

ФІЗИЧНА ГЕОГРАФІЯ

УДК 911.2:551.435.1

DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.26.2.3>

Ігор КАСІЯНИК, кандидат географічних наук,
доцент, завідувач кафедри географії та методики її викладання,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2612-7969>

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка,
32301, Огієнка, 61, м. Кам'янець-Подільський, Україна

Владислав ГАРБАР, кандидат географічних наук,
старший викладач кафедри географії та методики її викладання,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9400-7606>

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка,
32301, Огієнка, 61, м. Кам'янець-Подільський, Україна

Любов КАСІЯНИК, старший науковий співробітник,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1695-1244>

Національний природний парк «Подільські Товтри»,
32301, пл. Польський ринок, 6, м. Кам'янець-Подільський, Україна

Ольга МАТУЗ, асистент

кафедри географії та методики її викладання,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3233-9565>

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка,
32301, Огієнка, 61, м. Кам'янець-Подільський, Україна

Любов ПАСЕКА, вчитель методист,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7980-3034>

Кам'янець-Подільський ліцей №14

32300, вул. Героїв Небесної Сотні, 17, м. Кам'янець-Подільський, Україна

ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ МАЛЮНКІВ ГІДРОМЕРЕЖІ РІЧКИ СМОТРИЧ ЯК ІНДИКАТОРА ГЕОМОРФОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Проаналізовано просторову структуру гідромережі річки Смотрич з метою ідентифікації напрямів геоморфологічних процесів для потреб збалансованого природокористування. Досліджено вплив тектонічних рухів, розломів та реліктового рельєфу на формування локальних малюнків гідромережі, таких як деревоподібний, радіальний, кільцевий та паралельний. Виділено 10 локацій відцентрового малюнка, що безпосередньо вказують на локальні підняття, та проаналізовано зони активних річкових перехватів із басейнами Південного Бугу, Мукиї, Жванчика тощо. За просторовими особливостями малюнків гідромережі територію басейну Смотрича районувано на 5 специфічних ділянок: нижньої течії, товтрову, середньої течії, верхньої течії та верхів'я. Встановлено 4 етапи формування гідромережі у тісному взаємозв'язку з регресивною ерозією та розвитком долини річки Дністер — від межі нижнього та середнього плейстоцену до голоцену. Спрогнозовано подальший розвиток ерозійних процесів, яроутворення, поглиблення русел та формування нових перехватів, що має вагомим практичне значення для розробки довгострокових прогнозів стану водних об'єктів та регіонального моніторингу.

Ключові слова: *річка Смотрич, геоморфологічні процеси, просторове моделювання, річкові перехвати, тектонічні рухи, етапи формування гідромережі.*



Ihor KASIANIK, Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor, Head of the Department of Geography and Methods of Its Teaching,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2612-7969>

Kamianets-Podilskyi Ivan Ohienko National University,
32300, Ohienko St, 61, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Vladyslav HARBAR, Candidate of Geographical Sciences,
Senior Lecturer, Department of Geography and Teaching Methods,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9400-7606>
Kamianets-Podilskyi Ivan Ohiienko National University,
32300, Ohiienko St, 61, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Liubov KASHANIK, Senior Researcher,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1695-1244>
National Nature Park "Podilski Tovtry",
32301, Polskyi Rynok Sq., 6, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Olga MATUZ, Assistant Professor,
Department of Geography and teaching methods,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3233-9565>
Kamianets-Podilskyi Ivan Ohiienko National University,
32300, Ohiienko St, 61, Kamianets-Podilskyi, Ukraine,

Liubov PASEKA, Methodist teacher,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7980-3034>
Kamianets-Podilskyi Lyceum No. 14
32300, 17 Heroes of the Heavenly Hundred st., Kamianets-Podilskyi, Ukraine,

SPATIAL MODELING OF LOCAL PATTERNS OF THE SMOTRYCH RIVER HYDROGRAPHIC NETWORK AS AN INDICATOR OF GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES

The presented article is devoted to the comprehensive spatial modeling of local drainage patterns within the Smotrych River hydrographic network, utilizing these patterns as precise indicators of active and historical geomorphological processes. Forecasting hydrological dynamics in the watercourses of the Podolian region requires the continuous development and refinement of monitoring methodologies. The drainage pattern serves as a direct manifestation of geomorphological evolution; therefore, employing a spatial model that integrates typical patterns and reflects the geographical conditions of the territory allows for the reconstruction of past developmental stages and the automated prediction of future environmental changes. The primary aim of this research is to identify the underlying trends of geomorphological processes in the Smotrych River basin to facilitate balanced nature management and sustainable regional planning.

The Smotrych River, a typical left-bank tributary of the Dniester River located within the Podolian Upland, exhibits active erosional processes, including the continuous deepening of existing channels and the active development of new gullies and ravines. Furthermore, the basin is characterized by pronounced river captures involving neighboring river networks. The foundational tectonic structure of the studied territory is determined by its position on the southwestern periphery of the East European Platform, specifically within the Podolian Precambrian transverse uplift. The spatial variations in the hydrographic network are primarily dictated by a complex system of faults and fractures. Ancient faults, such as the Antopil fault, dictate the axial alignment of the main river, while younger faults, like the Tovtry fault, divide the territory into distinct structural blocks—a lowered southern part and an uplifted northern part.

Through detailed spatial analysis, the study identifies the direct influence of tectonic movements on the formation of radial and annular drainage patterns. The authors analyzed ten specific locations exhibiting centrifugal patterns, which directly indicate localized tectonic uplifts. Uneven channel drops in these zones highlight ongoing competition for catchment areas, with the Smotrych network actively expanding at the expense of neighboring basins in certain locations. An explicit annular pattern was identified in the headwaters of the Trostianets River tributaries, corresponding to a local tectonic uplift.

Relief and lithology act as equally critical factors in the basin's formation. The alternation of plains and remnant ridges results in parallel and dendritic network configurations. The defining role of relief is particularly evident in the Tovtry zone of the basin, where the relict relief of the main and lateral reef ridges has led to the formation of closed basins and sub-annular channel configurations, often forming an "atoll trap". Additionally, lithological transitions, such as the river reaching Paleozoic sedimentary surfaces or Silurian deposits, trigger the formation of waterfalls, swampy floodplains, and deeply incised mego-shaped meanders along ancient faults.

Active zones of river captures are traced throughout the basin, being most pronounced in the northern section and the peripheries of the middle and upper courses. The study documents the capture of the Southern Bug basin, evidenced by the sub-latitudinal orientation of the Smotrych headwaters. Well-defined captures of the Muksha River headwaters by the Chornyvodka and Dvoyatynka tributaries are also analyzed, alongside captures of the Zhvanchyk River headwaters by the Skvyla and Soroka rivers.

Based on the distinct variations in regional drainage patterns, the researchers divided the Smotrych basin into five specific geomorphological zones: the lower course (characterized by high asymmetry and waterfalls), the Tovtry zone (featuring a reverse-symmetric pattern restricted by ridges), the middle course (highly asymmetric with large

parallel tributaries like Yaromyrka on the right bank), the upper course (displaying a symmetric dendritic pattern up to 40 km wide), and the headwaters (characterized by a straight, sub-latitudinal main channel with pronounced capture hooks).

Finally, the spatial structure analysis enables the identification of four distinct evolutionary stages of the hydrographic network, deeply connected to the regressive erosion of the Dniester River valley: the boundary of the Early and Middle Pleistocene, the Middle Pleistocene, the Late Pleistocene, and the Holocene. The study concludes that the deepening of main and tributary channels is ongoing. Anthropogenic factors, such as deforestation on watershed remnants, land reclamation, and the destruction of artificial reservoir dams, actively accelerate linear erosion, gully formation, and new river captures. The developed spatial models provide a crucial foundation for the long-term forecasting of regional water bodies and the mitigation of destructive anthropogenic impacts.

Keywords: hydrographic network pattern, Smotrych River, geomorphological processes, spatial modeling, river captures, tectonic movements, stages of hydrographic network formation



Постановка науково-практичної проблеми, актуальність і новизна дослідження. Прогнозування гідрологічних процесів у межах водотоків подільського регіону потребує розробки нових ефективних та удосконалення існуючих методик моніторингу. Малюнок гідромережі вказує на фактор прояву геоморфологічного процесу і використання просторової моделі, що включає типові малюнки та відображає географічні умови території дозволяє відтворити етапи розвитку таких процесів у минулому і спрогнозувати їх у майбутньому в автоматичному режимі. Застосування методики на прикладі р. Смотрич може бути використана для моніторингу і прогнозування геоморфологічних процесів інших лівобережних приток р. Дністер.

Розвиток господарства та збереження природи у певному регіоні можна ефективно забезпечити лише тоді коли зрозуміла спрямованість процесів розвитку природи і можливо передбачити наслідки впливу на компоненти ландшафтів. Річкові басейни виступають автономними регіонами, які розвиваються як окремі природно-господарські системи, а їх гідрологічні мережі демонструють особливості перебігу основних процесів.

Річка Смотрич є типовою лівобережною притокою р. Дністер в межах Подільської височини. Тут активно проявляються ерозійні процеси з поглиблення русел, що вже існують та розвитку нових молодих ярів та балок. Крім того виражені перехвати сусідніх річкових мереж. Як наслідок, в умовах сучасного господарського освоєння, відбувається деструктивний вплив на ґрунтовий покрив та перебудова локальних ландшафтів, що має виражені екологічні та економічні наслідки. Вивчення чинників формування гідрологічної мережі р. Смотрич, їх регіональних особливостей та етапів розвитку, дозволить прогнозувати перебіг природних процесів у майбутньому та створити модель для моніторингу подібних процесів.

Публікація демонструє авторські картог-

рафічні моделі просторової структури мережі р. Смотрич та її окремих характеристик, вперше виокремлені етапи регіонального розвитку гідромережі р. Смотрич та обґрунтовані наслідки перебігу природних процесів у окремих частинах басейну річки.

Тематика публікації відображає проблематику розробки механізмів вирішення основних регіональних завдань Дністровського басейнового управління водних ресурсів, зокрема: проведення моніторингу якості поверхневих вод для господарських потреб; передбачення та мінімізацію регіональних наслідків підтоплення, паводків та повеней, а також розроблення оперативних та довгострокових прогнозів змін стану водних об'єктів.

Метою дослідження є ідентифікація трендів прояву геоморфологічних процесів у басейні р. Смотрич на основі аналізу малюнків гідромережі для потреб збалансованого природокористування.

Аналіз останніх публікацій за темою дослідження. Зокрема процеси формування річкових мереж регіону дослідження охарактеризовані у працях К. Геренчука [3], Й. Свинка [5]. Гідрологічні та особливості р. Смотрич розкриті в публікаціях І. Федорчука [8]. Зв'язок розвитку річкових мереж лівих приток р. Дністер із формуванням її долини розкривається у дослідженнях Р. Бойка (2007).

Детальний аналіз геоморфологічної будови басейну річки Смотрич здійснено у публікації В. Самара. Зокрема охарактеризовані особливості будови річкових долин, вододілів, схилів та долин тимчасових водотоків з позицій геоморфологічного районування, з виокремленням 5 частин.

Характеристика малюнка річкової мережі як морфометричного індикатора її розвитку на матеріалах басейну р. Сірет, у суміжному регіоні, здійснена І. Березкою. Зокрема встановлено локальний вплив тектонічних чинників та реліктового рельєфу.

Проблеми трансформацій гідромережі

внаслідок антропогенних процесів на прикладі прилеглої, до регіону дослідження, території (у басейні річки Гнізни) а також їх вплив на характер стоку висвітлено у публікаціях Царика В.

Питання використання просторового та морфометричного аналізу, цифрових моделей рельєфу (ЦМР) для дослідження флювіальних процесів, еволюції ерозійних мереж і динаміки руслових систем активно розробляються у працях І. Ковальчука, О. Ободовського, В. Стецюка А. Мельника та ін.

Виклад основного матеріалу. Просторову структуру гідромережі відображає її малюнок. На ньому зазвичай показують головні річки, їхні притоки, напрямки течії, а також іноді вододіли та межі річкових басейнів. Такий підхід – дозволяє узагальнити складну природну систему та зробити її зрозумілою для вивчення. Серед найпоширеніших типів малюнка гідромережі виділяють деревоподібний, пір'ястий, паралельний, радіальний, гратчастий та кільцевий. Кожен з них відображає специфічні природні умови формування водотоків. [1, 5].

Річка Смотрич – ліва притока Дністра, гідромережа якої розміщена в південній частині Хмельницької області. Має довжину – 169 км, і площу водозбірного басейну – 1800 км². Вона бере початок з джерел біля с. Андрійківці Хмельницького району і протікає спочатку в субширотному напрямку із сходу на захід до с. Кузьмин, а далі змінює напрям на південний майже субмеридіональний та досягає гирла в с. Устя Кам'янець-Подільського району. Найбільшими населеними пунктами у її межах є м. Городок, смт. Смотрич та м. Кам'янець-Подільський. Усі притоки належать до категорії малих річок [3].

Основні риси тектонічної структури визначаються положенням території на південно-західній периферії Східно-Європейської платформи. Горизонтальна будова включає архейсько-ранньопротерозойський кристалічний фундамент та осадовий чохол потужністю понад 400 м. Просторові тектонічні відмінності обумовлені передусім мережею розломів і тріщин, які відрізняються за віком, глибиною закладання, орієнтованістю в просторі, рівнем сучасної активності, деталізацією вивчення й точністю просторової ідентифікації (Рис 1).

Давні розломи закладені перед формуванням осадового чохла або на ранніх його етапах. Прикладом є Антопільський розлом, по якому закладена осьова частина мережі р. Смотрич. Молоді розломні порушення, зокрема Товтровий розлом поділяє досліджувану територію

на дві структурні частини – низьку південну та підняту північну, визначає локальний малюнок гідромережі на конфігурацію долини основного водотоку.

Розломи поділяють фундамент та осадовий чохол на окремі тектонічні блоки. Залежно від активності та тенденцій прояву рухів блоки зміщуються між собою. Такі зміщення відображають регіональні особливості розвитку рельєфу закладання водотоків. Тектонічною структурою I порядку, у межах якої повністю розміщена досліджувана територія, є Подільський докембрійський поперечний виступ українського кристалічного щита. Блоками II порядку можна гіпотетично вважати Кам'янець-Подільський та Хмельницький. Блоки III порядку виокремлюються за гіпсометричними уступами по межах молодих паралельних до Товтрового.

Локальні тектонічні структури є прямим наслідком функціонування структур вищого рангу. Найбільш виявлені їх прояви характерні на межах тектонічних блоків та контакту розломів. Типовим прикладом є велике концентричне підняття, в межах с. Рихта [7]. Його наслідками є загальне підвищення рівня блоку, активізація ерозії, зміщення вододілу між р. Смотрич та р. Жванчик.

Рельєф території дослідження характеризують відмітки абсолютної висоти поверхні, реліктові та сучасні ерозійні елементи. Загальний нахил поверхні визначив меридіональну орієнтацію головного водотоку. Реліктовими є давні долини (поплави) та останцеві гряди пліоцен-ранньоплейстоценових водотоків, що існували тут до закладання мережі р. Смотрич. Вони частково збережені на вододілах та збігаються із орієнтацією молодих розломів. Їх роль визначальна в закладанні і розвитку субширотних приток, конфігурації басейну та умовах взаємодії із сусідніми притоками. До найважливіших параметрів сучасного рельєфу можна віднести глибину врізання, показники падіння водотоків та будову долин на різних ділянках гідромережі.

Показниками впливу на формування гідромережі тектонічних рухів є радіальний або кільцевий малюнок гідромережі. Відцентровий радіальний малюнок, вказує на локальні підняття. Слід зауважити, що такий малюнок може формуватися також під впливом рельєфу, наприклад при активізації лінійної ерозії на вододільних останцях після знищення там природної деревної рослинності. Для аналізу було обрано 10 виражених локацій (Табл. 1, Рис. 2, 3).

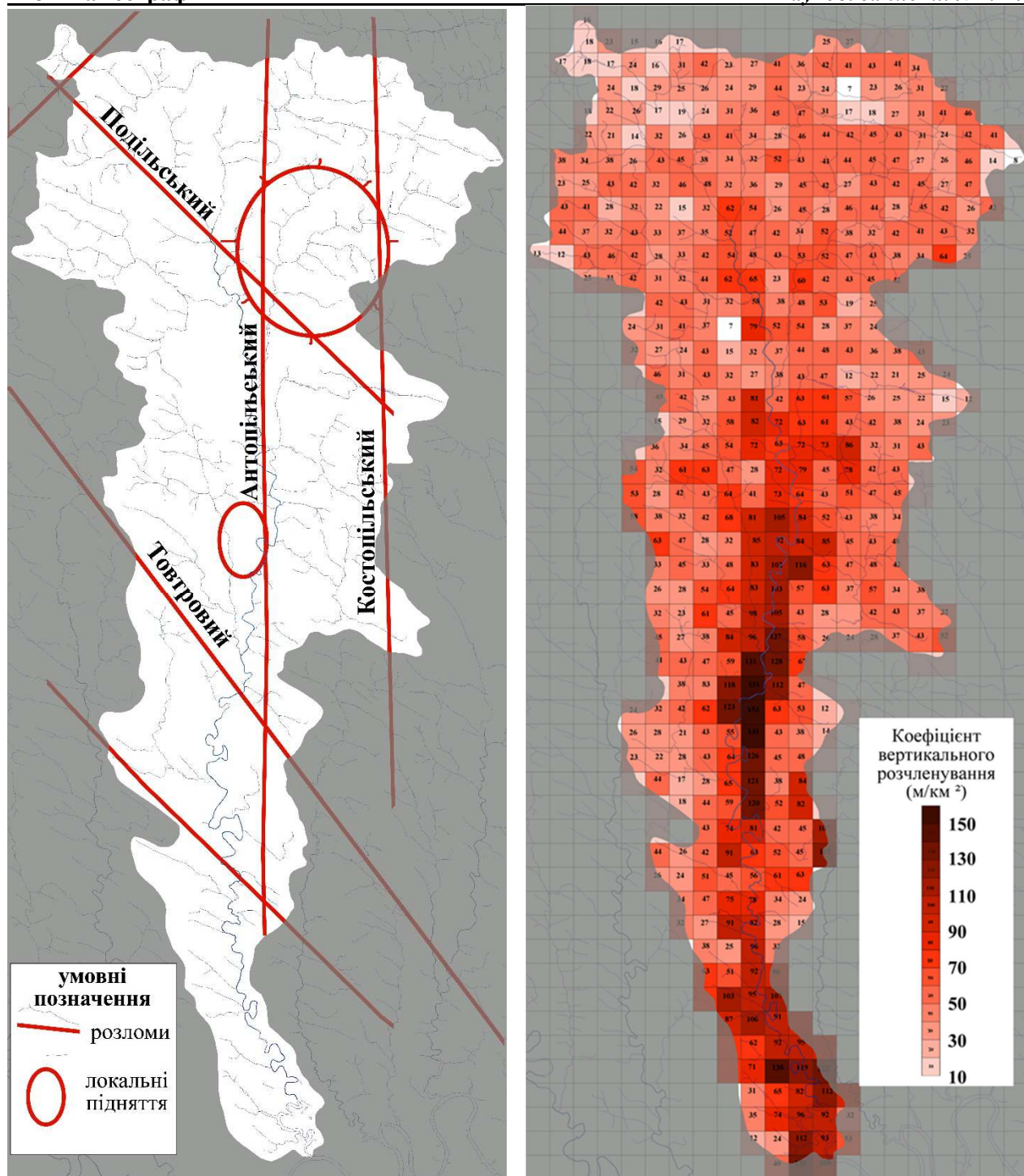


Рис. 1. Схеми поширення основних тектонічних структур та ерозійної розчленованості у межах басейну р. Смотрич (розроблено авторами)

Таблиця 1

Локації прояву відцентрового малюнка гідромереж р. Смотрич та сусідніх водотоків

N з/п	Місце прояву	Річкові мережі	Порядок водотоку	Локальні падіння русла	Регіональні особливості
1	с. Немиченці	Смотрич	III	7-9 м/км	Лісовий масив у найвищій ділянці. Заболочені заплави
		Південний Буг	III	10-12 м/км	
2	с. Верхівці	Тростянець	III	24-5 м/км	Лісовий масив у найвищій ділянці.
		Ушиця	II	18-22 м/км	
3	с. Підлісний Олексинець	Тростянець	III	21-18 м/км	Лісовий масив по усьому вододілу. Мережі ставків на руслах.
		Ушиця	витік	15-16 м/км	
4	с. Косогорівка	Чорниводка	IV	6-7 м/км	виражені перепади вододілу

		Студениця	I-II	17 – 19 м/км	між притоками р. Тернава та р. Смотрич у двох місцях. Заболочена долина р. Тернава
		Тернава	витік	5-6 м/км	
5	с. Малий Карабчієв	Чорниводка	IV	5-6 м/км	Контакт двох протилежних витоків р. Чорниводка. Повністю розораний вододіл.
		Тернава	I	5-6 м/км	
6	с. Довжок.	Смотрич	I	26-28 м/км	Великий лісовий масив на вододілі. Водоспади на притоках р. Смотрич.
		Жванчик	II	20-22 м/км	
7	с. Велика Яромирка	Яромирка	II-III	18-20	Лісовий масив на вододілі.
		Жванчик	I-II	18-20	
8	с. Борщівка	Сорока	III	28-30	Лісовий масив на вододілі.
		Жванчик	витік	18	
9	с. Варівці	Смотрич	I	20-15	Виражений самоперехват приток р. Смотрич. Лісовий масив на вододілі.
		Тростянець	III	28-32	
10	с. Лисогірка,	Смотрич	I	28	Лісовий масив на вододілі.
		Яромирка	II-III	18-20	

Локації зосереджені переважно у верхній та середній частині басейну найчастіше в зонах контакту із басейнами сусідніх водотоків. Нерівномірні показники падіння русел водотоків свідчать про переваги у захопленні водозбірного басейну і потенційне розширення гідромережі р. Смотрич для локацій 2, 3, 6 та 8. Тоді як у локаціях 1, 4 перевагу мають гідромережі сусідніх водотоків. Поширення протиерозійних лісових масивів (особливо великих за площею)

на вододілах підтверджують активізацію ерозійних процесів, що може вказувати на тектонічну активність, а прилеглі покинуті долини в локації 4 вказують на роль палеорельєфу.

Єдиний виражений кільцевий малюнок гідромережі спостерігається у конфігурації верхів'їв приток р. Тростянець (Рис. 2). Що відповідає локальному тектонічному підняттю. Ділянки низхідних рухів чітко не встановлені.



Рис. 2. Елемент кільцевого малюнку гідромережі р. Тростянець (розроблено авторами)

Зони без вираженого напрямку стоку виявлені біля с. Велика Яромирка (урочище «Недобір» у верхів'ї р. Яромирка), с. Слобідка-Смотрицька (улоговина між Товтровими грядями) та біля с. Волудринці і с. Турчинці (реліктові долини). Їх походження обумовлене спільним впливом вихідного рельєфу та проявів тектонічних підняття на прилеглих територіях.

Вплив розломів на прямолінійне або гратчасте закладання русел прослідковується на усьому протязі головного водотоку та його найбільших приток по давніх меридіональних розломах. Для малих приток першого порядку характерне діагональне закладання по молодих розломах чи тектонічних тріщинах. Це підтвер-

джує обернено-симетричне простягання таких водотоків. Зони перехрещення меридіональних та діагональних розломів виявляються у закладанні врізаних омега-подібних меандрів, що є виразною особливістю долини р. Смотрич.

Прикладами впливу літологічної поверхні є: ділянка південніше м. Городок між впадіннями р. Тростянець та р. Чорниводка, що характеризується розширеною заболоченою заплавою оскільки русло досягає палеозойської поверхні осадового чохла; а також ділянка лівого берега від с. Голосків до с. Панівці, де притоки виражені лише водоспадами із скельних уступів після виходу підземних вод.

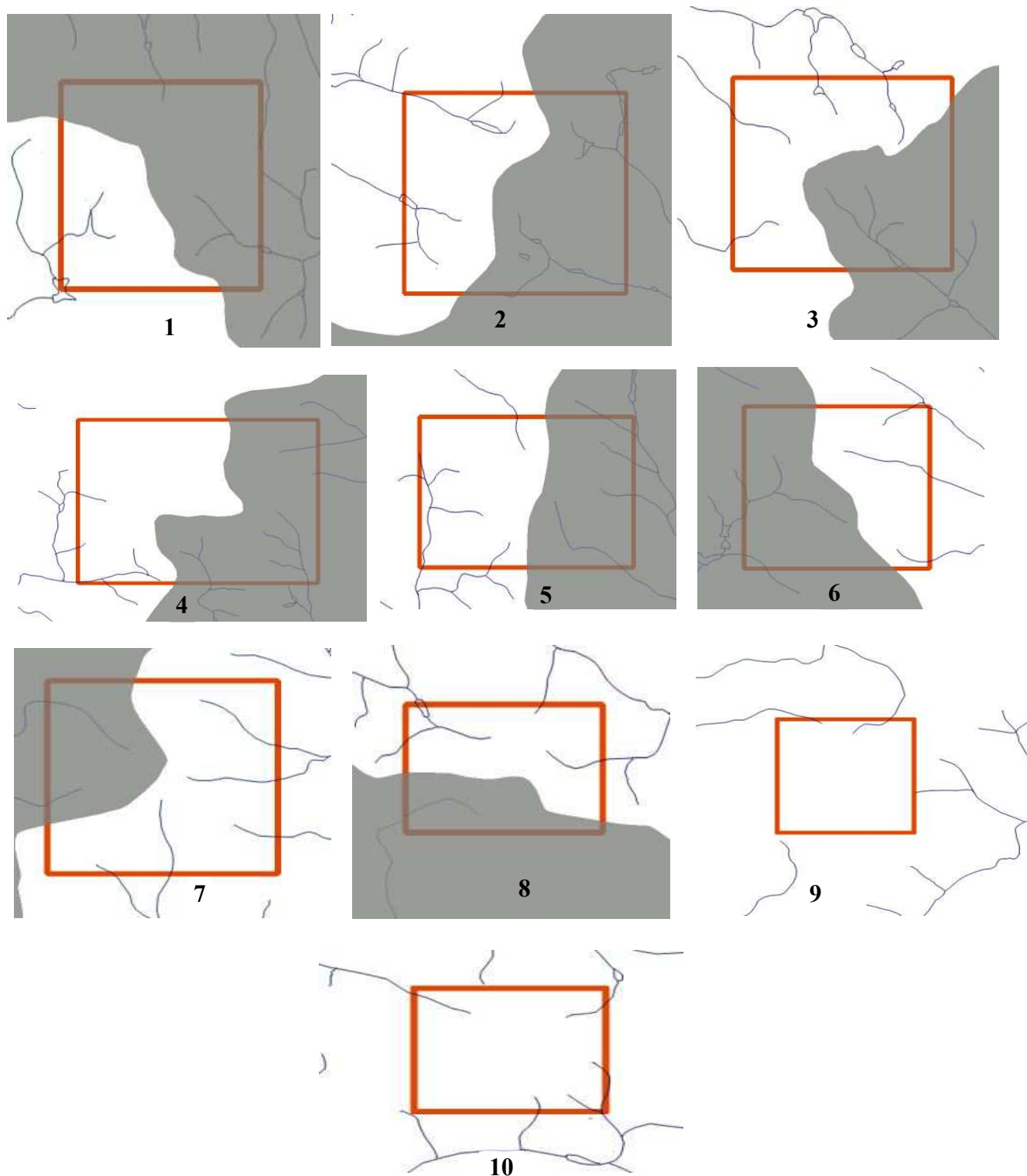


Рис. 3. Локації прояву відцентрового малюнка гідромереж р. Смотрич та сусідніх водотоків (нумерація відповідно до Таблиці 1) (розроблено авторами)

Роль рельєфу як головного чинника формування гідромережі простежуються у чергуванні рівнин та останцевих гряд на різних ділянках басейну. Їх ідентифікують паралельний (Рис. 4.1) та деревоподібний (Рис. 4.3) малюнки мережі при прорізання реліктових вододілів, а також рівнинні депресії (Рис. 4.2) з успадкова-

ними реліктовими руслами з невираженою течією та зонами заболочення на вододілах. Найбільш виражений вплив рельєфу на формування гідросітки у верхній частині басейну на контакті з басейнами р. Збруч та р. Південний Буг.

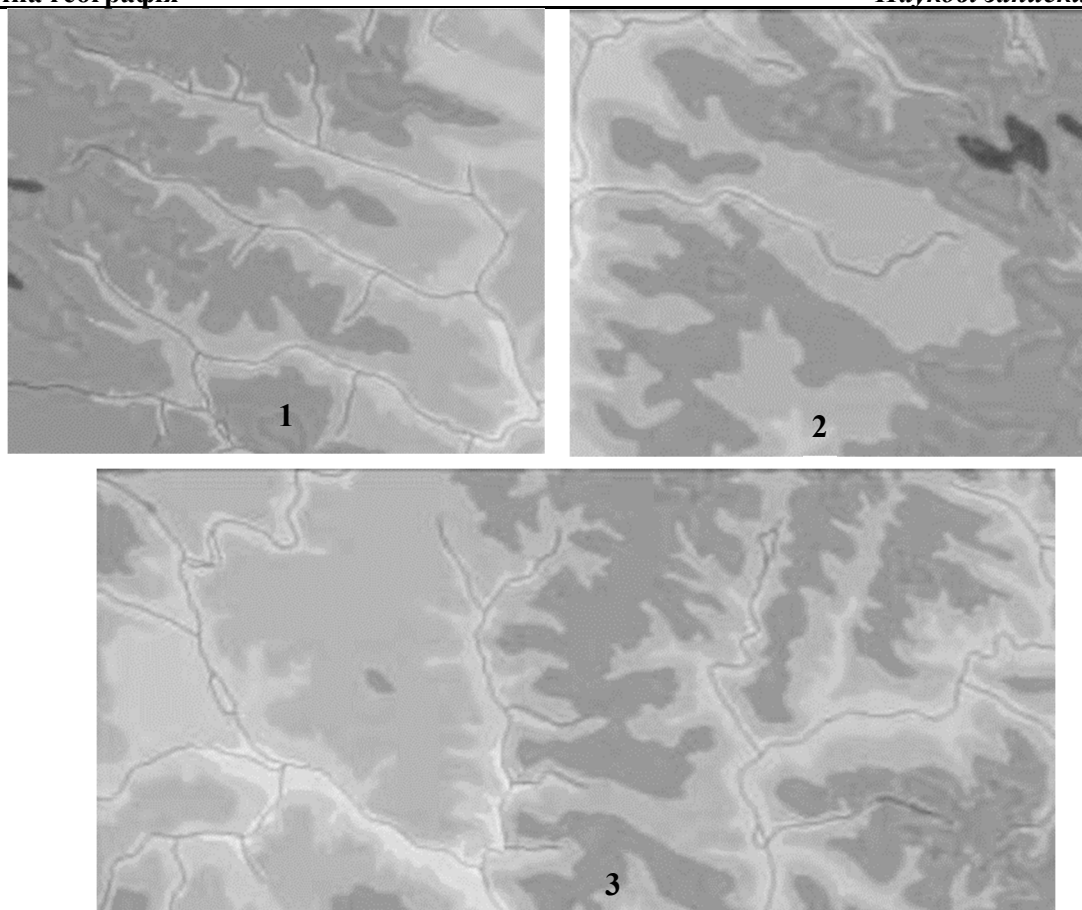


Рис. 4. Візуалізація залежності локальних малюнків гідромережі від рельєфу

Визначальна роль рельєфу у поєднанні з літологічним фактором характерна для Товтрової зони басейну р. Смотрич. Реліктовий рельєф Головної та бічних гряд рифових масивів обумовив формування замкнених котловин у верхів'ях приток та субкільцеву конфігурація їх русел.

Зони річкових перехватів простежуються на усіх відрізках гідромережі. Для південних і центральних частин вони виражені слабше у малюнку гідромережі оскільки тут тривалий час домінує тектонічний чинник розвитку водотоків. У північній частині та на периферіях басейну у центральній та верхній течії вони є найбільш вираженими наслідками розвитку гідромережі.

Перехват долини басейну р. Південний Буг проявляється у субширотній орієнтації витоків р. Смотрич від с. Андрійківці до с. Кузьмин та перистоподібній орієнтації притоків I порядку.

Добре виражені перехвати верхів'їв р. Мукша лівими притоками р. Смотрич, зокрема річками Чорноводкою та Двоятинкою. Тут простежуються добре збережені відтинки реліктових долин меридіональної орієнтації із перебудованим руслом (Рис. 5). При цьому у межах р. Двоятинка урвищні береги свідчать про

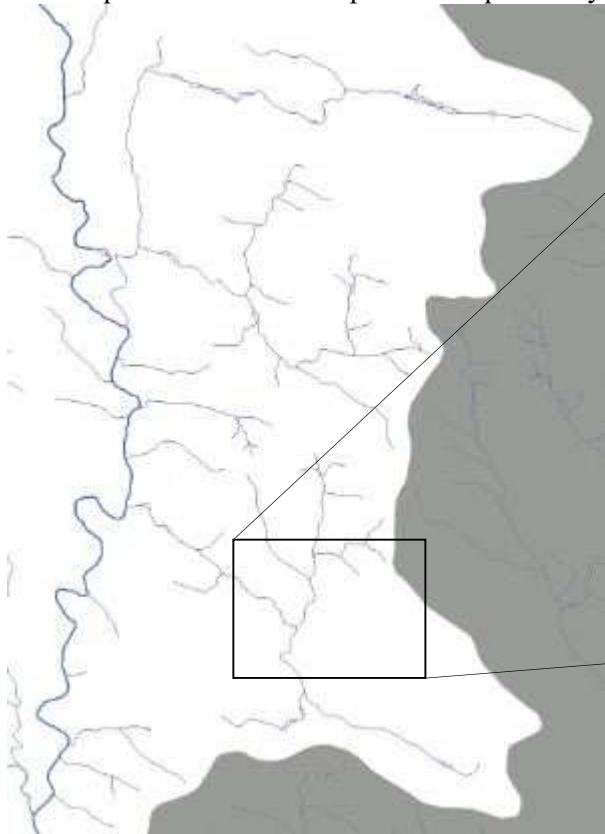
прояви лінійної ерозії в останні роки.

Регіональний малюнок гідромережі суттєво відрізняється в різних частинах басейну відображаючи особливості впливу основних чинників. Загалом можна виокремити п'ять ділянок що у загальних рисах не суперечать геоморфологічному районуванню долини р. Смотрич [4]:

1. Ділянка нижньої течії. Від гирла до с. Велике Залісся. Ширина басейну найменша, коливається від 6 км. (у межах м. Кам'янець-Подільський) до 8-10 км, досягаючи максимуму у північній частині. Коефіцієнт звивистості – 2,1. Виражена асиметрія з розвитком притоків на правому березі довжиною до 10 км та практично відсутніми протяжними притоками на лівому березі. Останні представлені численними виходами ґрунтових вод у надканьйонній частині річкової долини що формують водоспади в зоні поширення відкладів Цвиклівської світи силуру. Північніше (в зоні підстилаючої поверхні Голосківських та Устівських верств), розвиваються балки, довжина яких корелює з потужністю зазначених відкладів.

2. Товтрова ділянка. Від с. Велике Залісся до селища Смотрич. Коефіцієнт звивистості – 2,4. Ширина басейну від 10 до 18 км. Виражений обернено-симетричний малюнок простя-

гання приток на берегах. При цьому на правобережна притока р. Батяг має виражений гак перехвату за яким русло перебудоване в меридіональному напрямі. Спільним для усіх приток є обмеження їх росту Товтровою грядою в межах якої верхів'я кожної з приток потрапляє у



«Атолову пастку» сформовану бічними грядами та основним пасмом.

Перехвати верхів'їв р. Жванчик простежуються в структурі гідромереж річки Сквила та р. Сорока. На вододілі виражена покинута заболочена долина.

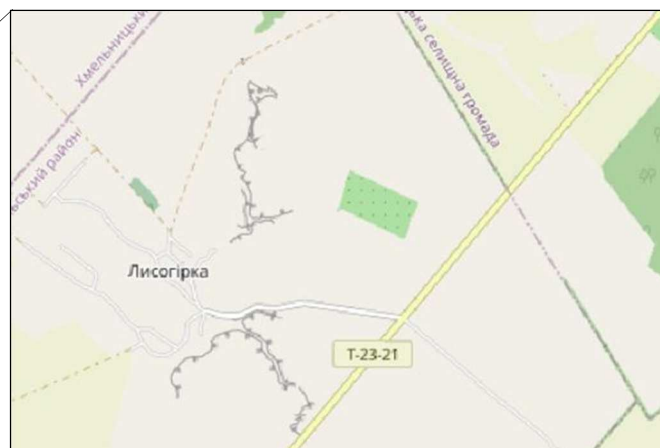


Рис. 5. Перехвати в мережах р. Чорниводки та Двоятинки з активною лінійною ерозією

3. Ділянка середньої течії. смт. Смотрич – м. Городок. Ширина басейну досягає 20-24 км. Малюнок асиметричний. Коефіцієнт звивистості – 1,6. На правому березі паралельно до русла Смотрича розвинена велика притока р. Яромирка. Вона збирає усі притоки вищих порядків правого берега, залишаючи основному водотоку лише декілька приток першого порядку, довжина яких не перевищує 10 км. На лівому березі подібна ситуація характерна для приток р. Чорниводка та р. Тростянець, тоді як у південній частині переважають субширотні (реліктово орієнтовані) притоки. Спільною рисою усіх лівобережних приток є вираження перехватів водотоку, який збігається із простяганням р. Мукша.

4. Ділянка верхньої течії. м. Городок – с. Кузьмин. Ширина басейну 36-40 км. Коефіцієнт звивистості – 1,4. Виражений симетричний деревоподібний малюнок розгалуження приток I-IV порядків. Напряма магістральних водотоків субмеридіональний. Виражене чергування напрямків приток в ділянках перехватів, що збігається із орієнтацією тектонічних розломів та ре-

ліктового рельєфу.

5. Ділянка верхівня. Ширина басейну близько 50 км. Коефіцієнт звивистості основного русла – 1,1 (практично прямолінійне). Орієнтація субширотна. Виражені гаки перехватів. Притоки орієнтовані субмеридіонально (Рис 6).

Розвиток гідромережі р. Смотрич відбувався у тісному зв'язку із формуванням долини р. Дністер як прояви регресивної ерозії основного водотоку в північному напрямку з врахуванням рельєфу та тектонічних особливостей регіону [3, 5]. Їх послідовність дозволяє підтвердити просторовий аналіз малюнків гідромережі. Загалом у дослідженні виокремлено 4 основних етапи (Табл. 2).

Поглиблення русел основного водотоку і притоків відбувається зараз і буде продовжуватися у найближчому майбутньому. Про це свідчать водоспади у долинах притоків нижньої течії та товтрової зони, а також переважання перекатів на усіх ділянках русла основних водотоків, крім перехопленого верхів'я. З досягненням молодими ділянками водотоків силурійської поверхні будуть виникати зони розширення

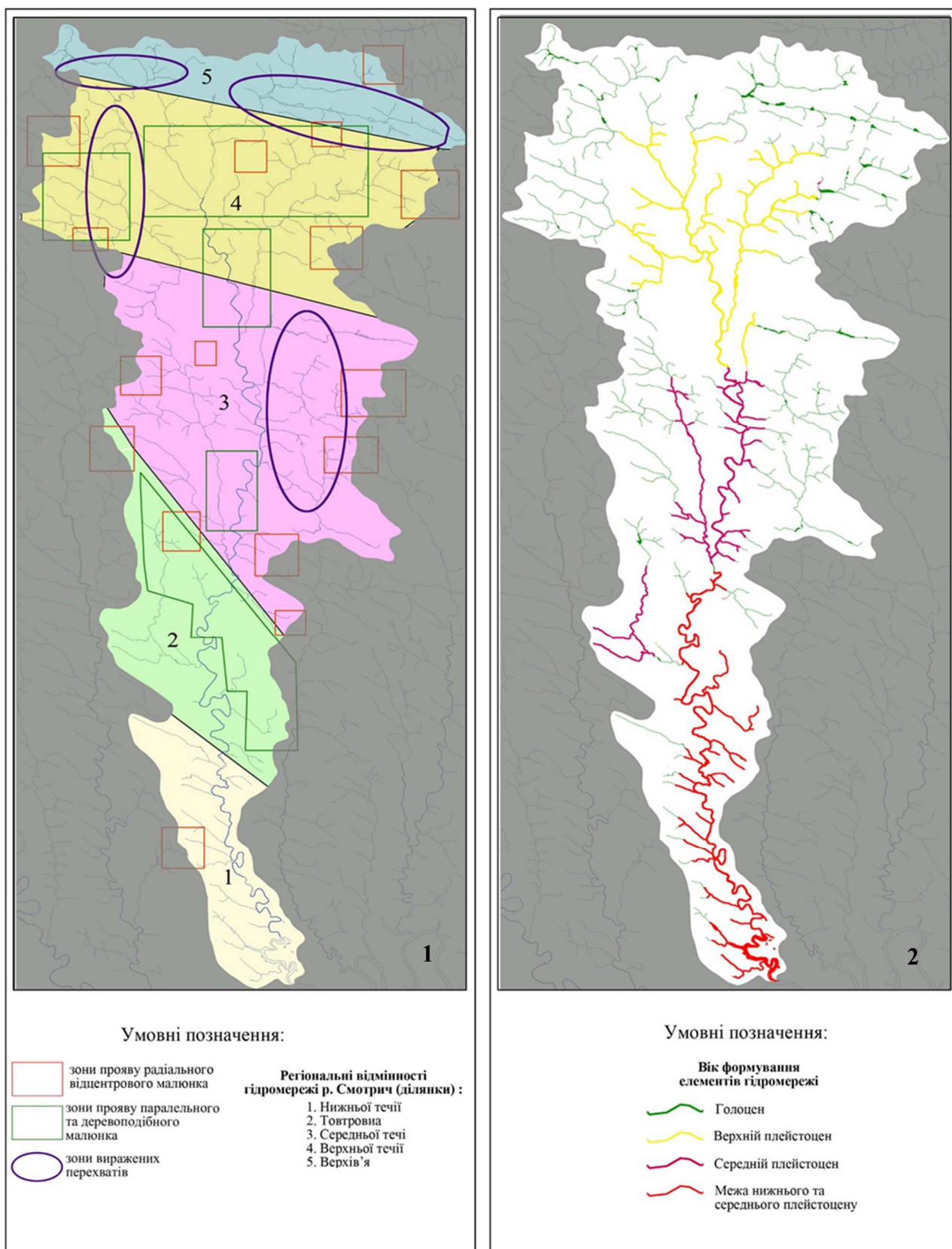


Рис. 6. 1 – регіоналізація басейну р. Смотрич за малюнками типів гідромережі; 2 – різновікові ділянки гідромережі р. Смотрич

Послідовність гіпотетичних процесів розвитку гідромережі р. Смотрич

Етап	Процеси формування гідромережі
Межа нижнього та середнього плейстоцену	У долині р. Дністер на зміну акумулятивної діяльності розпочалося ерозійне врізання і формування каньйоноподібної долини. В цей час відбувається зміщення її русла на південь від широти м. Кам'янець-Подільський. Ймовірно у цей час на відтинку Між м. Кам'янець-Подільський та с. Думанів зливалися три водотоки що протікали паралельно із Карпат, оскільки на це вказують широкі реліктові долини на вододілах які виражені до Товтрової гряди та карпатський алювій. Перехід від акумуляції до ерозії у річкових долинах цих водотоків очевидно став причиною розмиву неогенових та крейдових відкладів і формування пониження у рельєфі нижньої ділянки долини.
Середньоплейстоценовий	Закладання сучасної долини р. Смотрич від р. Дністер до товтрової гряди. При цьому русло р. Дністер продовжувало відступати на південь, а процес його врізання у силурійські відклади обумовив регресивну ерозію Смотрича. У цей час відбулося проривання Товтрової гряди що співпадає з періодом Дніпровського зледеніння.
Верхньоплейстоценовий	Формування гідромережі середньої течії р. Смотрич та перехоплення верхів'їв р. Жванчик. У нижній течії відбувається глибинне врізання і формування комплексів I та III терас що відповідають аналогічним р. Дністер
Голоценовий	Формування верхів'я шляхом прориву через вододіл із басейном р. Південний Буг та захопленням його приток між с. Андрійківці та с. Кузьмин, а також Верхів'я р. Мукша.

Регресивна ерозія у верхів'ях обумовлена високим гіпсометричним рівнем сучасного вододілу з Південним Бугом та збільшенням глибини врізання русла р. Смотрич, що в майбутньому спровокує розвиток деревоподібного малюнку мережі прориву на місці сучасного перестого для правих приток верхів'я.

Перехвати приток Мукші, Тернави та Ушиці обумовлені більшими падіннями приток Смотрича у місці контактів, а також активізацією блокових підняття у східній частині басейну середньої течії. Самоперехвати ділянок приток у середній та верхніх течіях обумовлені обмеженим розвитком верхів'їв приток р. Яромирка, що досягли найвищих ділянок вододілів та конкуренцією з ними за водозбір ділянок приток I і II порядку основного русла р. Смотрич.

Активізація яроутворення в зонах перехватів та вододільних височин обумовлена поглибленням врізання основного русла та формуванням нових долин водозбору з використанням системи молодих розломів.

Штучні водойми на ділянках водотоків є ділянками локального сповільнення процесів ерозії, а у випадку прориву дамб – імпактного поглиблення русел. Меліорація вододільних рівнин сприяє русловій ерозії в умовах дефіциту стоку. Території де знищені лісові масиви на вододільних останцях з активними висхідними рухами є зонами активного яроутворення та перехватів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Просторовий аналіз локальних малюнків гідромережі дозволяє встановити роль у

основних чинників та природних умов у прояві геоморфологічних процесів. Порівняння структури гідромережі із просторовими моделями рельєфу, тектонічних структур та ландшафтів є підставою для пояснення основних етапів її розвитку. Прояви тектонічного впливу на розвиток гідромережі виражені, як радіальні відцентрові малюки, що вказують на локальні блокові підняття. За особливостями малюнків гідромережі виокремлюється 5 зон: нижньої течії, товтрова, середньої течії, верхньої течії та верхів'я.

Аналіз просторової структури гідромережі р. Смотрич та будови річкових долин дозволяє виокремити 4 етапи формування: межа раннього та середнього плейстоцену, середньоплейстоценовий, верхньоплейстоценовий та голоценовий. На сучасному етапі відбувається глибинне врізання водотоків та активні перехвати в басейні р. Мукша. Господарська діяльність є фактором посилення ерозії. У майбутньому є висока ймовірність прояву нових перехватів у басейні р. Мукша та р. Південний Буг, а також самоперехватів у середній течії. Ділянка вище м. Городок при врізанні у палеозойські породи набуватиме ортогональних рис відповідно до мережі давніх розломів. Пир'ястий малюнок гідромережі верхів'я демонструє виражену тенденцію трансформації на деревоподібний при виході приток на вододіл з р. Південний Буг.

Перспективи використання результатів дослідження. Зазначені висновки є основою для подальших дослідження антропогенного впливу на формування структури мережі, зокрема прогнозування їх можливого деструк-

ТИВНОГО ВПЛИВУ.

Література:

1. Березка І. С. Особливості формування малонку сучасної гідрографічної мережі річки Сірет. Науковий вісник Чернівецького університету. Географія. 2012. Вип. 633–634. С. 16–20.
2. Положення про Регіональний офіс водних ресурсів у Хмельницькій області. Регіональний офіс водних ресурсів у Хмельницькій області : [вебсайт]. URL: <https://rovrkhm.gov.ua> (дата звернення: 30.04.2026).
3. Природа Хмельницької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1981. 128 с.
4. Самар В. М. Особливості геоморфологічної будови басейну р. Смотрич. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія : географія. 2013. № 1. С. 70–78.
5. Свинко І. М. Про зв'язок річкової та яружно-балочної мереж Волино-Подільської височини з тектонічною тріщинуватістю порід. Фізична географія та геоморфологія. Київ : Вища школа, 1977. Вип. 17. С. 22–25.
6. Середнє Придністров'я / за ред. Г. І. Денисика. Вінниця : Видавництво «Тега», 2007. 431 с.
7. Стецюк В. В., Ковальчук І. П., Маринич О. М. Основи геоморфології : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2005. 495 с. : іл.
8. Федорчук І. В. Фітомоніторинг екологічного стану основних річок природоохоронних територій (на прикладі національного природного парку «Подільські Товтри») : монографія. Кам'янець-Подільський : ПП Мошинський В. С., 2009. 258 с.
9. Царик В., Сивий М. Трансформаційні антропогенні процеси у басейні річки Гнізни та їх вплив на характер стоку. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія : географія. 2025. Т. 60, № 3. С. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.25.3.16>.

References:

1. Berezka I. S. Osoblyvosti formuvannya maliunku suchasnoi hidrohrafichnoi merezhi richky Siret. Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu. Neohrafiia. 2012. Vyp. 633–634. S. 16–20.
2. Polozhennia pro Rehionalnyi ofis vodnykh resursiv u Khmelnytskyi oblasti. Rehionalnyi ofis vodnykh resursiv u Khmelnytskyi oblasti : [vebsait]. URL: <https://rovrkhm.gov.ua> (data zvernennia: 30.04.2026).
3. Pryroda Khmelnytskoi oblasti / za red. K. I. Herenchuka. Lviv : Vyshcha shkola, 1981. 128 s.
4. Samar V. M. Osoblyvosti heomorfolohichnoi budovy baseinu r. Smotrych. Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriiia : heohrafiia. 2013. No. 1. S. 70–78.
5. Svyenko I. M. Pro zviazok richkovoї ta yaruzhno-balochnoi merezh Volyno-Podilskoi vysochyny z tektonichnoiu trishchynuvatistiu porid. Fizychna heohrafiia ta heomorfolohiia. Kyiv : Vyshcha shkola, 1977. Vyp. 17. S. 22–25.
6. Serednie Prydnistrov'ia / za red. H. I. Denysyka. Vinnytsia : Vydavnytstvo "Teza", 2007. 431 s.
7. Stetsiuk V. V., Kovalchuk I. P., Marynych O. M. Osnovy heomorfolohii : navch. posib. Kyiv : Vyshcha shkola, 2005. 495 s. : il.
8. Fedorchuk I. V. Fitomonitorynh ekolohichnoho stanu osnovnykh richok pryrodookhoronnykh terytorii (na prykladi natsionalnoho pryrodnoho parku "Podilski Tovtry") : monohrafiia. Kamianets-Podilskiy : PP Moshynskiy V. S., 2009. 258 s.
9. Tsaryk V., Syvyi M. Transformatsiini antropohenni protsesy u baseini richky Hnizny ta yikh vplyv na kharakter stoku. Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriiia : heohrafiia. 2025. T. 60, No. 3. S. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.25.3.16>.

Надійшла до редакції 25.03.2026 р.

Прийнята до друку 20.04.2026 р.

Опублікована 26.05.2026 р.



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 тривимірного 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. Окремі 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 роботі 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 різнорідних 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.

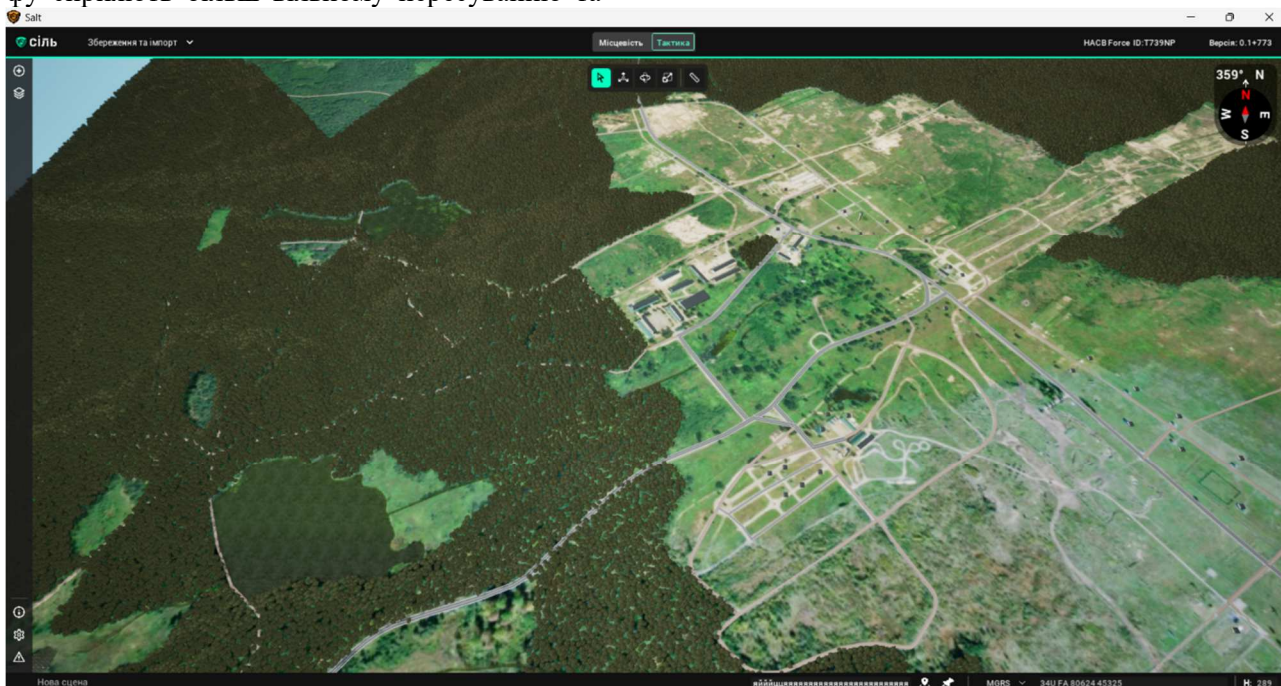


Рисунок 2. Візуальна оцінка рельєфу місцевості за тривимірною моделлю (крутизна схилів та прохідність)

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.

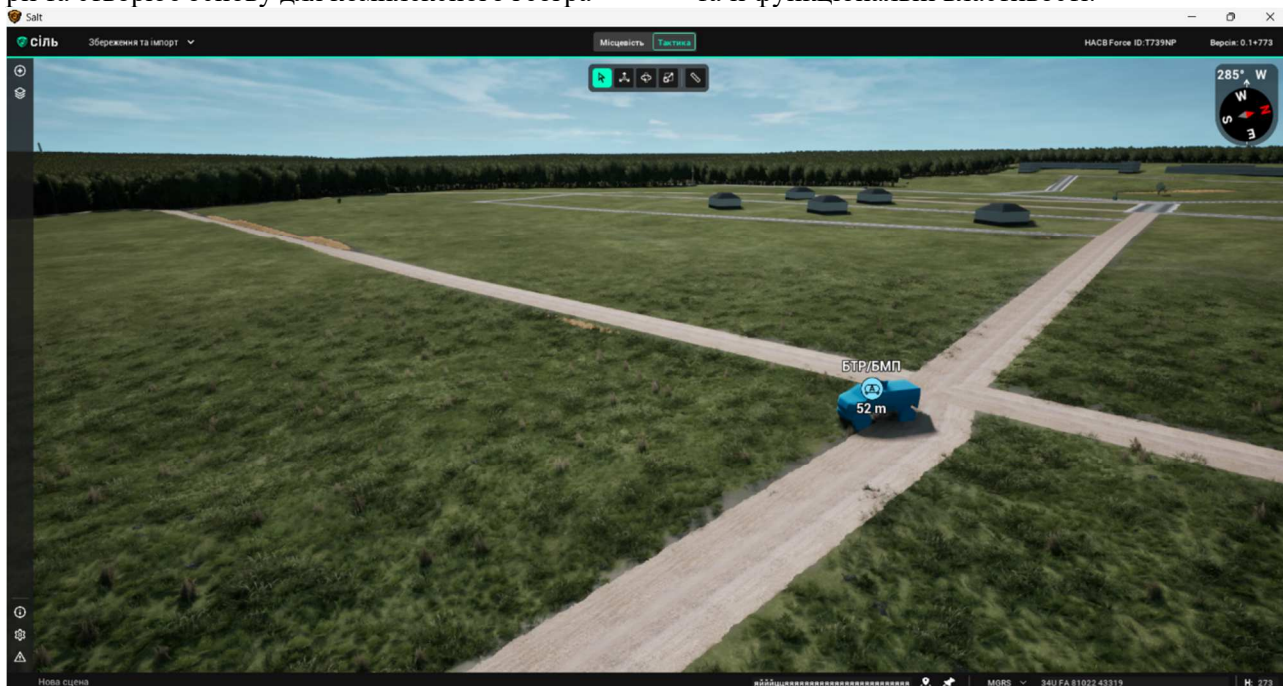


Рисунок 3. Оцінка видимості місцевості з використанням тривимірної моделі рельєфу

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.

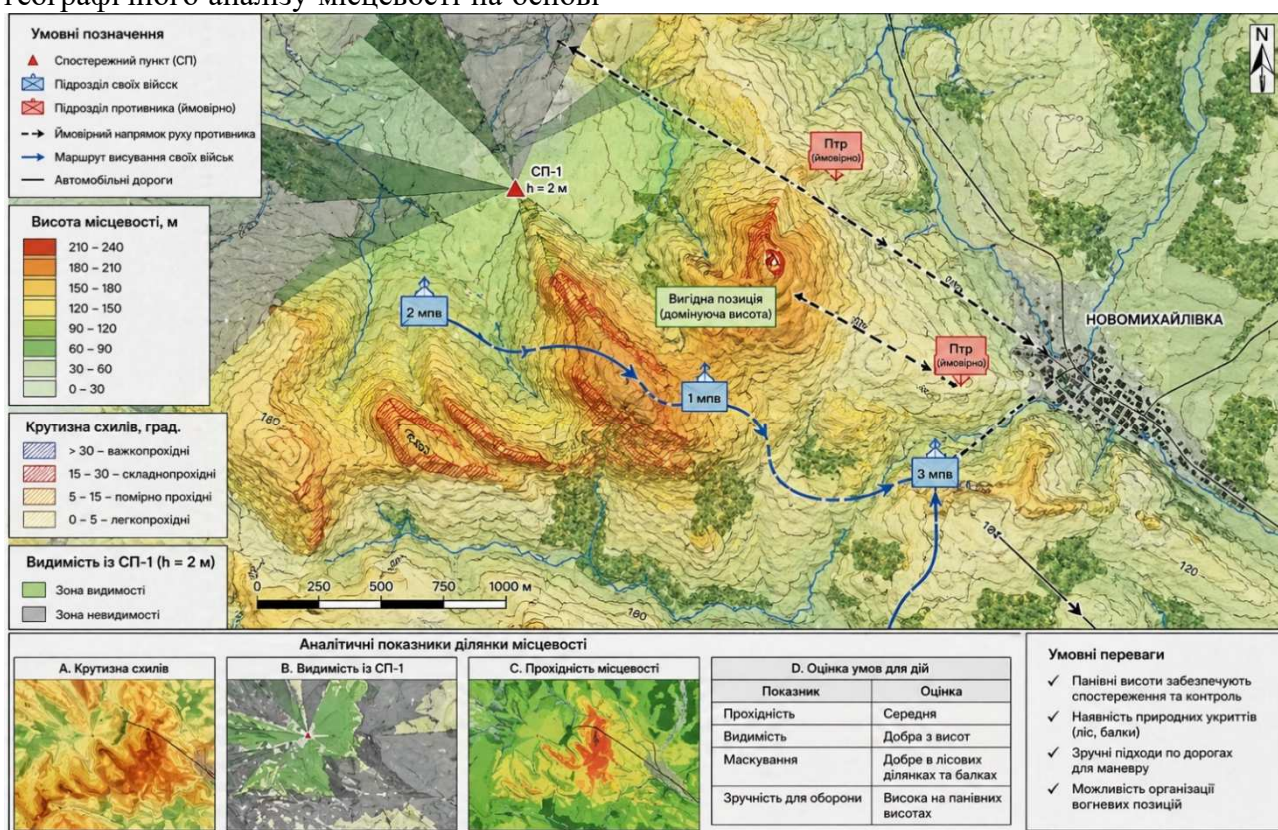


Рисунок 4. Географічний аналіз місцевості на основі 3D моделі на основі DEM у СПЗ «Сіль»

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-

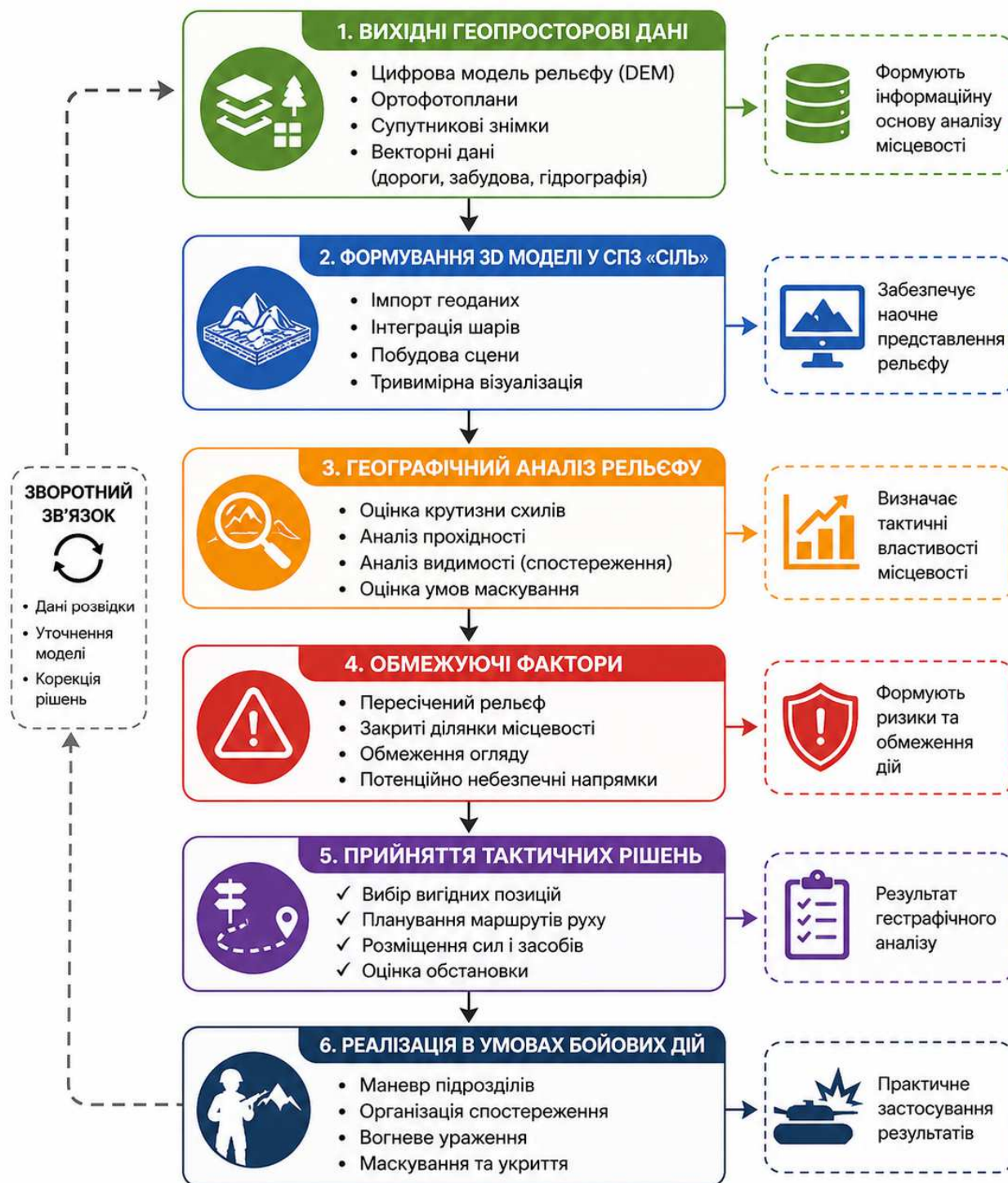


Рисунок 5. Структурно-логічна модель географічного аналізу місцевості на основі DEM у СПЗ «Сіль»

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	an	Vn	Sn	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.

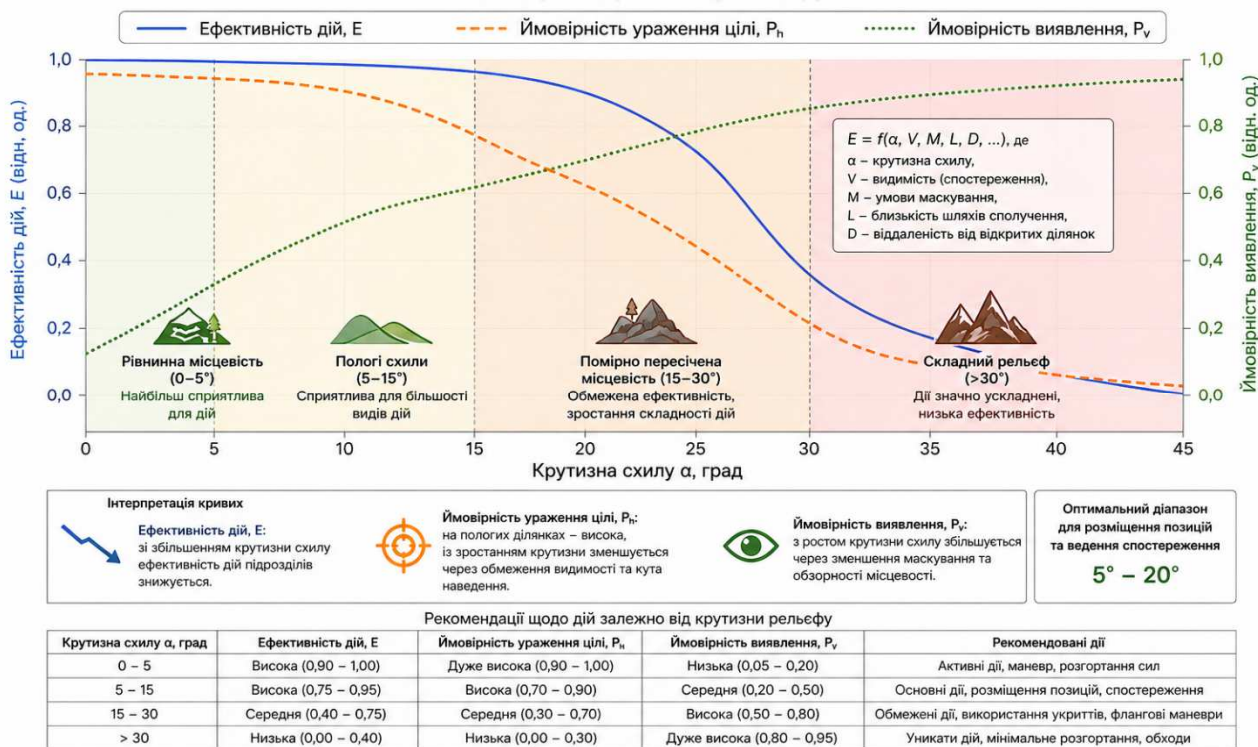


Рисунок 6. Узагальнена залежність ефективності дій підрозділів від характеристик рельєфу

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 prostоровoi interpoliatsii (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.

