

УДК 551.4.013 (477.63)

DOI 10.32999/ksu2413-7391/2023-18-7

Сизенко О.В.,
старший викладач,
завідувач навчальної лабораторії топографії, картографії і дистанційних методів
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
syzenko@if.dnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9158-1693

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АВТОМАТИЧНИХ ПАТЕРНОВИХ МОРФОМЕТРИЧНИХ КЛАСИФІКАЦІЙ ФОРМ РЕЛЬЄФУ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ ВИСОТ

У статті проведено порівняльний аналіз автоматичних геоморфометричних класифікацій на основі цифрових моделей висот з використанням різних методів, зокрема методу класифікації форм рельєфу на основі індексу топографічної позиції (ТПІ) та методу геоморфонів. З метою порівняльного аналізу результатів класифікацій означені методики були апробовані на двох орієнтованих за основними сторонами горизонту ключових ділянках квадратної конфігурації з різною морфологією рельєфу в межах Дніпропетровської області. У результаті дослідження було встановлено, що патерни топографічної поверхні, виділені за методом геоморфонів, забезпечують більш точні й достовірні результати у великомасштабних дослідженнях порівняно з використанням ТПІ. Виявлено, що метод, заснований на індексі топографічної позиції, є найбільш придатним для середньо- та дрібномасштабного картографування, оскільки при однакових параметрах зовнішнього радіуса пошуку він показав меншу деталізацію. Основною проблемою геоморфометричного аналізу є те, що чітке розмежування форм рельєфу часто неможливе, оскільки вони не мають чітких меж, відповідно, інтерпретація цих форм, незважаючи на математичну основу класифікацій, все ще залишається досить суб'єктивною. Вперше в Україні для великомасштабного геоморфометричного аналізу на ключових ділянках було апробовано нову цифрову модель висот FABDEM з просторовою роздільною здатністю 1 дугова секунда, виявлено її переваги і недоліки порівняно з іншими аналогічними глобальними моделями. В дослідженні було уточнено базову термінологію геоморфометричних досліджень, запропоновано україномовні відповідники розробленим у зарубіжній літературі класам форм рельєфу на основі ТПІ та геоморфонам, обґрунтовано необхідність розмежування різновидів цифрових моделей, а саме цифрової моделі рельєфу (ЦМР) і цифрової моделі поверхні (ЦМП) у контексті розуміння рельєфу топографічної поверхні як організації поля висот. Результати дослідження можуть бути використані для вирішення різноманітних задач, пов'язаних з вивченням та аналізом рельєфу території.

Ключові слова: форма рельєфу, геоморфометрія, індекс топографічної позиції, геоморфон, FABDEM.

Syzenko O.V. Comparative analysis of automatic pattern morphometrical landform classifications based on digital elevation models

The paper presents a comparative analysis of automatic geomorphometric classifications based on digital elevation models using different methods, in particular, the method of classifying landforms based on the topographic position index (TPI) and the geomorphon method. For the purpose of comparative analysis of the classification results, these methods were tested on two key square-configured areas with different terrain morphology oriented along the main sides of the horizon within the Dnipro region. As a result of the study, it was found that the topographic surface patterns identified by the geomorphon method provide more accurate and reliable results in large-scale studies compared to the use of TPI. It was found that the method based on the topographic position index is the most suitable for medium- and small-scale mapping, since it showed less details with the same parameters of the outer search radius. The main problem of geomorphometric analysis is that a clear delineation of landforms is often impossible because they do not have clear boundaries, and thus the interpretation of these forms, despite the mathematical basis of classifications, is still quite subjective. For the first time in Ukraine, a new digital elevation model FABDEM with a spatial resolution of 1 arc second was tested for large-scale geomorphometric



analysis in key areas, and its advantages and disadvantages were identified in comparison with other similar global models. The study clarified the basic terminology of geomorphometric research, proposed Ukrainian-language equivalents to the classes of terrain forms developed in foreign literature. The necessity of distinguishing between types of digital models, namely, digital elevation model (DEM) and digital surface model (DSM) in the context of understanding the terrain as an organization of the elevation field was substantiated. The application of automatic classifications will solve the problem of the high cost and complexity of manual analysis of landforms and will accelerate the creation of large-scale geomorphological maps with nationwide coverage.

Key words: landform, geomorphometry, topographic position index, geomorphon, FABDEM.

Постановка проблеми. Розвиток науки, необхідність зниження суб'єктивності та забезпечення відтворюваності результатів досліджень визначили перехід від переважно якісних характеристик топографічної поверхні до кількісних параметрів. Традиційно головним джерелом кількісної геоморфологічної інформації були результати морфометричного аналізу топографічних карт. Із розвитком аерокосмічних та інформаційних технологій на зміну традиційним методам прийшов новий – цифрове моделювання, а головним носієм кількісної інформації у геоморфології стали цифрові моделі висот, що по суті є дискретними двовимірними функціями висоти у тривимірному евклідовому просторі (Guth et al., 2021). Такі моделі створюються шляхом комп'ютерної обробки геопросторових даних, які можуть бути отримані традиційним способом – з топографічних мап, або за допомогою аерозйомки чи космічної зйомки. Кожен з них має свої переваги: різночасові топографічні мапи містять достовірну інформацію про земну поверхню, аерозйомка є точнішою і доступнішою у локальному масштабі, космічна зйомка забезпечує глобальне покриття. Бурхливий розвиток цифрового моделювання на основі дистанційних методів став рушійною силою відродження морфометричних досліджень, адаптації існуючих чи впровадження нових класифікацій відповідно до наявних моделей та засобів їх геоінформаційного аналізу. Різноманіття підходів щодо класифікації форм рельєфу призвели до появи різних поглядів щодо їх сутності, а також до появи великої кількості методів їх отримання.

Більшість існуючих геоморфометричних досліджень зводяться до розробки і впровадження класифікацій на основі систематизації окремих характеристик топографічної поверхні: абсолютної висоти, похилу, експозиції, планової та поздовжньої кривизни тощо.

Проте є і методики, засновані на автоматичному виявленні морфотипів форм рельєфу – елементарних одиниць поверхні, визначених за синтезованими морфологічними та морфометричними класифікаційними ознаками (Савка & Шушняк, 2019). Найбільш відомими з них є класифікація форм рельєфу на основі індексу топографічної позиції (Weiss, 2001) й метод геоморфонів (Jasiewicz & Stepinski, 2013). Однак бракує ретельної оцінки та порівняння цих методик. Крім того, майже не висвітлюється питання, як різні масштаби і набори вхідних даних узгоджуються у таких підходах. Питання точності та масштабування виникають, зокрема, для територій із сильним розмаїттям рельєфу, оскільки такі ландшафти є більш чутливими до змін роздільної здатності цифрової моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання аналізу і впровадження різних геоморфометричних підходів та класифікацій досить добре представлене у фаховій періодиці. Зокрема, існують дослідження, що на основі апробації виявили ефективність та придатність для різних територій як класифікації за індексом топографічної позиції (Mokarram, Roshan, & Negahban, 2015), так і методу геоморфонів (Veselský et al., 2015). Серед вітчизняних авторів варто відзначити системно-морфологічний підхід П. Горішного, де в якості критеріїв класифікації виділені знак форм, розмір, розмірність, розміщення у просторі, морфографічний тип, планові обриси, нахил і складність (Горішний, 2018). Іншим яскравим прикладом є семантико-орієнтований морфометричний аналіз рельєфу, висвітлений у роботі Савки і Шушняка (Савка & Шушняк, 2019), що має особливу цінність як спроба уніфікації україномовного термінологічного апарату з іншомовними аналогами.

Для оцінки придатності методу геоморфонів для аналізу морфологічних змін

у швидкозмінних прогляціальних умовах його було вперше застосовано у просторовому масштабі малої долини річки Скотт (Gawrysiak & Kociuba, 2020). Також було проведено порівняльний аналіз переваг та недоліків впровадження класифікації форм рельєфу за індексом топографічної позиції та методу геоморфонів на прикладі південної Італії (Gioia et al., 2020, 2021). Методику геоморфонів ефективно впроваджено для визначення геоморфологічного розмаїття геопарку Баконь-Балатон в Угорщині (Pál & Albert, 2021). Грунтуючись на результатах аналізу 59 англомовних публікацій за останні десять років, нещодавно було опубліковано огляд сфери застосування класифікації форм рельєфу з використанням геопросторових методів (Mashimbye & Loggenberg, 2023). Розробляються й нові підходи, реалізовані на основі індексу топографічної позиції (Siervo, Pescatore, & Giano, 2023). Усе це свідчить про актуальність означеної теми та її зв'язок із сучасними науковими та практичними завданнями.

Постановка завдання. Метою дослідження є порівняння двох доступних в якості готових ГІС-інструментів автоматичних патернових класифікацій форм рельєфу – заснованої на індексі топографічної позиції та методу геоморфонів.

Матеріали і методи. У дослідженні використовувалися матеріали і методи, вперше представлені в працях Ендрю Вайса (Weiss, 2001), Джефа Дженнеса (Jenness, 2006), Ярослава Ясевича і Томаша Степінські (Jasiewicz & Stepinski, 2013). В якості базового джерела для визначення морфометричних характеристик поверхні було використано FABDEM – субглобальну цифрову модель рельєфу, що являє собою покращений варіант Copernicus GLO 30 з виправленими похибками висот будівель і дерев (Hawker et al., 2022). Її роздільна здатність складає 1 дугову секунду (приблизно 30 м на екваторі). FABDEM поширюється за ліцензією Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 (Hawker & Neal, 2021). Для забезпечення коректності розрахунків, оригінальна FABDEM була перепроєктована з географічної системи координат у метричну прямокутну EPSG: 3395 WGS 84 / World Mercator. Модель оброблялася за допомогою програмних засобів, доступних у пакеті вільної крос-платформної геоінформаційної

системи QGIS версії 3.28.5, що є інтегрованою з іншими відкритими ГІС-пакетами. Розрахунок індексу топографічної позиції проводився з використанням модуля *TPI Based Landform Classification* підсистеми SAGA, виділення геоморфонів здійснювалося за допомогою модуля *r.geomorphon* підсистеми GRASS.

Виклад основного матеріалу. Оцінка придатності методик геоморфометричного моделювання вимагає чіткого й однозначного визначення номінальної поверхні, тобто фізичної поверхні, яку передбачається моделювати. Використання активних систем дистанційного зондування дозволяє виділити дві номінальні поверхні, а саме топографічну, що представлена у цифрових моделях рельєфу (англ. digital terrain models, DTM), та поверхню над рослинністю, льодовиками, будівлями, іншими природними або штучними об'єктами, що відображається у цифрових моделях поверхні планети (англ. digital surface models, DSM). Кожна з цих моделей є різновидом формалізованого представлення реальної поверхні планети (Polidori & Hage, 2020).

Протягом останнього десятиліття засобами космічної зйомки було створено декілька глобальних і субглобальних цифрових моделей висот з просторовою роздільною здатністю від трьох до однієї дугової секунди: SRTM, TanDEM-X 90, ASTER, Copernicus GLO-90, Copernicus GLO-30, AW3D30 та ін. Незважаючи на відмінності у типах чутників, методиках обробки та післяобробки, усі ці моделі належать до цифрових моделей земної поверхні. Найбільш наближеними до поняття цифрової моделі рельєфу є глобальна MERIT (Yamazaki et al., 2017) і представлена нещодавно субглобальна FABDEM (Hawker et al., 2022), обидві засновані на модифікації існуючих цифрових моделей висот.

Справжнім проривом стала поява технології виявлення і визначення дальності за допомогою світла (LIDAR), що використовує активні оптичні системи (лазери) для високоточного визначення перевищень засобами аерозйомки, найчастіше з використанням безпілотних літальних апаратів. У США протягом останніх восьми років на основі цієї технології впроваджується перша у світі національна програма тривимірного моделювання топографічної поверхні 3DEP (Stoker, 2020). На відміну



від радіохвиль, світлові хвилі LIDAR піддаються розсіюванню у будь-яких середовищах, тому можна не тільки визначати відстань до непрозорих дискретних цілей, а й фіксувати інтенсивність розсіювання світла у прозорих. Технологія є настільки точною, що отримана за допомогою неї поверхня використовується як еталонна для перевірки якості цифрових моделей висот, створених на основі радарної зйомки (Liao, Zhou, & Yang, 2021).

Індекс топографічної позиції (Topographic Position Index або TPI) – це геопросторовий індекс, що використовується для аналізу рельєфу топографічної поверхні. Він визначає рівень відхилення висоти конкретної точки від середньої висоти навколишньої території на певній відстані та може бути позитивним, негативним або нульовим, що вказує на те, чи знаходиться точка вище, нижче чи на рівні з середнім рівнем навколишньої території. Методологію і концепцію TPI було розроблено Е. Вайсом (Weiss, 2001) та вперше впроваджено у вигляді скрипту ESRI ArcGIS від Jenness Enterprises (Jenness, 2006). TPI функціонує як середній фільтр, де кожній комірці присвоюється середнє значення її оточення. Він використовує рухоме вікно, яке збирає інформацію про такі околиці. Зокрема, TPI обчислюється шляхом віднімання середньої висоти сусідніх комірок від висоти центральної комірки.

Форми рельєфу визначаються з використанням двох сіток TPI у різних масштабах для декількох радіусів околиць, що задаються змінними *мінімального* та *максимального радіусу*. Значення TPI можна класифікувати за допомогою порогового підходу, коли значення, що перевищують певний поріг, визначаються як високі, значення, що є нижчими за інший поріг, – як низькі, а значення між ними – як помірні. В результаті авторами методики було запропоновано десять класів форм рельєфу: 1) каньйони, глибоко врізані русла; 2) середньосхилові стоки, неглибокі долини; 3) нагірні стоки, верхів'я; 4) U-подібні долини; 5) рівнини; 6) відкриті схили; 7) верхні схили, плато; 8) локальні хребти / пагорби в долинах; 9) середньогір'я, невеликі горби на рівнинах; 10) гірські вершини, високі хребти.

Ясевич і Степінські (Jasiewicz & Stepinski, 2013) запропонували інший метод та визначили форми рельєфу як складові елементи

патерну – геоморфони (геоморфологічні фонові типи). Вони виділяються шляхом напіваавтоматичної класифікації цифрової моделі рельєфу та присвоєння кожній комірці растру інформації про її розташування (висоту) відносно восьми комірок у змінній близькості, яка задається оператором через параметр *радіус пошуку L* і пов'язує перевищення поверхні з горизонтальною відстанню за допомогою так званих зенітних та надирних кутів. Радіус пошуку дає можливість перекласифікувати цифрову модель залежно від особливостей рельєфу даної місцевості і бажаного ступеня генералізації (рис. 1).

Другим визначальним параметром методу геоморфонів є *поріг площинності d* – мінімальне значення кута прямої видимості між зенітом і надиром, яке рахується як відмінне від поземного. Чим вищий поріг, тим більші ухили будуть вважатися горизонтальними поверхнями. Якщо роздільна здатність цифрової моделі є низькою, поріг має бути дуже малим. Існує два додаткових параметри: *радіус пропуску S*, який використовується для усунення впливу дрібних нерівностей та *відстань вирівнювання F*, що усуває вплив дуже великих значень L, оскільки при таких значеннях можуть бути не виявлені перевищення, якщо точки знаходяться не дуже далеко одна від одної. Геоморфони відповідають практично усім морфологічним типам, які можуть зустрічатися в природному середовищі: існує 498 можливих варіацій геоморфонів, але через рідкісність деяких з них автори методики запропонували звести їх різноманіття до десяти найпоширеніших типів: 1) площа; 2) вершина; 3) хребет; 4) плече; 5) відрог; 6) схил; 7) улоговина; 8) підніжжя; 9) долина; та 10) яма.

Використання більших значень L та d рівнозначне більш дрібномасштабній та генералізованій класифікації форм рельєфу, тоді як використання менших значень рівнозначне великомасштабним локальним дослідженням. Візуально порівнявши попередньо отримані результати класифікації з різними значеннями внутрішнього та зовнішнього радіусів, було обрано порогові значення $L = 5\ 000$ м і порогом рельєфу $d = 1$ як найбільш придатні й такі, що відповідають реальному рельєфу досліджуваної території (наприклад, були виділені наступні особливості схилів: верхній та

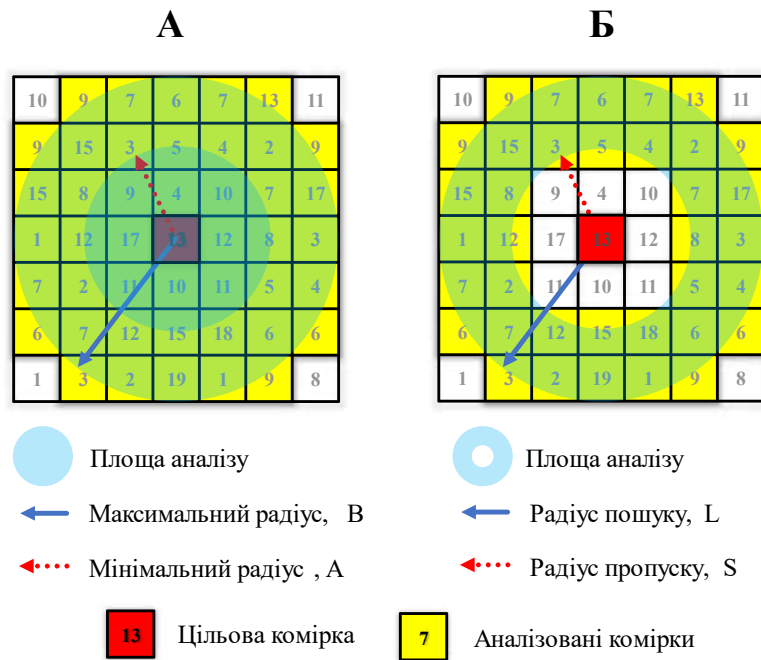


Рис. 1. Виявлення форм рельєфу в різних масштабах з використанням індексу топографічної позиції (А) за методом геоморфонів (Б)

підніжний схил, а також розбіжні, збіжні та прямолінійні схили).

З метою порівняльного аналізу результатів класифікацій, означені методики були апробовані на двох ключових ділянках квадратної конфігурації з різною морфологією рельєфу в межах Дніпропетровської області. Розміри ділянок становили 20×20 км, їх межі орієнтовано за основними сторонами горизонту. Перша ділянка розташована на височинному правобережжі Дніпра, має достатньо пересічений рельєф, ускладнений яружно-балковими системами та техногенними формами – кар'єрами Малишівського родовища ільменіт-рутил-цирконових пісків. Друга ділянка розташована на низовинному лівобережжі, у межах долини р. Самара. Обидві ділянки мають абсолютно плоскі форми – водну поверхню, що мають ідентифікуватися на цифровій моделі рельєфу: затоплені кар'єри на першій ділянці та оз. Солоний Лиман на другій. При виконанні класифікації розміри плаваючого вікна, що задаються зовнішнім радіусом, становили 5 км у обох методиках. Класифікація форм рельєфу на основі ТРІ здійснювалася у SAGA GIS з використанням модуля *TPI Based Landform Classification*, класифікація за методом геоморфонів – за допомогою модуля *r.geomorphon*

підсистеми GRASS у складі вільної геоінформаційної системи QGIS. Результати проведених класифікацій представлені на рис. 2.

Порівнявши отримані результати було встановлено, що метод, заснований на індексі топографічної позиції, видається найбільш придатним для середньо- та дрібномасштабного картографування, оскільки при однакових параметрах зовнішнього радіусу пошуку він показав меншу деталізацію в межах території дослідження. На противагу цьому підхід на основі геоморфонів досягає вищої точності та може бути використаний у великомасштабних дослідженнях. Однак він класифікує структури балково-долинних форм рельєфу менш детально порівняно з ТРІ, хоча кількість придатних класів є подібною. Метод геоморфонів є більш адаптивним до складних форм рельєфу, дозволяє ідентифікувати їх елементи незалежно від розмірів. Тим не менш, обидва підходи показали придатність для класифікації форм рельєфу в цьому масштабі. Також у ході дослідження було виявлено недоліки самої цифрової моделі рельєфу FABDEM. Зокрема, деревна рослинність у складі захисних лісосмуг в межах Дніпропетровської області не була видалена з моделі остаточно (рис. 3). Можна припустити, що це пов'язано з недостатньою

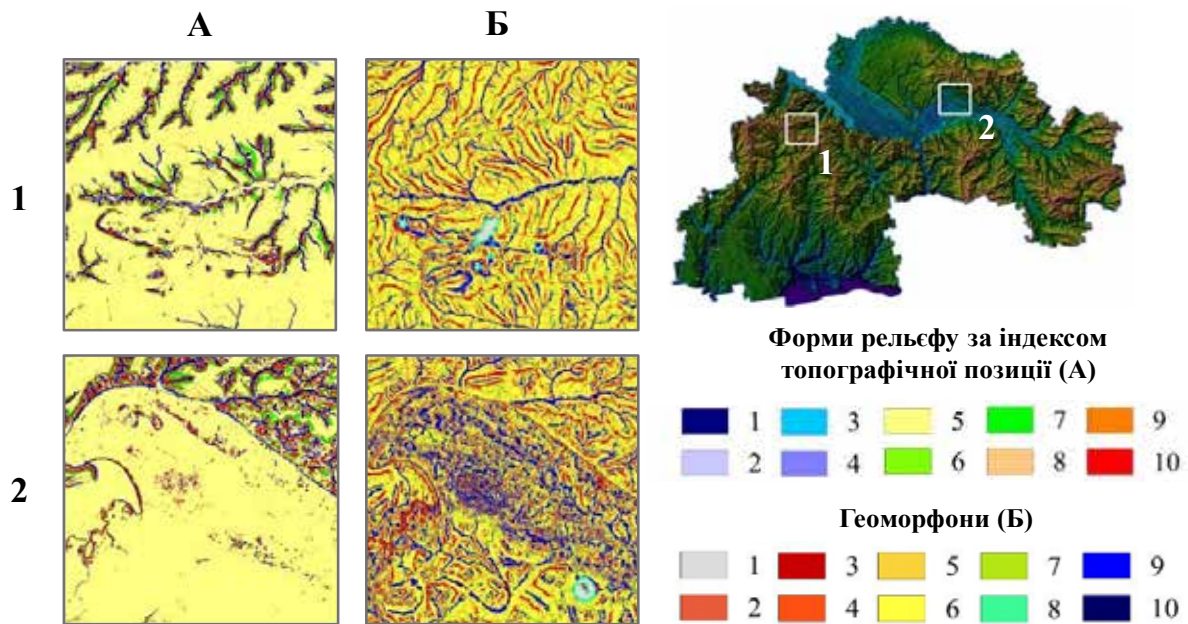


Рис. 2. Результати використання автоматичних класифікацій форм рельєфу на ключових ділянках 1 і 2 з використанням індексу топографічної позиції (А) та за методом геоморфонів (Б)

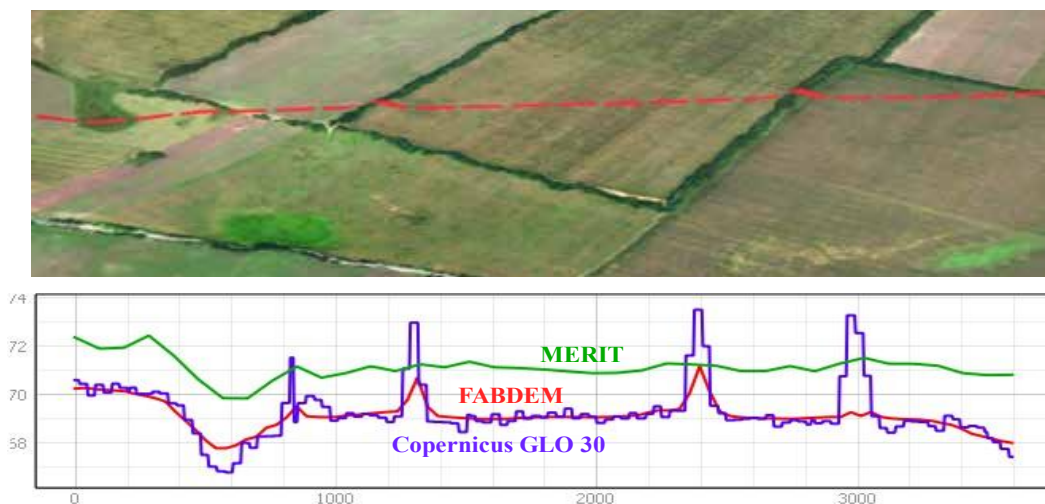


Рис. 3. Порівняння артефактів захисних лісосмуг на цифрових моделях висот MERIT, Copernicus GLO 30 та FABDEM

просторовою роздільною здатністю як базової моделі Copernicus GLO 30, так і даних щодо висоти деревного покриву, які були використані авторами FABDEM для коригування моделі.

Важливою умовою точності геоморфометричних класифікацій є параметри рухомого вікна, що визначає кількість навколишніх комірок, які були включені в аналіз. Сформулювати єдині критерії щодо підбору цих параметрів

доволі складно через різні характеристики і розміри форм рельєфу у різних місцевостях. В ідеальному випадку розміри мають задаватися таким чином, щоб охоплювати лише ті елементи топографічної поверхні, які безпосередньо впливають на форму рельєфу у цільовій комірці. Більші розміри вікна призводять до того, що в процесі класифікації у розрахунок включається забагато комірок, які не мають жодного впливу на аналізований рельєф.

Таким чином, вибір оптимального розміру вікна сильно залежить не лише від масштабу дослідження, а й від масштабу самого рельєфу; пологі ділянки здебільшого вимагають менших розмірів вікна для представлення дрібних елементів.

Основною проблемою геоморфометричного аналізу є те, що чітке розмежування форм рельєфу часто неможливе, оскільки вони не мають чітких меж, відповідно, інтерпретація цих форм, незважаючи на математичну основу класифікацій, все ще залишається досить суб'єктивною. Класи форм рельєфу з однаковою назвою не зовсім точно представляють одну і ту ж реальну форму рельєфу, що робить їх не повністю порівнянними. Як наслідок, при інтерпретації результатів зберігається залежність від знань інтерпретатора. Крім того, неможливо уникнути певного впливу суб'єктивності на процес оцінювання.

Висновки і перспективи щодо подальших досліджень. Використання цифрових моделей висот є все більш поширеним в сучасній геоморфології, ландшафтознавстві, географії та інших науках, що вивчають земну поверхню. Патернова морфометрія, представлена у обох аналізованих класифікаціях, є важливим інструментом для аналізу рельєфу, який дозволяє визначити характеристики поверхні з досить високою точністю та швидкістю. Застосування автоматичних класифікацій дозволить вирішити проблему високої вартості та складнощів ручного аналізу форм рельєфу та разом із стрімким розвитком технологій дистанційного зондування прискорить створення великомасштабних геоморфологічних карт із загальнонаціональним покриттям.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Gawrysiak, L., & Kociuba, W. (2020). Application of geomorphons for analysing changes in the morphology of a proglacial valley (case study: The Scott River, SW Svalbard). *Geomorphology*, 371, 107449. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107449>.
2. Gioia, D., Danese, M., Bentivenga, M., Pescatore, E., Siervo, V., & Giano, S. I. (2020). Comparison of Different Methods of Automated Landform Classification at the Drainage Basin Scale: Examples from the Southern Italy. *Lecture Notes in Computer Science*. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58802-1_50.

3. Gioia, D., Danese, M., Corrado, G., Di Leo, P., Amodio, A., & Schiattarella, M. (2021). Assessing the Prediction Accuracy of Geomorphon-Based Automated Landform Classification: An Example from the Ionian Coastal Belt of Southern Italy. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 10(11), 725. URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi10110725>.
4. Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J., Hawker, L., Florinsky, I. V., Gesch, D. B., Reuter, H., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S., López-Vázquez, C., Carabjal, C. C., Albinet, C., & Strobl, P. (2021). Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. *Remote Sensing*, 13(18), 3581. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13183581>.
5. Hawker L. & Neal J. (2021): FABDEM V1-0. URL: <https://doi.org/10.5523/bris.25wfy0f9ukoge2g57a5mqpq2j7>.
6. Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J. L., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>.
7. Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147–156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>.
8. Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a. *Jenness Enterprises*. URL: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
9. Liao, J., Zhou, J., & Yang, W. (2021). Comparing LiDAR and SfM digital surface models for three land cover types. *Open Geosciences*, 13(1), 497–504. URL: <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0257>.
10. Mashimbye, Z. E., & Loggenberg, K. (2023). A Scoping Review of Landform Classification Using Geospatial Methods. *Geomatics*, 3(1), 93–114. URL: <https://doi.org/10.3390/geomatics3010005>.
11. Mokarram, M., Roshan, G., & Negahban, S. (2015). Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(4). URL: <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0055-9>.
12. Pál, M., & Albert, G. (2021). The use of geomorphons in geodiversity assessment. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-1363>.
13. Polidori, L., & Hage, M. E. (2020). Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 12(21), 3522. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12213522>.
14. Siervo, V., Pescatore, E., & Giano, S. I. (2023). Geomorphic analysis and semi-automated landforms extraction in different natural landscapes. *Environmental Earth Sciences*, 82(5). URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10823-4>.
15. Stoker, J. M. (2020). Defining technology operational readiness for the 3D Elevation Program – A plan for investment, incubation, and adoption. *U.S. Geological Survey Open-File Report*. URL: <https://doi.org/10.3133/ofr20201015>.



16. Veselský, M., Bandura, P., Burian, L., Hrciníková, T., & Bella, P. (2015). Semi-automated recognition of planation surfaces and other flat landforms: a case study from the Aggtelek Karst, Hungary. *Open Geosciences*, 7(1). URL: <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0063>.

17. Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. Poster Presentation. *ESRI Users Conference, San Diego, CA*. URL: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf.

18. Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J., Sampson, C., Kanae, S., & Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5844–5853. URL: <https://doi.org/10.1002/2017gl072874>.

19. Горішний, П. (2018). Класифікація рельєфу кар'єрів. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*, 8(1),

144–154. [Horishnyj, P. (2018). Classification of relief of quarries. *Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpatians and Adjacent Areas*, 8(1), 144–154. (In Ukrainian)]. URL: <https://doi.org/10.30970/gpc.2018.08.2024>.

20. Савка, Г., & Шушняк, В. (2019). Морфотипи рельєфу Розточчя. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*, 2(10), 52–72. [Savka, H., & Shushniak, V. (2019). Roztochia landform morphotypes. *Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpatians and Adjacent Areas*, 2(10), 52–72. (In Ukrainian)]. URL: <https://doi.org/10.30970/gpc.2019.2.3063>.

Стаття надійшла до редакції 02.06.2023.

The article was received 02 June 2023.