального дослідження її морфологічних характеристик. На відміну від загального візуального сприйняття рельєфу, подальший етап передбачає його цілеспрямовану інтерпретацію з урахуванням просторових особливостей поверхні.



Рисунок 1. Тривимірна модель місцевості, сформована на основі цифрової моделі рельєфу у СПЗ «СІЛЬ»

Такі ділянки, як правило, ускладнюють переміщення та обмежують можливості використання території, тоді як пологі форми рельєфу сприяють більш вільному пересуванню та

освоєнню місцевості. Результати візуальної оцінки крутизни схилів і загальної морфології рельєфу наведено на рис. 2.

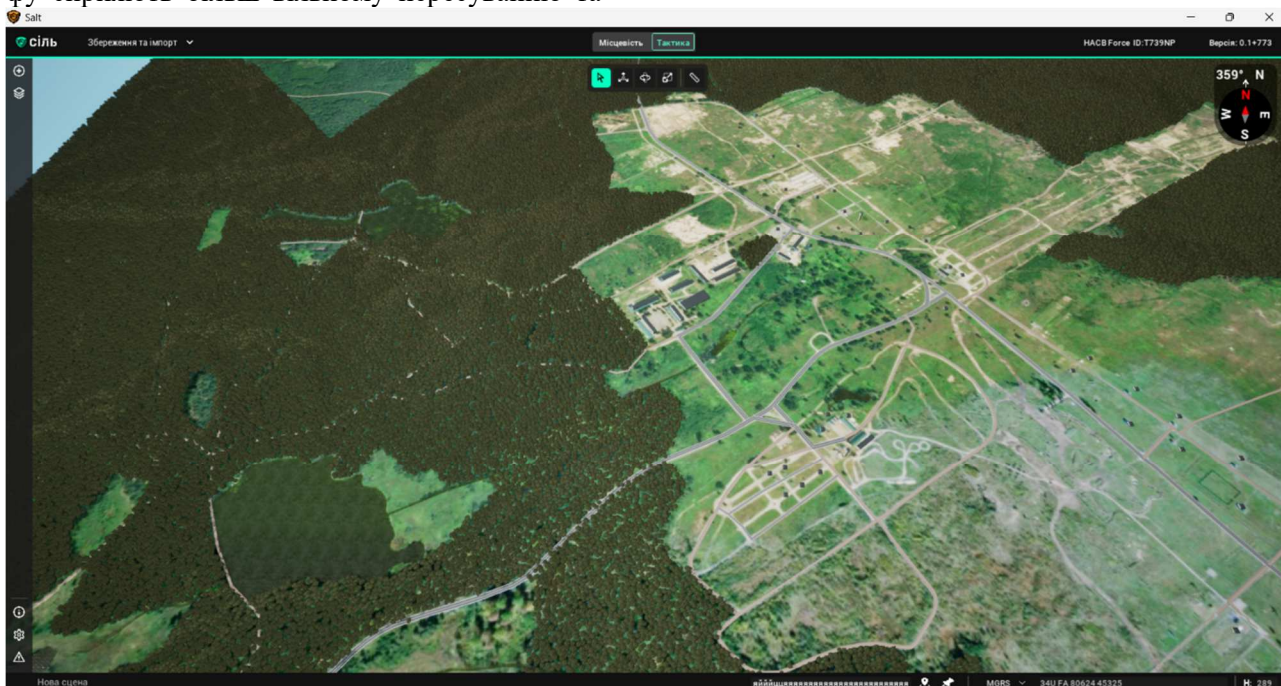


Рисунок 2. Візуальна оцінка рельєфу місцевості за тривимірною моделлю (крутизна схилів та прохідність)

Подальший розвиток географічного аналізу місцевості передбачає врахування не лише морфологічних характеристик рельєфу, але й його впливу на просторові взаємозв'язки між об'єктами. Одним із ключових аспектів такого аналізу є оцінка видимості, яка визначає можливість спостереження за територією та взаєм-

ного огляду окремих її ділянок.

Підвищення, вододіли, схили та інші форми рельєфу можуть як забезпечувати вигідні умови для огляду місцевості, так і створювати природні перешкоди, що обмежують пряму видимість. У межах тривимірної моделі такі особливості проявляються найбільш наочно, що до-

зволяє визначати ділянки з відкритим оглядом та зони, приховані від спостереження.

Аналіз видимості дає змогу виявити ключові точки, з яких забезпечується максимальний контроль території, а також визначити ділянки, що залишаються поза прямою видимістю. Результати оцінки видимості місцевості на основі тривимірної моделі рельєфу наведено на рис. 3.

Представлене зображення ілюструє розподіл зон видимості та невидимості, що формується під впливом рельєфу місцевості. Використання такого підходу дозволяє більш повно оцінити просторові характеристики території та створює основу для комплексного геогра-

фічного аналізу, який враховує як морфологічні, так і функціональні особливості рельєфу. Перевага є що можна безпосередньо на місцевості розташувати позицію чи транспортний засіб і здійснювати роботу від першого лиця, як у грі. Це дозволяє набагато краще оцінити місцевість і необхідні її тактичні властивості.

Виконана оцінка морфологічних характеристик рельєфу та аналіз видимості створюють передумови для переходу до комплексного географічного аналізу місцевості. На цьому етапі окремі параметри рельєфу розглядаються у взаємозв'язку, що дозволяє сформувати цілісне уявлення про просторову структуру території та її функціональні властивості.

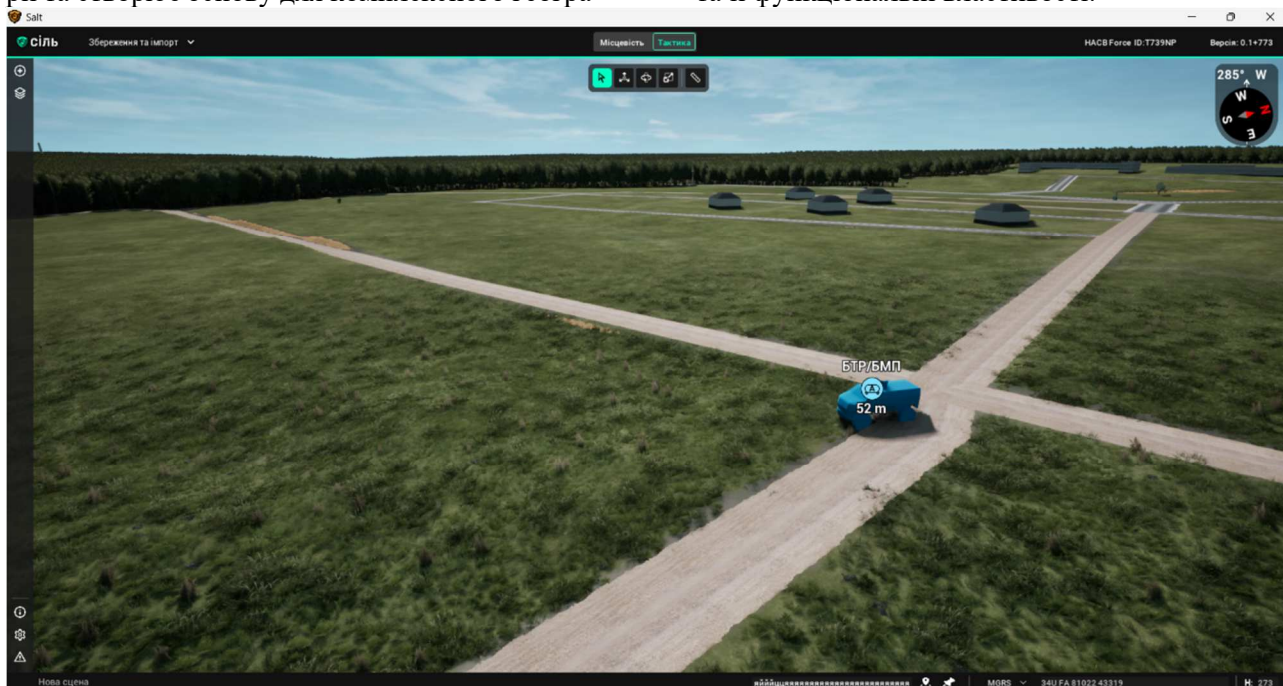


Рисунок 3. Оцінка видимості місцевості з використанням тривимірної моделі рельєфу

Інтеграція результатів аналізу крутизни схилів, умов прохідності та видимості забезпечує можливість виділення ділянок з різними характеристиками використання місцевості. Такий підхід дозволяє перейти від розрізненого розгляду окремих показників до їх узагальнення та інтерпретації у межах єдиного географічного простору.

Поєднання тривимірної візуалізації з аналітичними можливостями цифрових моделей рельєфу забезпечує більш глибоке розуміння структури місцевості та дозволяє визначити найбільш характерні її ділянки.

Результати такого інтегрованого географічного аналізу місцевості наведено на рис. 4.

Представлене зображення відображає узагальнення результатів аналізу рельєфу, у

межах якого враховано морфологічні особливості поверхні та просторові умови видимості. На його основі виділяються ділянки з різними характеристиками території, що дозволяє оцінити її просторову диференціацію та сформувати уявлення про особливості використання місцевості. Такий підхід забезпечує перехід від окремих аналітичних показників до цілісної географічної інтерпретації території.

Така систематизація дозволяє не лише структурувати процес аналізу, але й забезпечити його відтворюваність та практичне застосування у подальших дослідженнях.

З цією метою доцільним є представлення географічного аналізу місцевості як цілісного процесу, що включає етапи отримання вихідних геопросторових даних, фо-

рмування тривимірної моделі рельєфу, виконання аналітичних операцій та інтерпретацію отриманих результатів.

Особливістю такого підходу є врахування не лише морфологічних характеристик рельєфу, але й їх функціонального значення у межах просторового аналізу. Поєднання тривимірної візуалізації з аналітичними можливостями цифрових моделей рельєфу дозволяє розглядати місцевість як динамічну систему, у якій окремі елементи взаємодіють між собою та формують загальні властивості території.

Узагальнена послідовність виконання географічного аналізу місцевості на основі

цифрових моделей рельєфу наведена на рис. 5.

Представлена модель відображає логічну послідовність переходу від вихідних геопросторових даних до формування тривимірної сцени, подальшого аналізу рельєфу та узагальнення отриманих результатів. Вона демонструє взаємозв'язок між окремими етапами дослідження та підкреслює системний характер географічного аналізу місцевості. Наявність зворотного зв'язку у моделі забезпечує можливість уточнення вихідних даних і корекції результатів, що підвищує точність та надійність аналізу.

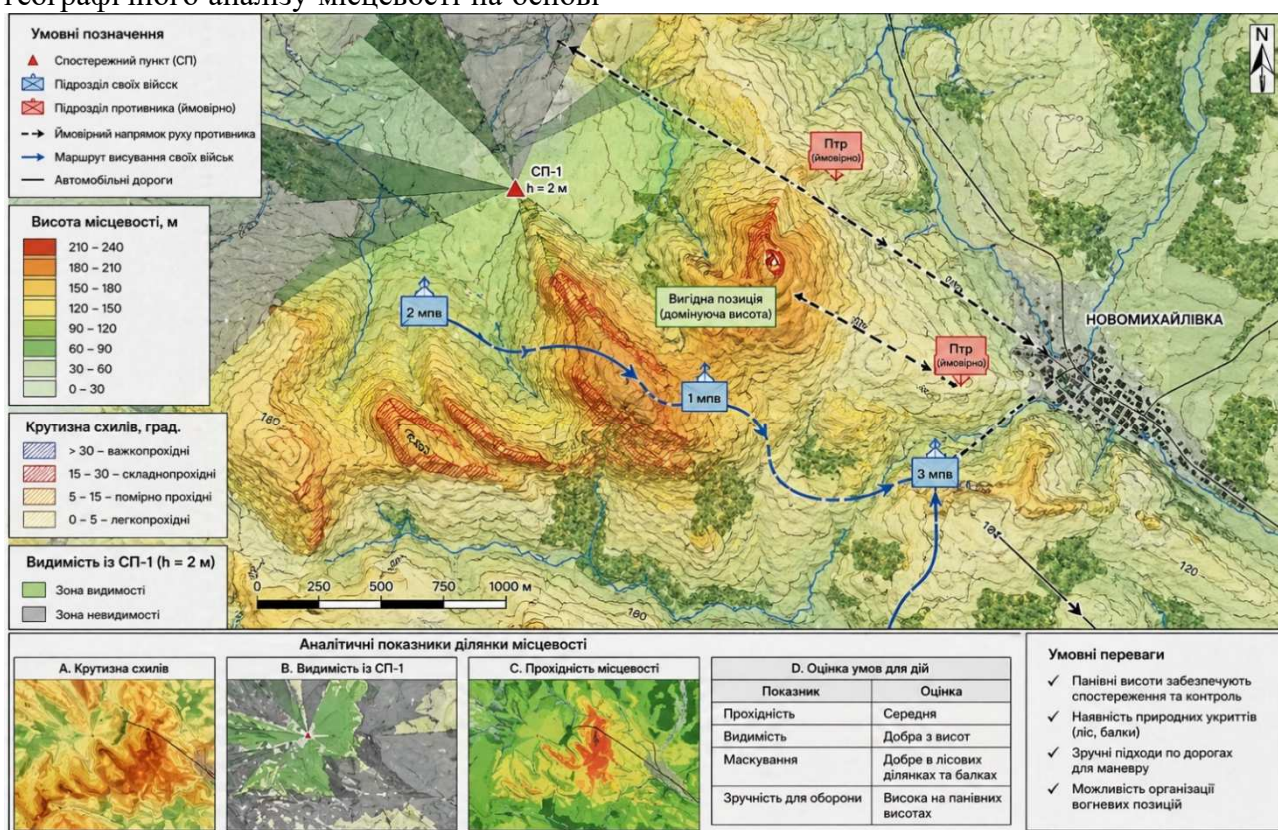


Рисунок 4. Географічний аналіз місцевості на основі 3D моделі на основі DEM у СПЗ «Сіль»

Подальшим етапом узагальнення результатів географічного аналізу є встановлення взаємозв'язку між характеристиками рельєфу місцевості та ефективністю дій у просторі. Якщо попередні етапи дозволили виявити морфологічні особливості території та просторові умови видимості, то на цьому рівні аналізу відбувається їх інтерпретація з позиції впливу на можливості використання місцевості.

Рельєф виступає одним із визначальних факторів, що формує умови функціонування території, впливаючи на доступність окремих ділянок, характер переміщення та просторову взаємодію об'єктів. Зокрема, збільшення крути-

зни схилів, наявність різких перепадів висот та складної конфігурації поверхні призводить до ускладнення переміщення і зниження ефективності використання території. Водночас ділянки з помірним рельєфом та сприятливими умовами огляду забезпечують більш високий рівень просторової доступності та можливостей їх раціонального використання.

Оцінювання ефективності дій у межах території доцільно розглядати як функцію сукупності характеристик рельєфу, серед яких ключовими є крутизна схилів та умови видимості. Узагальнення цього взаємозв'язку дозволяє перейти від описового аналізу до його форма-

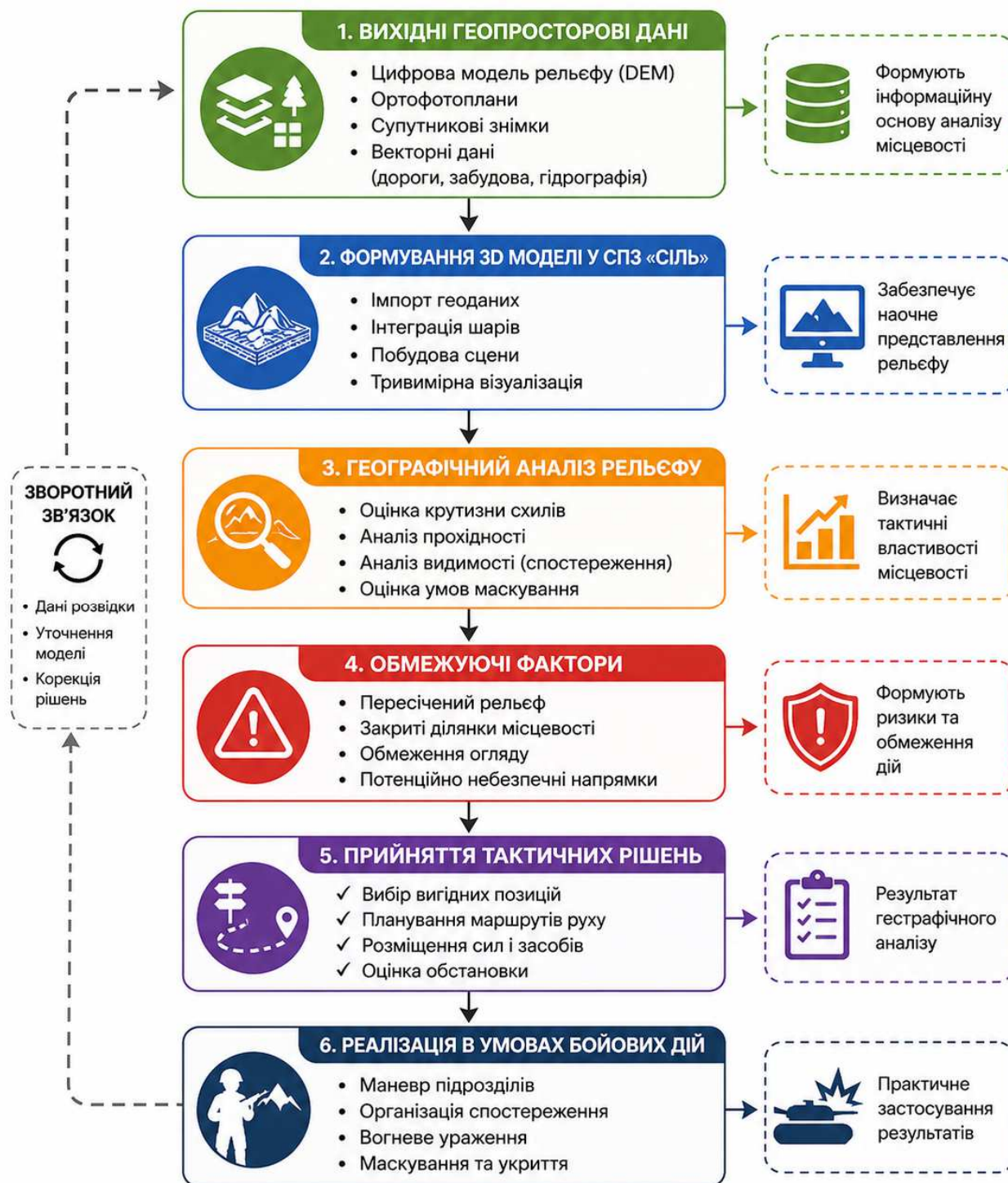


Рисунок 5. Структурно-логічна модель географічного аналізу місцевості на основі DEM у СПЗ «Сіль»

З метою переходу від описового до кількісного географічного аналізу місцевості доцільно формалізувати залежність ефективності використання території від основних характеристик рельєфу. У загальному вигляді ефективність просторових дій може бути представлена як інтегральна функція сукупності параметрів рельєфу:

$$E = w_1 \cdot (1 - \alpha_n) + w_2 \cdot V_n + w_3 \cdot (1 - S_n) \quad (1)$$

де E - інтегральний показник ефективності використання території;
 α_n - нормоване значення крутизни схилів (у діапазоні $[0;1]$);
 V_n - нормований коефіцієнт видимості території;
 S_n - нормований показник складності рельєфу (пересіченості);
 w_1, w_2, w_3 - вагові коефіцієнти, що

відображають відносну важливість кожного параметра (при цьому $w_1+w_2+w_3=1$).

Запропонована залежність дозволяє інтегрувати основні морфологічні характеристики рельєфу у єдиний узагальнений показник, що забезпечує можливість кількісного оцінювання території. Зокрема, збільшення крутизни схилів та складності рельєфу призводить до зниження ефективності, тоді як покращення умов видимості сприяє її зростанню. Нормування параметрів забезпечує їх порівнянність та можливість використання у межах єдиного аналітичного підходу.

Таким чином, введення інтегрального показника ефективності дозволяє перейти від якісного опису рельєфу до його формалізованої

оцінки, що підвищує обґрунтованість прийнятих рішень на основі геопросторових даних.

Для апробації запропонованого підходу виконано умовне порівняння трьох ділянок місцевості в межах Яворівського полігону, що відрізняються за морфологічними характеристиками рельєфу та умовами видимості. У межах дослідження кожній ділянці було надано нормовані значення крутизни схилів, коефіцієнта видимості та складності рельєфу в діапазоні від 0 до 1. Для розрахунку інтегрального показника ефективності використано однакові вагові коефіцієнти $w_1=0,4$, $w_2=0,3$, $w_3=0,3$ що відображає збалансоване врахування прохідності, видимості та загальної пересіченості рельєфу.

Таблиця 1

Результати апробації інтегральної оцінки ефективності використання території

Ділянка	Характеристика місцевості	α_n	V_n	S_n	E
А	Помірні схили, добра видимість, низька пересіченість	0,20	0,80	0,25	0,785
Б	Середня крутизна схилів, частково обмежена видимість	0,45	0,55	0,50	0,535
В	Круті схили, обмежена видимість, висока пересіченість	0,75	0,30	0,80	0,250

Отримані результати свідчать, що найвищий інтегральний показник ефективності має ділянка А, для якої характерні помірні крутизна схилів, сприятливі умови видимості та невисока складність рельєфу. Ділянка Б демонструє середній рівень ефективності, що зумовлено поєднанням помірно ускладненого рельєфу та часткового обмеження видимості. Найнижче значення інтегрального показника отримано для ділянки В, де висока крутизна схилів і значна пересіченість території суттєво обмежують можливість її використання.

Таким чином, апробація запропонованої моделі підтверджує її придатність для порівняльного оцінювання різних ділянок місцевості та дозволяє кількісно інтерпретувати вплив морфологічних характеристик рельєфу на просторові можливості території.

Представлена на рис. 6 залежність відображає графічну інтерпретацію запропонованої моделі.

Представлений графік відображає характер зміни ефективності дій залежно від параметрів рельєфу, зокрема крутизни схилів та умов видимості. Аналіз показує, що зі зростанням складності рельєфу ефективність знижується, тоді як сприятливі умови огляду та помірні

крутизна схилів забезпечують її підвищення. Такий підхід дозволяє інтегрувати результати географічного аналізу у єдину систему оцінювання та підвищує обґрунтованість прийняття рішень на основі просторових характеристик місцевості.

Таким чином, виконаний географічний аналіз місцевості на основі цифрових моделей рельєфу та тривимірної візуалізації дозволив послідовно перейти від загального представлення території до комплексної оцінки її просторових характеристик. Використання DEM забезпечило можливість детального дослідження морфології рельєфу, оцінки умов прохідності та видимості, що у сукупності формує цілісне уявлення про структуру місцевості.

Послідовне поєднання етапів візуалізації, аналізу та узагальнення результатів дозволило обґрунтувати підхід до інтегрованої оцінки території, який базується на взаємозв'язку її основних характеристик. Представлення процесу у вигляді структурно-логічної моделі та встановлення узагальненої залежності ефективності від параметрів рельєфу свідчить про можливість переходу від описового аналізу до його формалізації.

Отримані результати підтверджують, що

використання цифрових моделей рельєфу у поєднанні з тривимірною візуалізацією є ефективним інструментом сучасного географічного аналізу місцевості, який дозволяє підвищити

обґрунтованість оцінювання території та створює передумови для подальшого розвитку методів просторового аналізу.

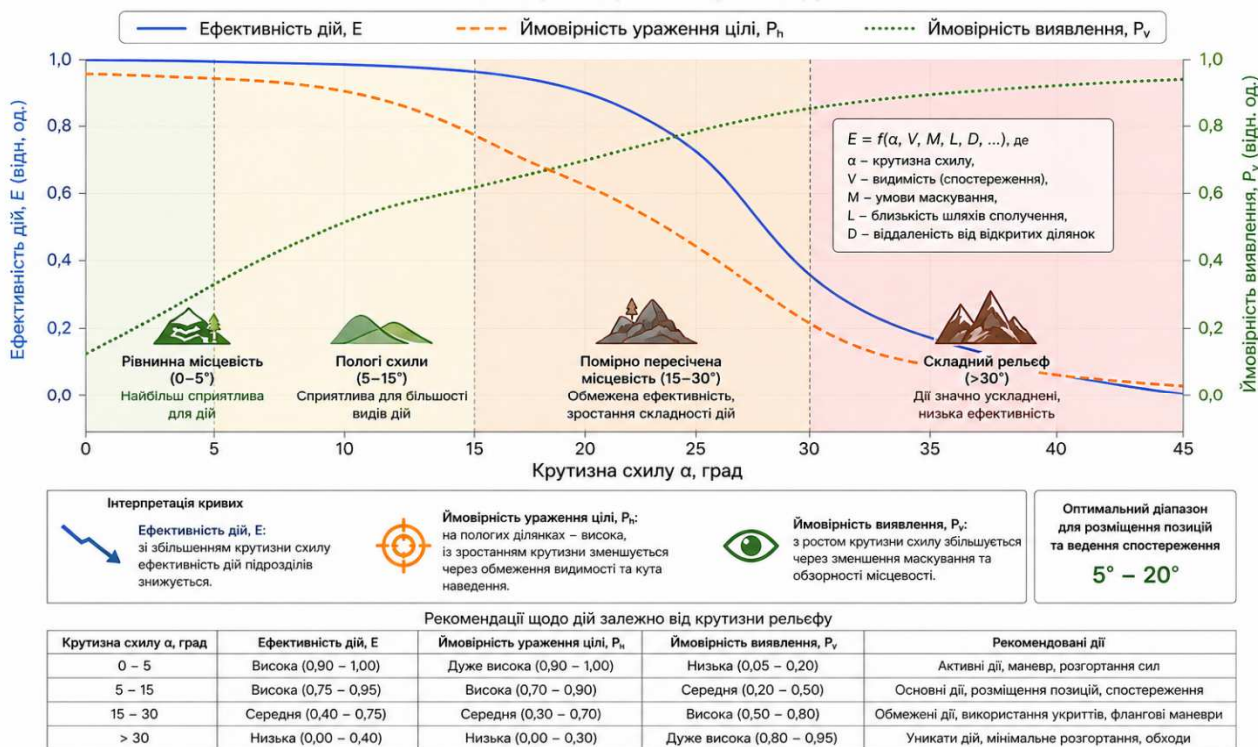


Рисунок 6. Узагальнена залежність ефективності дій підрозділів від характеристик рельєфу

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено можливість ефективного використання цифрових моделей рельєфу (DEM) та засобів тривимірної візуалізації для географічного аналізу території. Застосування DEM із просторовою роздільною здатністю 30 м забезпечує отримання узагальнених характеристик рельєфу, зокрема показників ухилу, експозиції та морфометричних особливостей місцевості.

Аналіз досліджуваної території показав, що переважна її частина характеризується незначними значеннями крутизни схилів, що зумовлено рівнинним характером рельєфу. Водночас виділено ділянки з підвищеними значеннями ухилів, які формують просторову неоднорідність та можуть впливати на функціональне використання території.

Встановлено, що поєднання аналітичних можливостей ГІС та 3D-візуалізації підвищує наочність і точність інтерпретації результатів, що є важливим для задач просторового планування, оцінки територій та раціонального природокористування.

Разом з тим результати дослідження мають певні обмеження, пов'язані з використанням DEM середньої роздільної здатності, що

призводить до згладжування мікрорельєфу та може впливати на точність оцінювання локальних форм поверхні. Це необхідно враховувати під час подальшого застосування отриманих результатів.

Перспективи використання результатів дослідження Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленням методів географічного аналізу місцевості на основі цифрових моделей рельєфу та розширенням можливостей їх практичного використання. Зокрема, доцільним є детальне дослідження впливу просторової роздільної здатності та точності DEM на результати оцінювання морфологічних характеристик рельєфу, умов видимості та просторової доступності території. Це дозволить підвищити достовірність географічного аналізу та обґрунтованість отриманих результатів.

Окремим напрямом подальших робіт може стати розробка методів автоматизованої інтеграції різнорідних геопросторових даних у тривимірному середовищі, зокрема поєднання цифрових моделей рельєфу з даними дистанційного зондування Землі, векторними шарами та тематичною інформацією. Це сприятиме створенню більш комплексних моделей місцевості та розширенню аналітичних можливостей

геоінформаційних систем.

Перспективним є також розвиток підходів до кількісної оцінки придатності території на основі інтегральних показників, що враховують сукупність характеристик рельєфу, зокрема крутизну схилів, експозицію, умови видимості та інші морфологічні параметри. Удосконалення таких моделей дозволить перейти до більш формалізованого просторового аналізу та підвищити рівень обґрунтованості прийняття рішень на основі геопросторових даних. Важливим напрямом є також розширення досліджень у сфері використання тривимірної візуалізації як інструменту інтерпретації географічної інформації. Поєднання 3D-моделей із су-

часними засобами аналізу дозволяє підвищити ефективність сприйняття складних просторових структур та сприяє розвитку нових підходів до дослідження рельєфу.

Крім того, результати дослідження доцільно впроваджувати у навчальний процес підготовки фахівців у галузі географії, геодезії, військової топографії та геоінформаційних технологій. Формування практичних навичок роботи з цифровими моделями рельєфу та тривимірними геоінформаційними середовищами сприятиме підготовці спеціалістів, здатних ефективно застосовувати сучасні методи просторового аналізу у науковій та прикладній діяльності.

Література:

1. Ruzinoor C. M., Shariff A. R. M., Pradhan B. (2012). A review on 3D terrain visualization of GIS data: Techniques and software. -Geo-spatial Information Science, 15(2). -P. 105–116. -DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2012.714101>.
2. Dübel S., Schumann H. (2017). Visualization of Features in 3D Terrain. -ISPRS International Journal of Geo-Information, 6(11). -Article 357. -DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi6110357>.
3. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E. et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. -Reviews of Geophysics, 45. -RG2004. -DOI: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.
4. Zink M., Bachmann M., Bräutigam B. et al. (2014). TanDEM-X: The New Global DEM Takes Shape. -IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2(2). -P. 8–23. -DOI: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2014.2318895>.
5. Rizzoli P., Martone M., Gonzalez C. et al. (2017). Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. -ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 132. -P. 119–139. -DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>.
6. Yin L. (2010). Integrating 3D Visualization and GIS in Planning Education. -Journal of Geography in Higher Education, 34(3). -P. 419–438. -DOI: <https://doi.org/10.1080/03098260903556030>.
7. Philips A., Walz A., Bergner A. et al. (2015). Immersive 3D geovisualization in higher education. -Journal of Geography in Higher Education, 39(3). -P. 437–449. -DOI: <https://doi.org/10.1080/03098265.2015.1066314>.
8. Newcombe N. S. (2016). Thinking spatially in the science classroom. -Current Opinion in Behavioral Sciences, 10. -P. 1–6. -DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.010>.
9. Cohen C. A., Hegarty M. (2012). Inferring cross sections of 3D objects: A new spatial thinking test. -Learning and Individual Differences, 22(6). -P. 868–874. -DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.05.007>.
10. Гунько І. С. (2023). Аналіз методів побудови цифрової моделі рельєфу на основі просторової інтерполяції (частина 1). -Комунальне господарство міст, 3(177). -С. 74–79. -DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-74-79>.
11. Рожі І. Г., Рожі Т. А., Федій О. А. (2024). Геодезичні аспекти створення цифрових моделей рельєфу для потреб геоінформаційних систем. -Просторовий розвиток, 8. -С. 477–491. -DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.477-491>.
12. Chetverikov V., Babiy L., Kuzyk Z. et al. (2022). Study of digital elevation models of objects of historical and cultural heritage created over different years. Geodesy, Cartography and Aerial Photography, 96. -P. 14–23. -DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2022.96.014>.
13. Vovk A., Hlotov V., Hunina A. et al. (2015). Analysis of the results of the use UAV Trimble UX-5 for creation of orthophotomaps and digital model of relief. Geodesy, Cartography and Aerial Photography, 81. -P. 90–103. -DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2015.01.090>.

References:

1. Ruzinoor, C. M., Shariff, A. R. M., Pradhan, B., 2012. A review on 3D terrain visualization of GIS data: Techniques and software. Geo-spatial Information Science, 15(2), pp. 105–116. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2012.714101>.
2. Dübel, S., Schumann, H., 2017. Visualization of features in 3D terrain. ISPRS International Journal of Geo-Information, 6(11), Article 357. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi6110357>.
3. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E. et al., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45, RG2004. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.
4. Zink, M., Bachmann, M., Bräutigam, B. et al., 2014. TanDEM-X: The new global DEM takes shape. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2(2), pp. 8–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2014.2318895>.
5. Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C. et al., 2017. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 132, pp. 119–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>.
6. Yin, L., 2010. Integrating 3D visualization and GIS in planning education. Journal of Geography in Higher Education, 34(3), pp. 419–438. DOI: <https://doi.org/10.1080/03098260903556030>.
7. Philips, A., Walz, A., Bergner, A. et al., 2015. Immersive 3D geovisualization in higher education. Journal of Geography in Higher Education, 39(3), pp. 437–449. DOI: <https://doi.org/10.1080/03098265.2015.1066314>.
8. Newcombe, N. S., 2016. Thinking spatially in the science classroom. Current Opinion in Behavioral Sciences, 10, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.010>.
9. Cohen, C. A., Hegarty, M., 2012. Inferring cross sections of 3D objects: A new spatial thinking test. Learning and Individual Differences, 22(6), pp. 868–874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.05.007>.

10. Hunko, I. S., 2023. Analiz metodiv pobudovy tsyfrovoy modeli reliefu na osnovi prostorovoi interpolatsii (chastyna 1). [Analysis of methods for constructing digital elevation models based on spatial interpolation (part 1)]. Komunalne hospodarstvo mist, 3(177), pp. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-74-79> (in Ukrainian).
11. Rozhi, I. H., Rozhi, T. A., Fedii, O. A., 2024. Heodezychni aspekty stvorennia tsyfrovyykh modelei reliefu dlia potreb heoinformatsiinykh system. [Geodetic aspects of creating digital elevation models for GIS applications]. Prostorovyi rozvytok, 8, pp. 477–491. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.477-491> (in Ukrainian).
12. Chetverikov, B., Babiy, L., Kuzyk, Z. et al., 2022. Study of digital elevation models of objects of historical and cultural heritage created over different years. Geodesy, Cartography and Aerial Photography, 96, pp. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2022.96.014>.
13. Vovk, A., Hlotov, V., Hunina, A. et al., 2015. Analysis of the results of the use UAV Trimble UX-5 for creation of orthophotomaps and digital model of relief. Geodesy, Cartography and Aerial Photography, 81, pp. 90–103. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2015.01.090>.

Надійшла до редакції 25.03.2026 р.

Прийнята до друку 21.04.2026 р.

Опублікована 26.05.2026 р.

