

DOI: [10.30970/gpc.2026.1.5200](https://doi.org/10.30970/gpc.2026.1.5200); УДК 551.4

Застосування ДЗЗ і ГІС для аналізу просторової диференціації та розвитку ерозійної мережі гірської частини басейну Бистриці Тисменицької

Галина Байрак (orcid.org/0000-0002-4802-2706),
Львівський національний університет імені Івана Франка,
halyna.bayrak@lnu.edu.ua

Анотація. Досліджено просторову диференціацію та сучасний розвиток ерозійної мережі гірської частини басейну Бистриці Тисменицької на основі поєднання методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і геоінформаційного аналізу. Актуальність роботи зумовлена потребою виявлення закономірностей розвитку низькопорядкових ерозійних форм у гірських басейнах Українських Карпат, де їхня морфодинаміка визначається складною взаємодією літологічних, тектонічних, морфометричних, антропогенних чинників і умов. У роботі використано цифрову модель рельєфу SRTM, аерофотознімки 1978 р. та космознімки Google Earth Pro за 2005 і 2020 рр., а також геологічні картографічні матеріали. На основі DEM у середовищі QGIS виконано морфометричне районування території, побудовано карту кривизни земної поверхні, здійснено автоматизоване виділення тальвегової мережі низькопорядкових долин та її узагальнену типізацію за ступенем розгалуженості. Зіставлення морфометричних і геологічних даних дало змогу встановити зв'язок між конфігурацією ерозійної мережі, морфологією рельєфу та літологічною будовою субстрату.

Виділено чотири морфологічні підрайони, які відрізняються за висотами, крутістю схилів, глибиною ерозійного розчленування та значеннями кривизни поверхні. З'ясовано, що розгалуженіша ерозійна мережа приурочена до ділянок із згладженішим рельєфом та поширенням податливих тонкоритмічних флішових товщ, тоді як слабо розгалужена – до стійкіших товщ і масивнішого рельєфу, фронтальних частин тектонічних насувів. Показано, що просторову диференціацію мережі визначають також четвертинні покривні відклади. Виділені морфологічні різновиди ерозійної мережі можуть слугувати індикатором сучасної морфодинамічної активності. За даними різночасових дистанційних матеріалів виявлено суттєве скорочення орних земель і зростання лісистості впродовж 1978–2020 рр. Це сприяло частковій стабілізації ерозійних форм, але не усунуло локальної сучасної ерозійної активності. Отримані результати можуть бути використані для оцінки ерозійної небезпеки та прогнозування зон можливого посилення ерозійних процесів у гірських басейнах Українських Карпат.

Ключові слова: морфодинаміка рельєфу; дистанційне зондування Землі; геоінформаційні системи; ерозійна мережа; морфометричний аналіз; цифрова модель рельєфу; гірські басейни; Бистриця Тисменицька; Українські Карпати.

Application of remote sensing and GIS for the analysis of spatial differentiation and development of the erosion network in the mountainous part of the Bystrytsia Tysmenytska river basin



Galyna Bayrak (orcid.org/0000-0002-4802-2706)

Ivan Franko National University of Lviv

halyna.bayrak@lnu.edu.ua

Abstract. The study examines the spatial differentiation and contemporary development of the erosion network in the mountainous part of the Bystrytsia Tysmenytska River basin through the combined application of remote sensing and geoinformation analysis. The relevance of the study stems from the need to identify the patterns of development of low-order erosional forms in the mountain basins of the Ukrainian Carpathians, where their morphodynamics is governed by a complex interaction of lithological, tectonic, morphometric, and anthropogenic factors. The study employed the SRTM digital elevation model, aerial photographs from 1978, Google Earth Pro satellite images from 2005 and 2020, as well as geological cartographic materials. Based on the DEM, morphometric regionalization of the study area was carried out in the QGIS environment, a surface curvature map was generated, and the thalweg network of low-order valleys was automatically extracted and generalized according to the degree of branching. The comparison of morphometric and geological data made it possible to establish the relationship between the configuration of the erosion network, relief morphology, and the lithological structure.

Four morphological subregions were identified, differing in elevation, slope steepness, depth of erosional dissection, and surface curvature values. It was found that the more highly branched erosion network is associated with areas of smoother relief underlain by susceptible thin-rhythmic flysch strata, whereas the weakly branched network is related to more resistant rocks and more massive relief confined to tectonic thrust frontal zones. It is also shown that the spatial differentiation of the network is influenced by Quaternary cover deposits. The identified morphological variants of the erosion network may serve as indicators of present-day morphodynamic activity. Multitemporal remote sensing data revealed a substantial reduction in arable land and an increase in forest cover during 1978–2020. This contributed to the partial stabilization of erosional forms but did not eliminate local contemporary erosion activity. The obtained results may be used for assessing erosion hazard and predicting areas of possible erosion intensification in mountain basins of the Ukrainian Carpathians.

Keywords: relief morphodynamics; remote sensing; geographic information systems; erosion network; morphometric analysis; digital elevation model; mountain basins; Bystrytsia Tysmenytska; Ukrainian Carpathians.

Розвиток ерозійної мережі у гірських басейнах Українських Карпат є важливою складовою сучасної морфодинаміки рельєфу, оскільки яри і яркоподібні долини (або низькопорядкові долини) у великій мірі забезпечують перерозподіл води, уламкового матеріалу та продуктів денудації у схилово-долинних геоморфосистемах. У межах карпатських водозборів формування таких форм визначається поєднанням літологічної неоднорідності, структурної організації рельєфу, морфометричних контрастів та змін земного покриву. Актуальність дослідження полягає в тому, що традиційні польові спостереження, хоча й залишаються незамінними для ерозієзнавчих досліджень, не дають змоги повною мірою простежити просторову структуру ерозійної мережі і її часову трансформацію. Тому особливого значення набуває використання *дистанційного зондування Землі* (ДЗЗ) у поєднанні з *геоінформаційними технологіями* (ГІС). Різномасштабні аерофото- і космоснімки дозволяють виявити зміни земного покриву, зокрема заліснення, скорочення орних земель, зростання невикористовуваних угідь, і відповідні зміни умов розвитку ерозійних форм. У свою чергу, цифрові

моделі рельєфу та ГІС-аналіз дають можливість кількісно оцінити морфометричні особливості території, виділити мережу тальвегів та просторово зіставити їх із геологічною будовою і структурою земного покриву.

Гірська частина басейну Бистриці Тисменицької є показовою територією для такого аналізу. Тут простежуються виразні відмінності у ступені ерозійного розчленування, морфометрії схилів, конфігурації долинної мережі та сучасному земному покриві.

Мета дослідження – з'ясування особливостей просторової диференціації залежно від геолого-геоморфологічних умов розвитку ерозійної мережі гірської частини басейну Бистриці Тисменицької із використанням методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу.

Завдання дослідження: проаналізувати морфометрію гірської частини басейну за даними цифрової моделі рельєфу; виявити просторові відмінності ерозійної розчленованості за показниками кривизни поверхні; за допомогою автоматизованого виокремлення в ГІС розробити схему просторової диференціації тальвегів долинної мережі; зіставити просторову організацію мережі з геологічною будовою території та морфометричними відмінностями рельєфу; за різночасовими дистанційними матеріалами простежити зміни земного покриву на ключовій ділянці та оцінити їхній вплив на розвиток ерозійних форм; визначити роль природних і антропогенних чинників у сучасній морфодинаміці низькопорядкових ерозійних форм.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс взаємодоповнювальних методів, серед яких провідне місце належить методам ДЗЗ і ГІС.

1. Метод дешифрування різночасових дистанційних матеріалів.

Для аналізу змін земного покриву використано аерофотознімки 1978 р. та космоснімки з ресурсу Google Earth Pro за 2005 і 2020 рр. Цей метод дав змогу простежити багаточасову трансформацію land cover на ключовій ділянці, виявити скорочення площ орних земель, збільшення лісистості, поширення самозаліснення та встановити зв'язок між цими змінами і трансформацією ерозійної активності схилів. Дані ДЗЗ дозволили реконструювати динаміку освоєння та заліснення території, яка безпосередньо вплинула на розвиток ерозійних форм.

2. Геоінформаційний аналіз цифрової моделі рельєфу.

На основі DEM SRTM з просторовим розрізненням 30 м у середовищі QGIS виконано побудову 3D-моделі рельєфу та морфометричне районування басейну. Цей метод дав можливість виділити частини басейну, відмінні за абсолютними висотами, крутістю схилів, глибиною і характером ерозійного розчленування, а отже – окреслити загальну просторову неоднорідність морфологічної організації досліджуваної території.

3. Морфометричний метод.

За даними DEM побудовано карту кривизни рельєфу (Curvature Index), яка відображає швидкість зміни нахилу поверхні. Застосування цього методу дало змогу кількісно оцінити ступінь ерозійної розчленованості, зіставити зони підвищеної та пониженої кривизни з морфологічними типами схилів і долин, а також простежити просторові контрасти між окремими частинами басейну.

4. Гідрологічне моделювання тальвегової мережі в ГІС.

Із використанням інструментів QGIS та модуля SAGA Next Gen виконано корекцію DEM, побудову напрямів стоку, накопичення стоку та виділення тальвегів / водотоків. Цей метод дав змогу автоматизовано виокремити мережу тальвегів низькопорядкових долин, визначити її просторову конфігурацію, а також виконати морфологічне типізування ерозійних форм за ступенем розгалуженості та довжиною.

5. Порівняльно-картографічний метод.

Зіставлення карти геологічної будови, карти кривизни, моделі рельєфу та карти морфологічних типів тальвегової мережі дало змогу встановити відповідність між літологічною структурою території, морфометричними параметрами рельєфу та характером планової організації низькопорядкових долин. Завдяки цьому було виявлено, що їхня розгалуженість і конфігурація залежать від чергування стійких і слабостійких флішових товщ.

6. Морфологічний аналіз ключових ділянок і метод профілювання типових низькопорядкових долин.

Для окремих ділянок в районі смт Підбуж і с. Бистриця Гірська використано аналіз поздовжніх і поперечних профілів низькопорядкових долин. Цей метод дав змогу уточнити відмінності між схилами долини Бистриці Тисменицької, виявити різний потенціал розвитку ерозійних форм та конкретизувати роль структурно-літологічного контролю у формуванні їхньої морфодинаміки.

Результати досліджень. Рельєф гірської частини басейну Бистриці Тисменицької відображає типovu для Українських Карпат будову. Хребти мають переважно північно-західне – південно-східне простягання, що відповідає загальному тектонічному плану складчасто-насувних структур Скибової зони (Кравчук, 2005). Долини річок і дрібні ерозійні форми здебільшого орієнтовані вздовж тих самих структурних ліній або вриваються поперечно у зонах відносної тектонічної ослабленості. Досліджувана територія охоплює частину району Верхньодністерських Бескидів і характеризується низькогірним типом рельєфу з абсолютними висотами від 500–600 м у північно-східній частині до 830 м у південно-західній. Тут чітко простежується закономірна зміна морфологічної виразності рельєфу з півдня на північ, що пов'язано зі зниженням абсолютних висот, енергії рельєфу та глибини ерозійного розчленування.

За результатами аналізу 3D-моделі рельєфу, побудованої у QGIS на основі даних SRTM з розрізненням 30 м, у межах басейну виділено чотири підрайони, які відрізняються за морфологією та ступенем ерозійного розчленування (рис. 1). Південний підрайон, який охоплює околиці Смільної та Бистриці Гірської, виділяється виразним розчленованим рельєфом. Тут домінують масивні хребти карпатського простягання з абсолютними висотами 700–830 м, місцями понад 850 м, крутими привершинними схилами 25–30° і глибоким у 80–150 м розчленуванням долинами тимчасових та постійних водотоків. Північні та північно-східні схили хребтів тут довші, тоді як південні й південно-західні коротші, крутіші та інтенсивніше розчленовані. Долина Бистриці вздовж простягання гірських хребтів – широка й асиметрична, а при перетині хребтів – вузька і крутосхилова.

Центральний підрайон, що охоплює територію Опака – Залокоть – Сторона, має перехідний характер. Тут переважають узгір'я та невисокі короткі хребти з абсолютними висотами 500–700 м і відносними перевищеннями 60–100 м. Для цієї частини басейну характерне зменшення крутості схилів до 15–22° та поширення нахилених до днищ річок придолинних поверхонь. Морфологічно це вже не така різко розчленована територія, як у південному підрайоні, однак рельєф зберігає достатньо виразну структурну організацію. Північний підрайон, приурочений до району Сприня – Звір, демонструє перехід до Передкарпатської височини. Тут переважаючі висоти знижуються до 300–420 м, відносні перевищення становлять 40–70 м, а схили переважно довгі й пологі, із крутістю 8–15°. Для нього характерні розширені придолинні поверхні, улоговиноподібні форми та загальне виположення рельєфу. Північно-східний підрайон, що охоплює район Підбужа і Підмонастирка, також вирізняється меншими абсолютними висотами, проте на його фоні добре виражений передовий хребет північно-західного – південно-східного простягання, який формує локально підвищений і морфологічно контрастний елемент рельєфу.

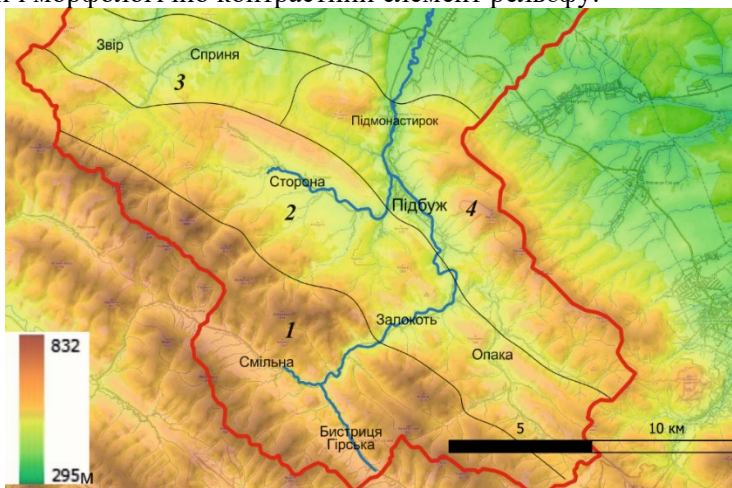


Рис. 1. Гірська ділянка басейну Бистриці Тисменицької на 3d-моделі рельєфу, виконаної у QGIS. Частини басейну: 1 – південна; 2 – центральна; 3 – північна; 4 – північно-східна

Fig. 1. Mountainous area of the Bystrica Tysmenytska basin on a 3D relief model made in QGIS. Parts of the basin: 1 – southern; 2 – central; 3 – northern; 4 – northeastern

Для аналізу морфологічної структури рельєфу на основі його цифрової моделі побудовано карту кривизни поверхні (Curvature Index), що дало змогу опосередковано оцінити характер ерозійного розчленування території. Показник кривизни відображає швидкість зміни нахилу поверхні й тому є чутливим до локальної морфології схилів, перегинів, ввігнутих і опуклих форм (Gallant & Wilson, 2000). У межах гірського басейну його значення добре передають просторові відмінності морфодинамічної організації території. Найвищі значення індексу зафіксовані у південному підрайоні, де поєднуються великі відносні перевищення, густа мережа крутосхилих ерозійних форм і глибоке врізання

долини Бистриці. Тут високі значення кривизни відповідають різким врізам долинних форм, особливо в місцях входження дрібних приток до основної долини (рис. 2).

У центральному та північно-східному підрайонах значення Curvature Index знижуються. Це відображає помірний ступінь розчленованості рельєфу, поширення слабкоопуклих межирічних поверхонь та м'яко увігнутих переходів до долин. У центральній частині зростання кривизни зазвичай пов'язане не з великою загальною енергією рельєфу, а з окремими локальними морфологічними вузлами, зокрема короткими урвистими ділянками біля гирл бічних долин. У північному підрайоні індекс кривизни набуває найнижчих значень, що відповідає невеликим вертикальним контрастам, переважанню узгір'їв, улоговин і протяжних долин-приток. Отож карта кривизни добре узгоджується із загальною морфометричною диференціацією басейну і підтверджує, що найбільш контрастний рельєф, якому властивий високий потенціал розвитку процесів, зосереджений у його південній частині.

Морфологічні контрасти рельєфу тісно пов'язані з геологічною будовою басейну. За даними геологічної карти, у межах гірської частини басейну Бистриці Тисменицької чергуються літологічно відмінні смуги крейдових і палеогенових відкладів. Серед них виділяються як податливі до звітрювання й денудації тонкоритмічні флішові товщі, так і значно стійкіші груборитмічні комплекси, які формують окремі хребти та вододіли. Це чергування зумовлює не лише загальні морфологічні особливості території, а й характер просторової організації ерозійної мережі.

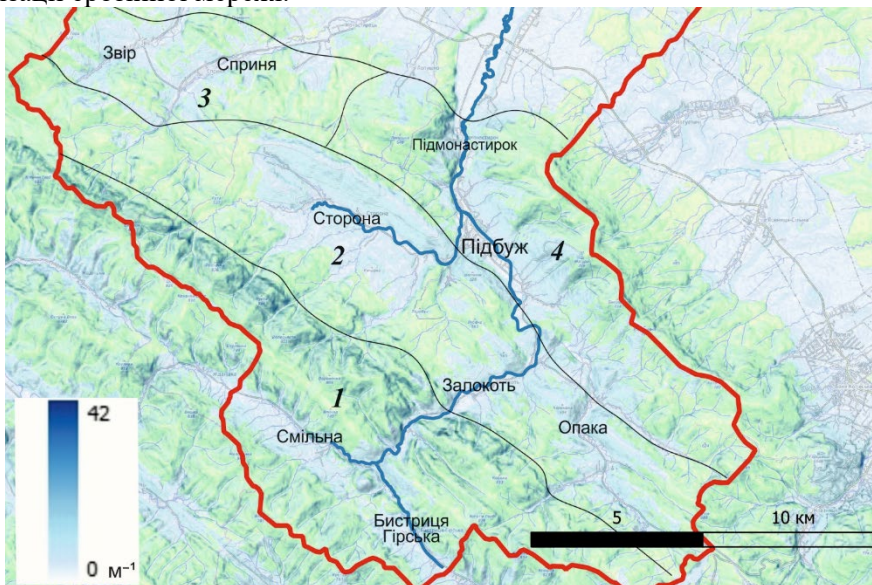


Рис. 2. Карта кривизни поверхні (*Curvature Index*) гірської частини басейну Бистриці Тисменицької

Fig. 2. Map of surface curvature (*Curvature Index*) of the mountainous part of the Bystrica Tysmenytska basin

У південному підрайоні поширені найбільш стійкі комплекси корінних порід – грубо- і середньоритмічні відклади спаської та головнинської світ, а також середньо- і верхньострийської підсвіти. Ці комплекси формують чітко виражені масивні хребти, а на їхніх схилах переважають короткі, переважно прямолінійні ерозійні врізи. Водночас між стійкими пачками залягають податливіші тонкоритмічні відклади нижньострийської підсвіти та палеоцен–еоценові товщі, у межах яких формуються більш розгалужені ерозійні форми (рис. 3).

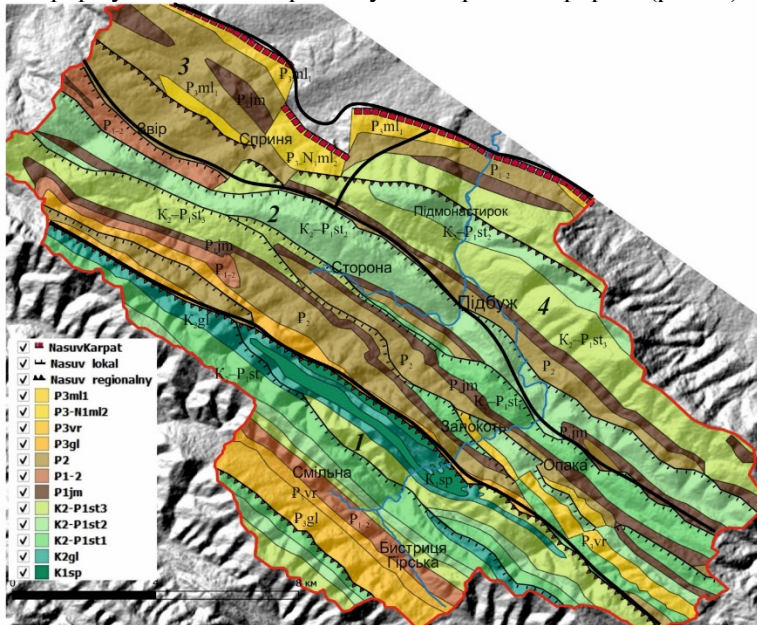


Рис. 3. Геологічна карта гірської частини басейну Бистриці Підбузької, складена на основі геологічної карти масштабу 1:100 000 (Геологічна..., 2007)

Fig. 3. Geological map of the mountainous part of the Bystrica Pidbuzka basin, compiled on the basis of a geological map at a scale of 1:100,000 (Geological..., 2007)

Умовні позначення:

P₃–N₁ml₂ – олігоцен–нижній міоцен. Менілітова світа. Середня підсвіта. Тонкоритмічне перешарування сірих вапнистих аргілітів, алевролітів, пісковиків. У підшві горизонт смугастих вапняків.

P₃ml₁ – олігоцен. Менілітова світа. Нижня підсвіта. Аргіліти чорні невапнисті бітумінозні з прошарками алевролітів і пісковиків, пачками товстошаруватих та масивних пісковиків ("клівських"). У нижній частині горизонт кременів та окремих мергелів.

P₃vr – олігоцен. Верховинська світа. Внизу товщі горизонт вапняків.

P₃gl – олігоцен. Головецька світа нерозчленована. У підшві кремнієвий ("роговиковий") горизонт.

P₂ – еоцен нерозчленований. Пісковики, алевроліти, аргіліти.

P₁₋₂ – палеоцен–еоцен. Аргіліти пістряві, пісковики, алевроліти.

P₁jm – палеоцен. Яменська світа. Пісковики сірі, масивні з прошарками гравелітів, конгломератів та аргілітів.

K₂–P₁st₃ – верхньострийська підсвіта. Складається з тонкоритмічного перешарування аргілітів сірих, темно-сірих, сіро-зелених, вапнистих і невапнистих (0,1–0,25 м), пісковиків і алевролітів, дрібно- і середньозернистих, сірих, сталевих і блакитно-сірих, карбонатних. Неодмінним компонентом розрізу підсвіти є прошарки мергелів (0,1–0,25 м) та рідше вапняків (до 0,3 м) (Шлапінський та ін., 2020).

K₂–P₁st₂ – середньострийська підсвіта. Представлена пісковиками з прошарками аргілітів або груборитмічним піщаним флішем.

K₂-P_{1st1} – нижньострийська підсвіта. Представлена ритмічним чергуванням пісковиків і аргілітів з участю мергелів і вапняків; причому переважають пачки тонкоритмічного перешарування цих порід, які розділяються піщаними пачками (Шлапінський та ін., 2020).

K_{2gl} – пізньокрейдові відклади. Головинська світа. Середньоритмічний фліш із сірими кременистими аргілітами в ритмі. Внизу розрізу – шари вапняків і глинистих мергелів.

K_{1sp} – ранньокрейдові відклади. Спаська світа. Аргіліти чорні з пачкою грубошаруватих пісковиків

Центральний підрайон складений переважно різноритмічними та середньоритмічними флішовими відкладами стрийської світи, а місцями – ямненською світою з масивними пісковиками. Остання локально формує скельні стінки, уступи та пороги в руслах, проте її морфогенетичний ефект має локальний характер. Натомість широкі смуги тонкоритмічних відкладів нижньострийської підсвіти та палеоцен-еоценових осадів сприяли розвитку ширших долин, узгір'їв і зон підвищеної ерозійної розчленованості. У цій частині басейну особливо добре простежується зв'язок між літологією і морфологією: вузькі та прямолінійні долини тяжіють до стійкіших пісковикових товщ, тоді як розлогіші долинні форми групуються у смугах податливих порід.

Північний підрайон сформований переважно на тонкоритмічних, аргілітово-алевролітових з тонкими прошарками пісковиків відкладах еоцену та менілітової світи олігоцену. Ці товщі легко піддаються звітрюванню і розмиву, однак через невелику енергію рельєфу вони формують пологіші схили, слабо увігнуті профілі та улоговиноподібні форми. Саме тому ця частина басейну відзначається найменшим вертикальним розчленуванням. Північно-східний підрайон, навпаки, приурочений переважно до піщаного флішу верхньо- і середньострийської підсвіти, які є значно стійкішими до руйнування. Вони формують передові хребти карпатського простягання, а ерозійні врізи тут порівняно короткі, прямі та мало розгалужені. Кривизна поверхні в цій частині проявлена слабше на придолинних ділянках і сильніше на перегінах привершинних схилів.

Тектонічна будова також безпосередньо відображається у морфології схилів і характері ерозійного розчленування. У межах басейну Бистриці Тисменицької поширені насувні структури різного рангу – як субрегіональні (скиби), так і локальні (луски). Саме з ними пов'язана морфологічна асиметрія схилів: короткі й круті схили хребтів зазвичай відповідають фронтальним частинам тектонічних структур, тоді як довші та пологіші схили характерні для їхніх тильних частин. Тому просторова диференціація ерозійної мережі визначається не лише літологією, а й структурною позицією схилів у межах насувних елементів, оскільки вона впливає на крутість, довжину схилів, глибину врізання долин і умови концентрації поверхневого стоку.

Вагомий вплив на розвиток ерозії мають четвертинні відклади, оскільки саме вони безпосередньо визначають стійкість схилової поверхні до розмиву, її інфільтраційні властивості та умови концентрації стоку. Для схилів басейну Бистриці Тисменицької характерна двочленна будова покривних відкладів: у нижній частині залягають супіщані горизонти, а вище поширені елювіально-делювіальні суглинки. Потужність цього покриву є неоднаковою: на крутіших схилах північних експозицій вона незначна (0,5–1,0 м), тоді як на схилах південних експозицій делювіальні суглинки можуть сягати більше 2 м. Така

різниця в потужності покривних відкладів є однією із важливих передумов неоднакової ерозійної активності схилів.

За більшої потужності суглинків ерозійний процес розвивається у пухкому, відносно нестійкому середовищі, яке сприяє як площинному змиву, так і формуванню лінійних ерозійних форм (Байрак і Луцишин, 2025). Тому для басейну Бистриці Тисменицької закономірним є інтенсивніший прояв ерозійних процесів на схилах південних експозицій, де покрив елювіально-делювіальних суглинків потужніший.

Виділення тальвегової мережі низькопорядкових долин. Геологічна будова і морфометричні особливості рельєфу безпосередньо відображаються у плановій організації ерозійної мережі. Тому наступним етапом дослідження стало виділення тальвегів і розроблення схеми просторової диференціації ерозійної мережі за ступенем розгалуженості. Для цього на основі цифрової моделі рельєфу було побудовано карту тальвегів долинних форм 1–3 порядків, яка дала змогу проаналізувати просторову структуру ерозійної мережі в межах усієї гірської частини басейну.

Виділення тальвегів (у програмному середовищі названі як водотоки, оскільки принцип їх виділення – це стікання води від комірки з більшої до меншої абсолютної висоти) виконано із застосуванням стандартних гідрологічних інструментів QGIS та модуля SAGA Next Gen. На першому етапі проведено корекцію DEM процедурою Fill sinks, що усуває локальні замкнені депресії й тим самим забезпечує коректніше моделювання поверхневого стоку. Далі за допомогою алгоритму Flow Direction побудовано растр напрямків стоку, а на його основі – растр накопичення стоку (Flow Accumulation), який показує кількість комірок, що дреноються в кожний осередок. Для виділення мережі тальвегів застосовано поріг накопичення стоку; шляхом тестування кількох значень у межах 60–200 пікселів встановлено, що оптимальним для цієї території є діапазон 140–160 комірок. Він забезпечує найреалістичніше відтворення густоти тальвегів відповідно до масштабу зображення та морфології басейну. Після цього було створено растрові й векторні шари тальвегів, а на завершальному етапі виконано ручне виділення морфологічних типів тальвегової мережі.

У результаті виокремлено два основні типи тальвегової мережі з відповідними підтипами за довжиною (рис. 4). Обмеження кількості типів до двох зумовлене прагненням уникнути надмірної деталізації та суб'єктивного дроблення форм при аналізі басейнового рівня. Перший тип – периста, переважно слабо розгалужена мережа, представлена короткими і довгими підтипами. Її частка становить близько 40 % загальної довжини низькопорядкових долин. Другий тип – деревоподібна, порівняно розгалужена мережа, також представлена короткими і довгими підтипами. На неї припадає близько 60 %. Критеріями виділення слугували: тип рисунку мережі – перистий чи деревоподібний, характер приток 1-го порядку, розподіл точок перетинів ліній (QGIS: Вектор / Analysis Tools / Перетин ліній). Короткими вважалися тальвеги довжиною в середньому до 900 м, довгими – 901–1500 м і більше. Довжини визначали шляхом QGIS: Вектор / Research Tools / Виділити в межах відстані.

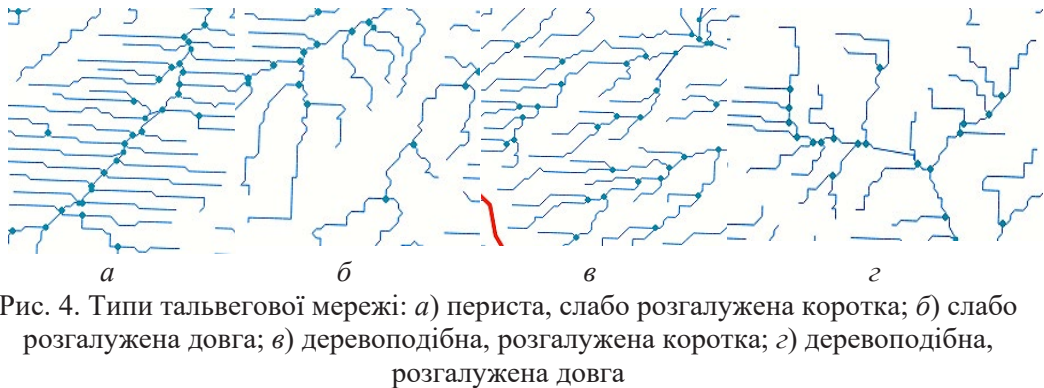


Рис. 4. Типи тальвегової мережі: а) периста, слабо розгалужена коротка; б) слабо розгалужена довга; в) деревоподібна, розгалужена коротка; з) деревоподібна, розгалужена довга

Fig. 4. Types of thalweg network: (a) feather-like, weakly branched, short; (b) weakly branched, long; (c) dendritic, branched, short; (d) dendritic, branched, long

Числові дані засвідчують, що в межах гірської частини басейну кількісно переважають саме деревоподібні, розгалужені різновиди мережі, що вказує на високий ступінь розвитку ерозії в умовах великих нахилів поверхонь та переважання податливого субстрату (рис. 5). Типізування має узагальнювальний характер, і використане передусім для просторового зіставлення конфігурації тальвегової мережі з морфометричними відмінами рельєфу та геологічною будовою.

Аналізуючи узгодження типів тальвегової мережі із чотирма морфологічними підрайонами і картою кривизни поверхні, з'ясували, що типи ерозійної мережі не розміщені хаотично, а узгоджуються з морфометричною диференціацією басейну. У підрайонах із вищою морфометричною контрастністю і більшими значеннями кривизни переважає периста, менш розгалужена ерозійна мережа, тоді як у частинах басейну зі згладженішим рельєфом і нижчими показниками кривизни поширена деревоподібна, добре розгалужена мережа.

Порівняння карти просторових відмін ерозійної мережі із геологічною картою теж показало існуючий зв'язок. У смугах поширення податливих тонкоритмічних флішових товщ і там, де показники кривизни менші, формується гущіша і розгалуженіша ерозійна мережа деревоподібного типу, представлена як короткими, так і довгими тальвегами. Натомість на ділянках розвитку стійких пісковикових і груборитмічних світ переважають прямолінійніші та слабозгалужені форми здебільшого короткої довжини, які нагадують перистий, іноді паралельний, тип рисунку долиної мережі. Ця закономірність свідчить, що просторове ускладнення ерозійних систем зумовлене не лише загальною енергією рельєфу, а й літологічним контролем, який визначає ступінь врізання, густоту та розгалуженість форм.

Отож просторова організація ерозійної мережі в гірській частині басейну Бистриці Тисменицької є результатом сукупного впливу морфометричних і літологічних факторів. Морфометрія басейну визначає загальний енергетичний фон розвитку ерозійних форм, тобто потенціал врізання і розгалуження тальвегової мережі, тоді як геологічна будова конкретизує цей потенціал через різну стійкість відкладів до розмиву. Розгалуженість ерозійної мережі слід розглядати як просторовий індикатор поєднаного впливу рельєфу і субстрату. Це

дає підстави використовувати конфігурацію ерозійної мережі як діагностичну ознаку для виявлення ділянок підвищеної морфодинамічної активності та для просторового прогнозування зон можливого посилення ерозійних процесів.

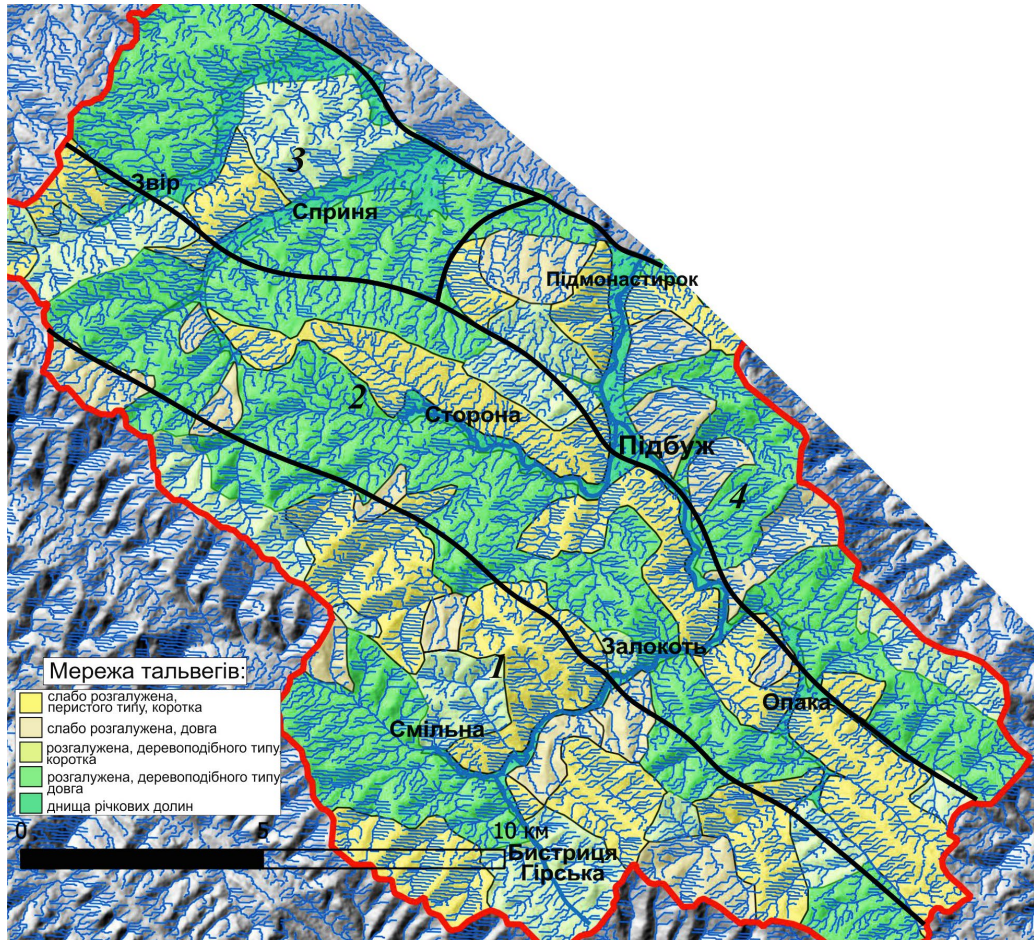


Рис. 5. Морфологічні типи та підтипи тальвегової мережі гірської частини басейну Бистриці Тисменицької (виконано у модулі SAGA Next Gen QGIS)

Fig. 5. Morphological types and subtypes of the thalweg network in the mountainous part of the Bystritsia Tysmenytska basin (generated using the SAGA Next Gen module in QGIS)

Аналіз проявів ерозії на прикладах ключових ділянок. Виявлені в межах усього басейну закономірності просторової диференціації ерозійної мережі стали підставою для її детальнішого аналізу на ключових ділянках в районі околиць смт Підбуж і с. Бистриця Гірська. Геолого-тектонічна неоднорідність створює неоднакові умови для формування і розвитку низькопорядкових долин, що простежується за формою їхніх поздовжніх профілів.

Обидва відрізки долини мають на цих ділянках згідно карпатське простягання – з південного сходу на північний захід. Проте морфологія правобережних і лівобережних схилів та відповідно ерозійного розчленування

різна. На відрізку смт Підбужа короткі і круті схили розташовані на лівому березі, тоді як на відрізку с. Бистриці Гірської подібні круті і короткі схили поширені на правому березі. Більш пологі і довгі схили на відрізку Підбужа розташовані з правого, а у Бистриці Гірській – з лівого боку долини.

Аналіз геологічних карт показує, що морфологічна асиметрія долини підпорядкована геологічній структурі. У Підбужі короткі круті схили розташовані у фронтальній зоні насувів, а у Бистриці Гірській – на крилі тектонічної луски у тилловій частині насуву. В обох випадках в основі тектонічних структур лежать стійкі щільні породи крейдового віку, які зумовлюють крутість схилів. Для них характерні здебільшого випуклі поздовжні профілі ерозійних форм (рис. 6). Будова профілю свідчить про незначні можливості для швидкого подовження ерозійних форм у верхів'ях. Морфодинамічний розвиток відбувається головню у їхніх нижніх частинах, де випуклий профіль найкрутіший (Ваурак, 2025). Проте врзання долинних форм значною мірою контролюється опірністю стійких флішових товщ.

Довгі пологіші схили хребтів приурочені до тиллових частин тектонічних структур. Їхню основу творять менілітові товщі палеогенового флішу глинистого складу, що є сприятливими для ерозії. Поздовжні профілі цих схилів, як і поздовжні профілі утворених в їхніх межах низькопорядкових ерозійних форм, виразно ввігнуті: круті верхні ділянки переходять у пологіші нижні частини (рис.7). Форма профілю вказує на те, що нижня частина ерозійної форми вже значною мірою стабілізована щодо зміни висотного положення базису ерозії, тоді як у верхів'ях зберігається високий потенціал подальшого росту. Інакше кажучи, розвиток таких форм відбувається переважно внаслідок регресивної ерозії, тоді як їхні нижні відрізки частково переходять у стадію відносної рівноваги. Якщо ерозія у верхів'ях затухає, то яркові форми починають рости у ширину, переходячи у яркоподібні долини. Поєднання крутих верхніх і пологіших нижніх частин є однією з морфологічних ознак активніших ерозійних систем.

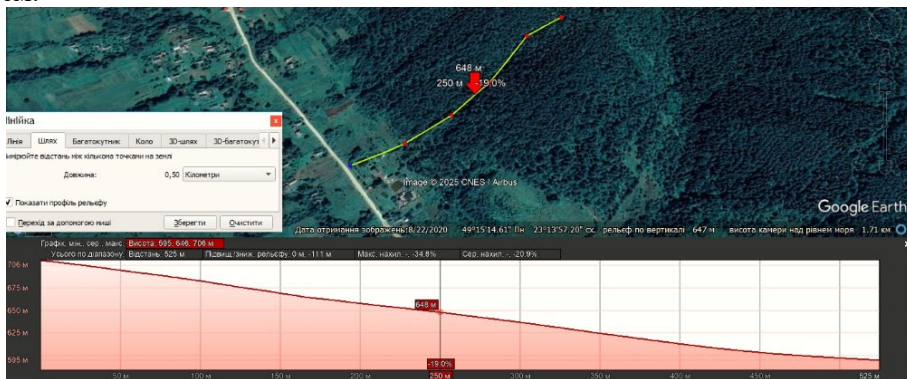


Рис. 6. Поздовжній профіль низькопорядкової долини на правому березі

Бистриці на ділянці с. Бистриця Гірська

Fig. 6. Longitudinal profile of a low-order valley on the right bank of the Bystrytsia River near the village of Bystrytsia Hirska

Для глибшого розуміння просторової організації лівобережних і правобережних схилів долини Бистриці були побудовані поперечні профілі. Вони відобразили, що довші та пологіші схили мають глибші врзи малих ерозійних форм і більшу щільність долинного розчленування. На коротких схилах, навпаки, врзи гірських ярів менші, подекуди яри взагалі відсутні. Поперечні профілі схилів підтверджують, що ерозійна мережа у податливих відкладах є активнішою і морфологічно складнішою, ніж у стійкіших породах.

Отже, ключові ділянки в районі Підбужа і Бистриці Гірської наочно демонструють, що навіть у межах однієї річкової долини морфодинаміка ерозійних форм може значно різнитися на протилежних берегах під впливом структурного контролю та морфометрії схилів.

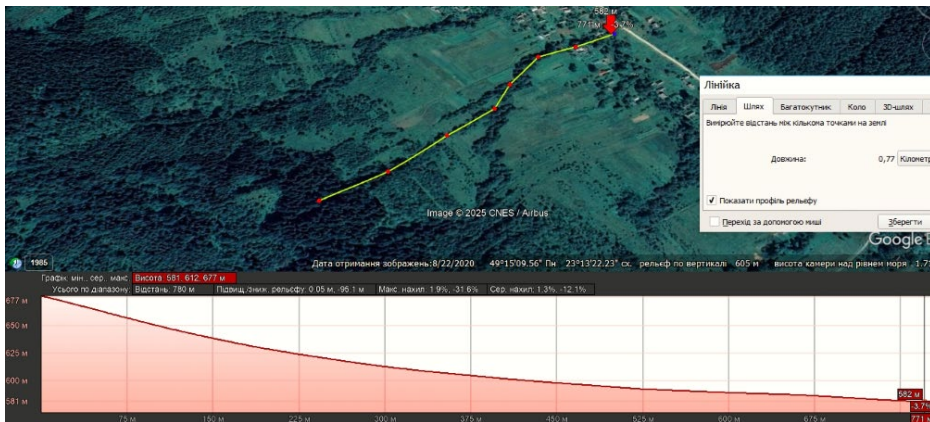


Рис. 7. Поздовжній профіль низькопорядкової долини на лівому березі Бистриці на ділянці с. Бистриця Гірська

Fig. 7. Longitudinal profile of a low-order valley on the left bank of the Bystrytsia River near the village of Bystrytsia Hirska

Зміни земного покриття на ключовій ділянці Бистриці Гірської за даними різночасових матеріалів ДЗЗ. Важливим етапом дослідження стало вивчення змін земного покриття на ключовій ділянці в районі с. Бистриця Гірська за даними різночасових дистанційних матеріалів. Саме методи ДЗЗ дали змогу простежити не лише сучасний стан території, а й реконструювати трансформацію природокористування протягом кількох десятиліть. Для цього використано аерофотознімки 1978 р. та космознімки Google Earth Pro за 2005 і 2020 рр. Їх порівняльне дешифрування дозволило виявити зміни у співвідношенні лісових площ, орних земель, луків і перелогів, а також оцінити, як ці зміни вплинули на умови розвитку ерозійних форм.

Стан території на 1978 рік відображає типову для Карпат структуру землекористування другої половини ХХ ст. У цей час значна частина схилів була господарськи освоєна (рис. 8). Лісові площі займали орієнтовно 45–50 % території річкового басейну, орні землі – близько 30–35 %, а луки, пасовища та перелоги – 20–25 %. На дистанційних матеріалах добре видно, що схили між ярами були інтенсивно використовувані, а поля та смужкові присадибні наділи піднімалися високо по схилах, місцями майже до верхів'їв низькопорядкових долин. Особливо виразно це простежувалося на лівому березі околиць Бистриці

Гірської, де рілля охоплювала не лише придолинні, а й середні частини схилів. Лісові масиви були фрагментованими й зосереджувалися переважно у привершинних частинах, а на окремих схилах фіксувалися вирубки. Така структура земного покриву створювала сприятливі умови для значного поверхневого стоку та інтенсивного розвитку ерозійних процесів.



Рис. 8. Фрагмент басейну р. Бистриці в с. Бистриця Гірська на аерофотознімку 1978 р.

Fig. 8. Fragment of the Bystrytsia River basin in the village of Bystrytsia Hirska on an aerial photograph from 1978

За матеріалами 2005 року простежується вже виразна трансформація структури земного покриву (рис. 9 а). Частка деревно-кущової рослинності збільшилася до 60–65 %, орні землі скоротилися приблизно до 15–20 %, а площа луків, пасовищ і перелогів залишилася на рівні 20–25 %, хоча частина цих

земель уже виявляла ознаки самозаліснення. За знімками видно, що багато колишніх полів були покинуті або подрібнені, а на їх місці почали формуватися молоді деревостани. Найвиразніше ці зміни проявилися на лівобережних схилах, де пологіші ділянки та наявність сприятливих умов сприяли швидкому поширенню молодого лісу. Правобережні схили також демонстрували зростання площі лісу, однак тут цей процес мав більш мозаїчний характер. Таким чином, уже на початку ХХІ ст. дистанційні матеріали фіксують перехід від інтенсивно освоєного аграрного ландшафту до частково залісненого, з поступовим згортанням традиційного землекористування.

Стан земного покриву на 2020 рік засвідчує подальший розвиток цієї тенденції. Лісові площі з рідколіссями і чагарниками досягли 70–75 % території, орні землі скоротилися до 5–10 % і збереглися переважно на нижніх частинах схилів поблизу села, тоді як луки та пасовища частково збереглися, але значною мірою перейшли у ранні стадії самозаліснення. На обох берегах добре простежується поступове "сповзання" лісу вниз по схилах, на місце колишніх полів, перелогів і городів (рис. 9 б). При цьому лівобережні схили заросли помітно інтенсивніше: густий деревний покрив тут значною мірою приховав давні ерозійні форми, хоча не усунув повністю їхнього морфологічного вираження. На правому березі приріст лісу також є виразним, однак структура земного покриву залишається контрастною і мозаїчною. Отже, за даними ДЗЗ

ключова ділянка пройшла за 1978–2020 рр. шлях від аграрно освоєного схилового ландшафту до переважно залісненого.

Аналіз дистанційних матеріалів свідчить не про повне припинення ерозійних процесів, а радше про їхню трансформацію. Заліснення суттєво зменшило інтенсивність площинного змиву та стримало активне подовження багатьох ярів, однак не усунуло літологічних і морфометричних передумов ерозійного врізання. Це особливо важливо для довгих схилів, де навіть за умов сучасного лісового покриву зберігається підвищений потенціал розвитку ерозійних форм. Дані ДЗЗ відобразили часову зміну структури земного покриву, що дало змогу з'ясувати, що сучасний стан яркоподібних долин є результатом взаємодії двох чинників: тривалого впливу господарського освоєння у минулому та подальшої природної стабілізації внаслідок заліснення. Проте залишається очевидним, що навіть за нинішнього лісового покриву в разі його порушення або відновлення господарського використання басейну, схили можуть швидко повернутися до активної ерозійної динаміки (Rogger et al., 2017).

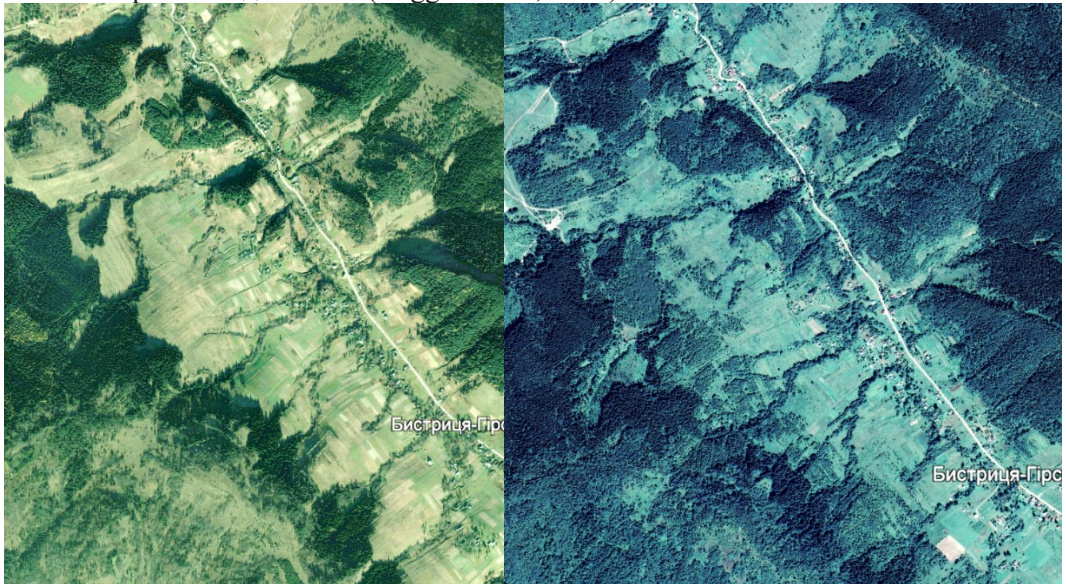


Рис. 9. Фрагмент басейну р. Бистриці в с. Бистриця Гірска на космознімках *a)* 2005 і *б)* 2020 років

Fig. 9. Fragment of the Bystritsia River basin in the village of Bystritsia Hirska on space photos *a)* 2005 and *b)* 2020

Таким чином, різночасові дистанційні матеріали є одним із ключових джерел для виявлення розвитку ерозійних мереж на досліджуваній ділянці. Вони дали змогу простежити зміну земного покриву впродовж понад сорока років, виявити просторові відмінності заліснення схилів різної крутості та з'ясувати, як трансформація land cover вплинула на сучасну ерозійну динаміку. Саме поєднання ДЗЗ із морфометричним і геолого-геоморфологічним аналізом дає можливість найповніше зрозуміти закономірності розвитку ерозійної мережі у гірській частині басейну Бистриці Тисменицької.

Сучасні прояви яркової ерозії та їхній зв'язок із водним режимом та змінами клімату. Попри заліснення схилів і загальну стабілізацію частини низькопорядкових долин, польові спостереження засвідчили, що глибинна ерозія в межах ключової ділянки поблизу смт Підбуж не припинилася. У днищах окремих ярів зафіксовано свіжі врізи завглибшки 15–20 см і максимально 30 см, що свідчить про сучасне локальне поглиблення тальвегів. Це означає, що навіть за умов добре розвиненого рослинного покриву ерозійний режим залишається активним, а його прояви виявляються під час детальних спостережень (рис. 10 а).

Окремою формою сучасної лінійної ерозії є новоутворені борозни та вимоїни вздовж ґрунтових доріг. Вони формуються там, де дорожні колії концентрують поверхневий стік і фактично виконують роль штучних водотоків під час злив і сніготанення. Через відсутність перешкод у мікрорельєфі і щільну трамбованість поверхні транспортом, потоки набирають швидкість та енергію, що сприяє розвитку глибинної ерозії навіть на схилах зі значним трав'яним покривом. За даними сучасних досліджень, дорожні ерозійні форми часто зростають швидше, ніж природні врізи, оскільки мають сталий "каналізований" шлях стоку та регулярно активізуються після кожного інтенсивного дощу (Zglobicki et al., 2003). На таких ділянках виникають паралельні прямолінійні борозни і вимоїни з чіткими бортами, які можуть швидко поглиблюватися і впливати на загальну структуру ерозійної мережі (рис. 10 б, в).



Рис. 10. Сучасні прояви ерозії: а) у днищі низькопорядкової долини біля смт Підбуж; б), в) вздовж ґрунтових доріг (околиці Підбужа і Сторони відповідно)

Fig. 10. Contemporary manifestations of erosion:
(a) in the floor of a low-order valley near the urban-type settlement of Pidbuzh;
(b), (c) along unpaved roads (outskirts of Pidbuzh and Storona, respectively)

Активізація сучасної ерозії пов'язана з особливостями водного режиму басейну. За гідрографом р. Бистриця (пост Озимина) найбільші підняття рівня води переважно припадають на весняно-літній період (Пилипович та ін., 2025). У цей період ерозійний ефект мають короточасні, але інтенсивні зливові паводки, які зумовлюють розвиток лінійних розмивів, особливо на дорогах, відкритих ділянках і в неукріплених тальвегах. Нерідко підняття рівнів води спостерігається й у зимовий період, коли стік зумовлений сніготаненням,

відлигами та обмеженою інфільтрацією у мерзлий або перезволожений ґрунт. У цей час формується триваліший водний стік, який сприяє поглибленню днищ ярів.

В гірській частині басейну Бистриці Тисменицької чітко проявляються глобальні зміни клімату, і їхній вплив безпосередньо відбивається на характері ерозійних процесів. За останні десятиліття регіон демонструє зростання частоти відлиг узимку, збільшення кількості днів із плюсовою температурою. Сучасні кліматичні зміни проявляються також у збільшенні кількості переходів температури через 0°C. За таких умов вплив відлиг на ерозійні процеси є неоднозначним. З одного боку, зменшення глибини промерзання може сприяти підвищенню інфільтрації. З іншого боку, для регіону характерні повторні цикли "відлига–замерзання", які призводять до формування малопроникного мерзлого або ущільненого підґрунтя, що обмежує інфільтрацію та сприяє розвитку поверхневого стоку. В результаті замість одного весняного максимуму формується кілька зимових гідрологічних подій, кожна з яких здатна ініціювати ерозійні процеси. Одночасно літній період стає дедалі більш контрастним: тривалі засушливі проміжки чергуються зі зливами високої інтенсивності, які формують різкі паводкові піки на гідрографі. Такий тип режиму характерний саме для клімату, що трансформується – коли загальна кількість опадів суттєво не зростає, але розподіл у часі стає нерівномірним, імпульсним і енергетично насиченим (Hall et al., 2018; Leščešen, 2025).

Для гірського басейну це означає посилення обох механізмів ерозії – тривалої тало-водної у холодний сезон і концентрованої зливової у теплий. Додатковим фактором є збільшення кількості короточасних інтенсивних опадів у травні–серпні, що властиво теплішому атмосферному фону. У поєднанні з контрастністю порід та сучасним режимом заліснення це призводить до того, що ерозійна мережа не стабілізується, а залишається динамічною: яри продовжують поглиблюватися, з'являються нові врізи у днищах, а окремі схили зазнають повторної активізації, навіть якщо вони зовні вкриті дерном або молодим лісом. Інакше кажучи, кліматичні зміни не просто супроводжують розвиток ярів – вони створюють ритм ерозійних імпульсів, який визначає сучасну морфодинаміку басейну Бистриці.

Обговорення. Результати дослідження добре узгоджуються з напрацюваннями центральноевропейських авторів, які показують, що розвиток ерозійних форм у Карпатському регіоні відбувається в межах природних передумов (морфометрії рельєфу, літології та кліматичного режиму), тоді як визначальним чинником їхньої активізації виступають зміни природокористування. Для Польських Західних Карпат показано, що скорочення орних земель і зростання лісистості після згортання традиційного господарського використання суттєво трансформують схилі процеси та зменшують середні показники ерозії. Ці явища описано в роботах A. Buceła-Hrabia, R. Krocak та співавторів, а також у довготривалих польових спостереженнях E. Gil та співавторів (Buceła-Hrabia, 2014; Krocak et al., 2018; Gil et al., 2021). Подібний методичний підхід простежується і в Чехії, де M. Váňová та J. Krása довели ефективність поєднання історичних і сучасних аерознімків для реконструкції розвитку водної ерозії та ефермерних ярів (Váňová

& Krása, 2016). J. Fidelus-Orzechowska зі співавторами на прикладі Татр дослідили, що навіть на невикористовуваних гірських лісових дорогах триває активна трансформація мікрорельєфу, а дорожнє полотно і прилеглі схили залишаються осередками локальної концентрації стоку та ерозійного врізання, що добре узгоджується з нашими спостереженнями новоутворених борозен уздовж ґрунтових доріг у басейні Бистриці Тисменицької (Fidelus-Orzechowska et al., 2025). Для Західних Карпат словацькі дослідники M. Saksa та J. Minár підтвердили, що ГІС-орієнтовані геоекологічні моделі придатні для оцінювання небезпеки яркової ерозії на основі морфометричних і середовищних параметрів (Saksa & Minár, 2012). У Румунії I. Ionita обґрунтував пульсуючий характер розвитку ярів за матеріалами аерофотознімання, повторних зніманих і довготривалого моніторингу (Ionita, 2006). Новіші роботи С. V. Patriche та M. Virghileanu демонструють, що моделі ерозії, поєднані з Earth Observation, дозволяють оцінювати не лише сучасний стан, а й можливі зміни ерозійної активності під впливом землекористування та клімату (Patriche, 2023; Virghileanu, 2024). Для Угорщини I. Waltner та співавтори показали, що навіть на регіональному рівні зміни land cover, простежені в ГІС, суттєво змінюють просторовий розподіл ерозійного потенціалу (Waltner et al., 2020). На цьому тлі наше дослідження доповнює наявні праці тим, що для гірської частини басейну Бистриці Тисменицької поєднано різночасові дистанційні матеріали, DEM-морфометрію, аналіз кривизни поверхні, автоматизоване виділення тальвегів і польові дослідження, завдяки чому вдалося простежити загальну тенденцію до заліснення і часткової стабілізації схилів, а також збереження локальної активності ерозійних форм на літологічно та морфометрично вразливих ділянках.

Висновки

1. Поєднання методів ДЗЗ і ГІС дало змогу проаналізувати просторову диференціацію та сучасний розвиток яркоподібних долин у гірській частині басейну Бистриці Тисменицької. Використання DEM SRTM, морфометричних показників, автоматизованого виділення тальвегів і різночасових дистанційних матеріалів забезпечило комплексну оцінку ерозійної організації басейну.

2. У межах досліджуваної території виділено чотири підрайони, які різняться за висотами, крутістю схилів, глибиною ерозійного розчленування та морфологією поверхні. Найбільш контрастний рельєф характерний для південної частини басейну, у якій більше поширені стійкі породи крейдового віку. У північному напрямі простежується поступове виположення рельєфу, пов'язане із ширшими смугами розвитку податливих порід палеогену.

3. ГІС-узагальнення просторової структури низькопорядкової долинної мережі дозволило з'ясувати, що її конфігурація закономірно відображає спільний вплив морфометрії рельєфу та геологічної будови басейну. За вищої морфометричної контрастності і податливих порід формується густіша та розгалуженіша мережа, тоді як стійкі флішові товщі зумовлюють розвиток коротких і слабо розгалужених долин. Її просторову диференціацію першочергово також визначають насувна тектонічна структура і четвертинні покривні відклади. Конфігурація ерозійної мережі може слугувати індикатором

сучасної морфодинамічної активності та основою для прогнозування зон можливого посилення ерозійних процесів.

4. Виявлено виразну диференціацію розвитку ерозійних форм у межах різних морфометричних і літологічних умов: довгі пологі схили, сформовані у податливих породах, характеризуються більшою густотою та глибиною врізів, ввігнутими поздовжніми профілями і вищим потенціалом ерозійної активності, ніж круті короткі схили, розвинені у стійких породах у фронтальних частинах насувів.

5. За даними різночасових дистанційних матеріалів упродовж 1978–2020 рр. на ключовій ділянці відбулося скорочення орних земель і зростання лісистості. Це зменшило інтенсивність площинного змиву і сприяло частковій стабілізації яркоподібних долин у загальному плані, однак не усунуло ерозійної активності у малому масштабі.

6. Сучасний розвиток ерозійної мережі підтримується поєднанням літологічних і морфометричних передумов, змін земного покриву та сезонних гідрологічних імпульсів. Отримані результати можуть бути використані для оцінки ерозійної небезпеки та для подальших досліджень морфодинаміки гірських басейнів Українських Карпат.

Подяки. Дослідження виконано в рамках теми П2-БФ "Географічні основи збалансованого використання басейнових систем в умовах зміни клімату".

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

- Байрак Г., Луцишин О. Процеси площинної ерозії у флювіальній геоморфосистемі Бистриці Тисменицької та перспективи геопланування території. // Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2025. Вип. 1(18). С. 164–180. <https://doi.org/10.30970/gpc.2025.1.4875>
- Геологічна карта Українських Карпат. Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області України. Масштаб 1:100 000 / В. В. Глушко, В. В. Кузовенко, В. Е. Шлапінський; ред. Ю. З. Круський. Київ : ЗАО "Концерн Надра", 2007. 228 с.
- Кравчук Я. Геоморфологія Скибових Карпат. Львів : ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2005. 231 с.
- Пилипович О., Ковальчук І., Біланюк В., Грабар І. Гідрологічна характеристика та оцінка екологічного стоку води у р. Бистриці Тисменицькій (правої притоки р. Дністер). // Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2025. Вип. 1(18). С. 85–101. <https://doi.org/10.30970/gpc.2025.1.4864>
- Шлапінський В. Є., Гавришків Г. Я., Гаєвська Ю. П. Колектори нафти і газу в крейдово-палеоценових відкладах Скибового покриву Українських Карпат (північно-західна і центральна ділянки) та перспективи їх нафтогазоносності // Геологічний журнал. 2020. № 3 (372). С. 47–64. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.207341>
- Báčová M., Krása J. Application of Historical and Recent Aerial Imagery in Monitoring Water Erosion Occurrences in Czech Highlands. *Soil & Water Research*. 2016. Vol. 11, no. 4. P. 267–276. <https://doi.org/10.17221/178/2015-SWR>
- Bayrak G. Modelling of Water Erosion and Accumulation Processes along the Longitudinal Profiles of Ukrainian Carpathian Rivers. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2025. Vol. 34, no. 2. P. 239–250. <https://doi.org/10.15421/112521>
- Bucala-Hrabia A. The impact of human activities on land use and land cover changes and environmental processes in the Gorce Mountains (Western Polish Carpathians) in the past 50 years. *Journal of Environmental Management*. 2014. Vol. 138. P. 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.036>
- Fidelus-Orzechowska J., Cwiąkała P., Puniach E., Strzyżowski D. Transformation of slope microrelief across an unused mountain forest road – Analysis over an 8-year period (Tatra Mts, Poland). *CATENA*. 2025. Vol. 256. Art. 109085. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109085>

- Gallant J. C., Wilson J. P. Primary topographic attributes. In: *Terrain Analysis: Principles and Applications* / eds. J. P. Wilson, J. C. Gallant. New York : Wiley, 2000. P. 51–85.
- Gil E., Kijowska-Strugała M., Demczuk P. Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies. *CATENA*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105682>
- Hall J., Gunter B. Spatial patterns and characteristics of flood seasonality in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22, no. 7. P. 3883–3901. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3883-2018>
- Hengl T., Reuter H. I. (eds.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. Vol. 33. Elsevier, 2009.
- Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *CATENA*. 2006. Vol. 68, no. 2–3. P. 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.008>
- Krocak R., Fidelus-Orzechowska J., Bucala-Hrabia A., Bryndal T. Land use and land cover changes in small Carpathian catchments between the mid-19th and early 21st centuries and their record on the land surface. *Journal of Mountain Science*. 2018. Vol. 15. P. 2561–2578. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5095-y>
- Leščešen I. Hydrological shifts in the Carpathian Basin: Climate change impacts on summer low-flows. *Geographica Pannonica*. 2025. Vol. 29, no. 2. P. 108–120. <https://doi.org/10.5937/gp29-57090>
- Patriche C. V. Applying RUSLE for soil erosion estimation in Romania under current and future climate scenarios. *Geoderma Regional*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00687>
- Rogger M., Agnoletti M., Alaoui A. et al. Land-use change impacts on floods at the catchment scale – Challenges and opportunities for future research. *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53, no. 7. <https://doi.org/10.1002/2017WR020723>
- Saksa M., Minár J. Assessing the natural hazard of gully erosion through a Geoecological Information System (GeIS): a case study from the Western Carpathians. *Geografie*. 2012. Vol. 117, no. 2. P. 152–169. <https://doi.org/10.37040/geografie2012117020152>
- Virghileanu M. et al. RUSLE-based scenarios for sustainable soil management: Case studies from Romanian Subcarpathians. *European Journal of Soil Science*. 2024. <https://doi.org/10.1111/ejss.13526>
- Waltner I., Saeidi S., Grósz J., Centeri C., Laborczi A., Pásztor L. Spatial Assessment of the Effects of Land Cover Change on Soil Erosion in Hungary from 1990 to 2018. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, no. 11. Art. 667. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110667>
- Zglobicki W., Rodzik J., Schmitt A., Bork H.-R. Fazy erozji wawozowej w okolicach Kazimierza Dolnego. *Czlowiek w srodowisku przyrodniczym – zapis dzialnosci*. Sosnowiec, 2003. https://www.researchgate.net/publication/258283934_Fazy_erozji_wawozowej_w_okolicach_kazimierza_dolnego_Phases_of_gully_erosion_in_the_Kazimierz_Dolny_area

REFERENCES

- Bayrak, G., Lutsyshyn, O. Protsesy ploskhynnoi erozii u fluiualnii heomorfosystemi Bystrytsi Tysmenytskoi ta perspektyvy heoplanuvannya terytorii. *Problemy heomorfologii i paleoheografii Ukrainykh Karpat i prylehlykh terytorii*. 2025. Vyp. 1(18). S. 164–180. <https://doi.org/10.30970/gpc.2025.1.4875> (In Ukrainian)
- Heolohichna karta Ukrainykh Karpat. Zakarpatska, Ivano-Frankivska, Lvivska, Chernivetska oblasti Ukrainy. Masshtab 1:100 000 / V. V. Hlushko, V. V. Kuzovenko, V. E. Shlapinskyi; red. Yu. Z. Krupskyi. Kyiv : ZAO "Kontsern Nadra", 2007. 228 s. (In Ukrainian)
- Kravchuk, Ya. Heomorfologhiia Skybovykh Karpat. Lviv : VTs LNU im. Ivana Franka, 2005. 231 s.
- Pylypovych, O., Kovalchuk, I., Bilaniuk, V., Hrabar I. Hidrolohichna kharakterystyka ta otsinka ekolohichnoho stoku vody u r. Bystrytsi Tysmenytskii (pravoi prytoke r. Dnister). *Problemy heomorfologii i paleoheografii Ukrainykh Karpat i prylehlykh terytorii*. 2025. Vyp. 1(18). S. 85–101. <https://doi.org/10.30970/gpc.2025.1.4864> (In Ukrainian)
- Shlapinskyi, V. Ye., Havryshkiv, H. Ya., Haievska, Yu. P. Kolektory nafty i hazu v kreidovopaleotsenovykh vidkladakh Skybovoho pokryvu Ukrainykh Karpat (pivnichno-zakhidna i tsentralna dilianky) ta perspektyvy yikh naftohazonosnosti // *Heolohichniy zhurnal*. 2020. № 3 (372). S. 47–64. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.207341> (In Ukrainian)

- Báčová, M., Krása, J. Application of Historical and Recent Aerial Imagery in Monitoring Water Erosion Occurrences in Czech Highlands. *Soil & Water Research*. 2016. Vol. 11, no. 4. P. 267–276. <https://doi.org/10.17221/178/2015-SWR>
- Bayrak, G. Modelling of Water Erosion and Accumulation Processes along the Longitudinal Profiles of Ukrainian Carpathian Rivers. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2025. Vol. 34, no. 2. P. 239–250. <https://doi.org/10.15421/112521>
- Bucała-Hrabia, A. The impact of human activities on land use and land cover changes and environmental processes in the Gorce Mountains (Western Polish Carpathians) in the past 50 years. *Journal of Environmental Management*. 2014. Vol. 138. P. 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.036>
- Fidelus-Orzechowska, J., Ćwiąkała, P., Puniach, E., Strzyżowski, D. Transformation of slope microrelief across an unused mountain forest road – Analysis over an 8-year period (Tatra Mts, Poland). *CATENA*. 2025. Vol. 256. Art. 109085. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109085>
- Gallant, J. C., Wilson, J. P. Primary topographic attributes. In: *Terrain Analysis: Principles and Applications* / eds. J. P. Wilson, J. C. Gallant. New York : Wiley, 2000. P. 51–85.
- Gil, E., Kijowska-Strugała, M., Demczuk, P. Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies. *CATENA*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105682>
- Hall, J., Gunter, B. Spatial patterns and characteristics of flood seasonality in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22, no. 7. P. 3883–3901. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3883-2018>
- Hengl, T., Reuter, H. I. (eds.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science. Vol. 33. Elsevier, 2009.
- Ionita, I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *CATENA*. 2006. Vol. 68, no. 2–3. P. 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.008>
- Kroczak, R., Fidelus-Orzechowska, J., Bucala-Hrabia, A., Bryndal, T. Land use and land cover changes in small Carpathian catchments between the mid-19th and early 21st centuries and their record on the land surface. *Journal of Mountain Science*. 2018. Vol. 15. P. 2561–2578. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5095-y>
- Leščičen, I. Hydrological shifts in the Carpathian Basin: Climate change impacts on summer low-flows. *Geographica Pannonica*. 2025. Vol. 29, no. 2. P. 108–120. <https://doi.org/10.5937/gp29-57090>
- Patriche, C. V. Applying RUSLE for soil erosion estimation in Romania under current and future climate scenarios. *Geoderma Regional*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00687>
- Rogger, M., Agnoletti, M., Alaoui, A. et al. Land-use change impacts on floods at the catchment scale – Challenges and opportunities for future research. *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53, no. 7. <https://doi.org/10.1002/2017WR020723>
- Saksa, M., Minár, J. Assessing the natural hazard of gully erosion through a Geocological Information System (GeIS): a case study from the Western Carpathians. *Geografie*. 2012. Vol. 117, no. 2. P. 152–169. <https://doi.org/10.37040/geografie2012117020152>
- Virghileanu, M. et al. RUSLE-based scenarios for sustainable soil management: Case studies from Romanian Subcarpathians. *European Journal of Soil Science*. 2024. <https://doi.org/10.1111/ejss.13526>
- Waltner, I., Saeidi, S., Grósz, J., Centeri, C., Laborczy, A., Pásztor, L. Spatial Assessment of the Effects of Land Cover Change on Soil Erosion in Hungary from 1990 to 2018. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, no. 11. Art. 667. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110667>
- Zglobicki, W., Rodzik, J., Schmitt, A., Bork, H.-R. Fazy erozji wawozowej w okolicach Kazimierza Dolnego. *Człowiek w środowisku przyrodniczym – zapis działalności*. Sosnowiec, 2003. https://www.researchgate.net/publication/258283934_Fazy_erozji_wawozowej_w_okolicach_kazimierza_dolnego Phases of gully erosion in the Kazimierz Dolny area

Стаття надійшла в редакцію 05.03.2026

Прийнято до друку 29.04.2026

Дата публікації 19.05.2026