

АВТОМАТИЗОВАНА ЕКОЛОГО-МОРФОМЕТРИЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ РЕЛЬЄФУ БАСЕЙНУ ЧОРНОЇ ТИСИ

Олександр Мкртчян

Львівський національний університет імені Івана Франка

В статті розглянуто принципи і методика атоматизованої еколого-морфометричної класифікації рельєфу методом ітераційного кластерного аналізу, на прикладі басейну р. Чорна Тиса. Обґрунтовано критерії класифікації та рівні її детальності, охарактеризовано алгоритми обрахунку відповідних морфометричних характеристик, здійснено екологічну інтерпретацію отриманих кластерів із залученням додаткових геоекологічних даних. Робота базується на використанні вільнодоступних просторових даних та програмного забезпечення з відкритим кодом.

Ключові слова: ЦМР, екологічна морфометрія, кластерний аналіз даних, басейн Чорної Тиси.

Рельєф земної поверхні є важливим екологічним чинником, що впливає на різноманітні процеси, пов'язані з формуванням екологічних умов для живих організмів та їхніх угруповань, умов життєдіяльності та господарської діяльності людини, загальної геоекологічної ситуації. Екологічна значимість рельєфу водночас стосується екології як біологічної науки та соціоекології як науки про взаємодію людського суспільства з його природним середовищем. Це зумовлює доцільність та актуальність сучасного наукового напрямку – екологічної геоморфології, що формується на стику геоморфології й екології, та зокрема розглядає рельєф як непрямий екологічний чинник, що опосередковано впливає на життєдіяльність організмів, хід екологічних процесів, формування геоекологічної ситуації [1, 10].

Серед трьох базових характеристик рельєфу та його окремих форм – генезису, морфології та віку – безпосереднє екологічне значення має морфологія як вчення про форму нерівностей земної поверхні [9], які безпосередньо впливають на рух речовини під дією сили тяжіння, розподіл сонячної енергії, яка потрапляє на денну поверхню, і як наслідок – на едафічні, фізичко-хімічні та інші характеристики ґрунтів, кліматичні умови, забезпеченість ресурсами вологи, тепла та освітлення.

Поширення та посилення ролі кількісних методів дослідження у географічних науках мало наслідком зростання значення морфометрії – галузі геоморфології, яка зосереджується на аналізі кількісних характеристик елементів, форм та комплексів форм (типів) рельєфу. Методи морфометрії можуть ефективно застосовуватись для вирішення задач екологічної геоморфології. Відповідно, можна виділити науковий напрямок – екологічну морфометрію – який вирішує задачі екологічної геоморфології використовуючи методи морфометрії. Нами дається визначення екологічної морфометрії як галузі екологічної геоморфології, яка досліджує екологічне значення морфометричних характеристик [3].

Вагомим поштовхом до еволюції морфометричних методів досліджень стали розвиток геоінформаційних технологій, з відповідними можливостями представлення, аналізу та візуалізації даних, та поширення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) – зручного способу представлення топографічної поверхні у формі регулярної матриці перевищень. Шляхом застосування простих математичних операторів ЦМР можна перетворити на матрицю значень похилів поверхні, вертикального та горизонтального розчленування, інших морфометричних показників у формі похідних растрових шарів. Алгоритми, інтегровані в сучасні ГІС-пакети, дають змогу також обчислити за ЦМР низку гідрологічних параметрів (довжини ліній стоку, дренажну площу), а засоби картографічної алгебри – довільно перетворювати та комбінувати ЦМР за певними правилами.

Слід зазначити, що легкість обрахунку у сучасних ГІС низки морфометричних параметрів призвела до того, що використання цих параметрів у моделюванні та аналізі часто відбувається без належного теоретичного обґрунтування та змістовної інтерпретації одержаних кількісних показників. Стоїть задача обґрунтування набору морфометричних характеристик, які відображають певні екологічні чинники та процеси, зокрема – комплексних характеристик, які виводяться виходячи з певних теоретичних міркувань та процесних моделей.

Нами обґрунтовано три основні групи еколого-морфометричних характеристик за типом пов'язаних із ними екологічних чинників (градієнтів): 1) такі, що описують перерозподіл сонячної та теплової енергії; 2) такі, що характеризують перерозподіл вологи під дією сили тяжіння; 3) такі, що відображають рух твердої речовини під дією гравітації [2,4]. Кожній з цих груп може відповідати низка конкретних морфометричних характеристик, в залежності від специфіки території та просторового масштабу дослідження, а також мети дослідження та визначеного нею суб'єкту екосистеми.

В разі, коли йдеться про великомасштабний аналіз ландшафтів помірного поясу з переважанням флювіальних процесів, першу групу може представляти індекс інсоляції, що обраховується як інтегральне значення надходження прямої та розсіяної сонячної радіації за довільний період з урахуванням ефектів затінення. Насамперед, має значення відносна інсоляція елементів рельєфу протягом періоду активної вегетації рослин. Деяке значення також мають ефекти, пов'язані з місцевою циркуляцією повітряних мас, яка може впливати на формування локальних температурних інверсій та визначати умови мікроклімату.

Для відображення перерозподілу вологи за елементами рельєфу під дією гравітації доцільно використати складений топографічний індекс вологості (TWI), запропонований І. Муром та П. Гесслером. Цей індекс обраховується за формулою: $TWI = \ln(A_s / \tan \beta)$, де A_s – дренажна площа (площа водозбору, розрахована на одиницю довжини замикаючого контуру), β – похил поверхні [14]. Він відображає розташування в ландшафтній катені; великі його значення відповідають переважній акумуляції вологи, підвищеному вмісту її в ґрунті, що, відповідно, впливає на низку ґрунтових характеристик, на мікроклімат, водний баланс, як наслідок – на екологічні умови місцезростань.

Топографічний індекс вологості має найменші значення на вершинних поверхнях та верхніх частинах крутих схилів і найбільші – на нижніх увігнутих частинах схилів та у днищах долин. Цей індекс часто включають до числа показників, що використовуються для прогнозування характеристик ґрунтів.

Основним процесом, відповідальним за перерозподіл твердого матеріалу в умовах помірного гумідного клімату та гірського чи височинного рельєфу, є водна ерозія. Для визначення ерозійного потенціалу рельєфу можна використати вираз із модифікованого Універсального рівняння втрат ґрунту (RUSLE) [13]:

$$LS = (m+1) [A_s / a_0]^m [\sin \beta / b_0]^n,$$

де A_s – дренажна площа, β – похил поверхні, m і n – стандартні параметри, $a_0 = 22.1\text{м}$ – довжина і $b_0 = 0.09 = \sin(5.16^\circ)$ – похил поверхні стандартних ділянок, на яких визначались параметри моделі. Значення LS характеризує енергію схилових потоків і їхню здатність переносити тверді наноси за інших рівних властивостей ґрунту, рослинного покриву, клімату тощо.

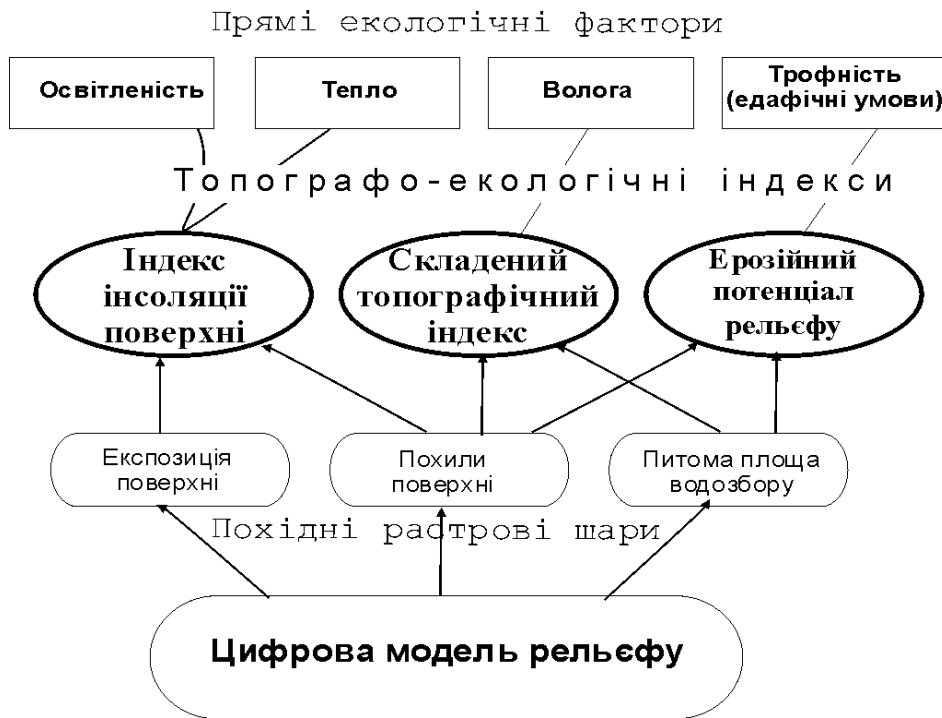


Рис. 1. Основні групи еколого-морфометричних характеристик, відповідні їм екологічні фактори та дані для їх обрахунку.

Вирішення низки прикладних завдань передбачає поділ території на ділянки, які вважають однорідними стосовно сукупності відповідних ознак. Так, завданням територіального планування є виділення територіальних одиниць, повідношенню до кожної з яких розробляють рекомендації щодо оптимального способу землекористування, введення заборон та обмежень, визначають доцільність застосування меліораційних, гідротехнічних та інших заходів, запровадження природоохоронного режиму, тощо. Тісний зв'язок між морфологією рельєфу та практично значимими характеристиками інших

компонентів зумовлює значимість екологічної морфометрії як важливого інструменту конструктивно-географічних досліджень. А доступність просторово-розподіленої інформації. Одним із завдань екологічної морфометрії є екологічна регіоналізація території шляхом її поділу на морфотопи – територіальні одиниці, які виділяються за ознаками морфології земної поверхні виходячи з принципу екологічної однорідності [5]. В разі, якщо критеріями їхнього виділення слугують морфометричні характеристики, існує можливість автоматизованого виділення морфотопів з використанням відтворюваної та прозорої (документованої) методики (алгоритму), перевагою якого є швидкість та незалежність від суб'єктивних рішень.

Нами даний підхід та засновану на ньому методику автоматизованого виділення морфотопів було апробовано двічі: на прикладі невеликої (1,5 км²) ділянки в околицях м. Львова, яка обіймає вододіл та верхні частини схилів двох невеликих долин басейну р. Полтви і для якої ЦМР була створена шляхом інтерполяції гіпсометричних шарів топокарти (роздільність 5 м) [2,6], та для більшої (6300 км²) ділянки в центральній частині Українських Карпат, для якої використано ЦМР SRTM v. 4.1 (роздільність 90 м) [4].

З метою екологічної класифікації елементів рельєфу та виділення відповідних територіальних одиниць (морфотопів) використано методику ітераційного кластерного аналізу, яка виділяє класи на основі аналізу природних поєднань даних (кластерів) у просторі атрибутів (кластеризація методом k-середніх). Алгоритм, на якому базується ця методика, полягає у розміщенні в просторі атрибутів (критеріїв класифікації) k центроїдів (k відповідає заданій кількості кластерів), та віднесенні кожного елемента (місцеположення, піксели) до кластеру із найближчим до нього положенням центроїду в багатовимірному просторі атрибутів, із наступним перерахунком положення центроїдів усіх кластерів. Після певної кількості ітерацій отримуємо поділ простору атрибутів на k областей, кожній з яких відповідає розміщений в ній окремий кластер (сукупність елементів з подібними значеннями атрибутів).

В якості критеріїв класифікації було використано три вищезазначені морфометричні характеристики, до яких у другому випадку (гірської території з великою амплітудою висот) було додано показник абсолютної висоти (яка в гірських умовах сама по собі є значимим непрямим екологічним градієнтом, впливаючи зокрема на кліматичні умови). В першому випадку було виділено п'ять морфотопів, з яких перший відповідає вузьким гребеням та крутим гравітаційним схилам; другий – виположеним вершинним поверхням, структурним ступеням на схилах та останцевим горбам; третій – випуклим пологим нижнім ділянкам схилів; четвертий – днищам балок та увігнутим нижнім ділянкам пологих схилів; п'ятий – верхнім спадистим частинам схилів. Дисперсійний аналіз виявив високу силу і значимість зв'язку між морфотопами та показником рясності анемони дібрової (F складає 4,175 при 4 ступенях свободи, що відповідає рівню достовірності зв'язку 0,9937). В другому випадку здійснено два варіанти регіоналізації: з заданою кількістю кластерів $k = 3$ та $k = 8$. В першому варіанті з трьох виділених автоматично кластерів (морфотопів) перший відповідав передгір'ям і днищам річкових долин, другий і третій –

переважно схилам протилежних експозицій, що відображає загальну морфологічну асиметрію схилів.

В нашому дослідженні територія охоплює басейн р. Чорна Тиса площею 568 км². На відміну від попереднього дослідження, в якості джерела морфометричної інформації використано більш детальну ЦМР SRTM з просторовою роздільністю ~ 30 м (1 кутова секунда). Завдання дослідження включали обрахунок екологічно значимих морфометричних характеристик, здійснення автоматизованої екологічної класифікації морфометрії рельєфу методом ітераційного кластерного аналізу, співставлення отриманих класів з деякими характеристиками рослинності та наземного покриву.

Обрахунок морфометричних характеристик, охарактеризованих вище, здійснений у середовищі відкритої ГІС SAGA за допомогою відповідних функцій [8,11]. До показників абсолютної висоти, індексу інсоляції, індексів TWI та LS, що характеризують перерозподіл вологи та твердої речовини під дією гравітації, доданий показник загальної кривизни, який, не будучи безпосередньо пов'язаним з іншими індексами, визначає відносне переважання процесів денудації і акумуляції, а також локальну циркуляцію повітряних мас, яка впливає на умови мікроклімату. Індекс інсоляції обраховано як сумарну величину надходження прямої та розсіяної сонячної радіації за умов безхмарної погоди, для періоду найбільш активної вегетації рослинності (1 квітня – 30 вересня). Для коректної класифікації усі зазначені критерії було стандартизовано (шляхом віднімання середнього значення та ділення на величину середньоквадратичного відхилення).

Класифікацію було здійснено у R – мові програмування та програмному середовищі для статистичних обчислень з вільнодоступним вихідним кодом, що включає велику низку спеціалізованих пакетів, зокрема – для роботи з геопросторовими даними. Растрові шари було імпортовано пакетом raster та об'єднано і перетворено у векторний формат SpatialPointsDataFrame. До останнього застосовано функцію kmeans пакету stats.

Використаний метод класифікації (k-середніх) передбачає необхідність попередньо задати кількість k кластерів, на які буде розбито територію досліджень. В залежності від значення цього параметру виділені кластери будуть більшою або меншою мірою відображати реальну диференціацію території за обраними критеріями.

Не існує єдиного універсального методу визначення об'єктивного значення цього параметру. Одним із способів визначити кількість кластерів, яка відповідає об'єктивному характеру просторової структури, є виявлення пунктів перегину на графіку, що показує залежність між кількістю кластерів та сумою квадратів відхилень значень критеріїв класифікації від середніх значень для кожного кластеру (рис. 2). Зі збільшенням кількості кластерів їхня внутрішня однорідність зростає, що відбивається у зменшенні внутрішньогрупової суми квадратів. Проте це зменшення загалом відбувається неоднорідно: при k, який відповідає природній об'єктивно вираженій структурі, зменшення цієї величини є найсильнішим, що відображається перегином на графіку.

Як видно з рис. 2, найсильніше зменшення внутрішньої неоднорідності кластерів спостерігається при збільшенні значення k до 4 та до 6; дещо менш виражені перегини на графіку також відповідають k = 8 та k = 17. Ці значення були прийняті в якості параметрів алгоритму k-середніх. Збільшення k відповідає

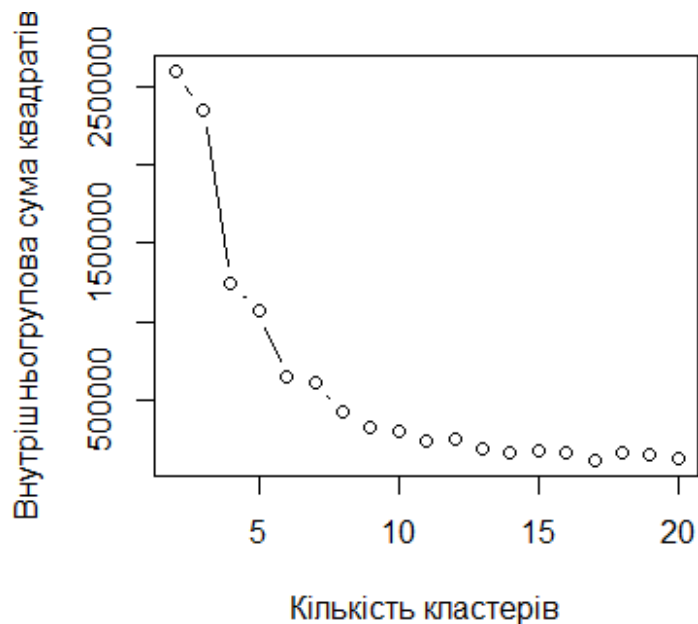


Рис. 2. Зменшення внутрішньокластерної суми квадратів зі збільшенням кількості кластерів.

більш детальній класифікації, тоді як зменшення – більш узагальненій. Інтерпретація отриманих кластерів здійснюється шляхом візуального аналізу їхнього просторового розміщення, а також шляхом визначення усереднених значень критеріїв (класифікаційних ознак) в межах кожного кластеру.

Розглянемо найбільш узагальнений варіант класифікації, з $k = 4$ (табл. 1). Кластер 1 відповідає пологим і спадистим, випуклим, добре освітленим схилам, характерним для Ясінської улоговини та нижньої і середньої частини долини Чорної Тиси. Кластер 2 відповідає верхнім ділянкам схилів та полонинським місцевостям, характеризується найвищими значеннями абсолютної висоти. Кластер 3 відповідає днищам долин річок і струмків, характеризується найменшими абсолютними висотами, від'ємною кривизною поверхні та найбільшими значеннями індексу TWI. Кластер 4 відповідає крутим увігнутим та затіненим схилам, із найвищими значеннями ерозійного потенціалу (індекс LS).

При $k = 6$ маємо іншу картину розподілу кластерів. Так, замість одного днищам долин тепер відповідають два різні кластери: кластер 1 – широким виположеним днищам і кластер 4 – вузьким глибоковрізаним. Кластер 2 загалом зберіг своє положення і став чіткіше відповідати високогірним полонинським формам, тоді як прилеглі до них верхні частини схилів відійшли до інших кластерів. В цілому зберегли своє положення кластери 1 та 4 (нім в цьому варіанті класифікації відповідають кластери 3 і 6). Проте з'явився цілком новий кластер 5, якому відповідають найбільш освітлені спадисті ділянки схилів (переважно в їх нижніх частинах), з найбільшими ресурсами тепла. Співвідношення між кластерами, виділеними при $k = 4$ і $k = 6$ наведено у табл. 2, а середні значення класифікаційних ознак для $k = 6$ – у табл. 3.

При $k = 8$ в окремий клас виділяються тераси та увігнуті водозбірні лійки, а також виділяються два окремі високогірні класи, які диференціюються за

ознакою експозиції. При $k = 17$ спостерігається подальша деталізація екологічної класифікації (тут не розглядається).

Більш детальну екологічну інтерпретацію та аналіз отриманих кластерів можна здійснити шляхом співставлення отриманих кластерів з просторово розподіленими характеристиками рослинності та наземного покриву. Одним з ефективних методів отримання таких характеристик є аналіз і класифікація дистанційних зображень Землі, насамперед – мультиспектральних супутникових зображень. Так, в геоекологічних дослідженнях ще від 1970-х років набув поширення Нормалізований вегетаційний індекс (NDVI), який обчислюють за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

де NIR – відбивна здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні; RED – відбивна здатність у червоному діапазоні спектру [15]. Більше значення цього індексу характеризує інтенсивність процесу фотосинтезу і тим самим – екологічний стан природної або культурної рослинності; у разі пошкодження рослинності хворобами, шкідниками, хімічними речовинами значення цього індексу, зазвичай, зменшується. Отже, цей індекс характеризує інтенсивність фотосинтезу, біологічну продуктивність екосистем, ступінь розвинутості й стан наземної фітомаси. В нашій роботі [7] показано, що даний індекс, обрахований за відповідними спектральними каналами мультиспектральних зображень системи LANDSAT TM, добре диференціює різні типи наземних покривів та деревостанів в Українських Карпатах, зокрема – дозволяє виокремити широколистяні деревостани, хвойні та трав'янисті (лучні) фітоценози.

Таблиця 1

Характеристика кластерів, виділених при автоматизованій класифікації території дослідження, $k = 4$.

Кластер	Середня висота н.р.м., м	Середній ухил поверхні, °	Середня кривизна поверхні	Середнє значення індексу TWI	Середнє значення індексу LS	Середнє значення індексу інсоляції
1	943,7	15,7	0,0032	7,74	9,03	1373,9
2	1291,3	18,9	0,0004	8,19	12,97	1403,8
3	895,1	12,9	-0,005	10,18	9,92	1335,7
4	1069	26,3	-0,0016	7,97	19,5	1107,2

Таблиця 2

Співвідношення (відповідність) кластерів, виділених при $k = 4$ і $k = 6$, (% площі кластерів при $k = 4$, розподілених серед кластерів при $k = 6$)

k=4	k=6						Загалом
	1	2	3	4	5	6	
1	11.01	0.79	59.28	0.61	23.91	4.40	100
2	7.75	54.71	6.05	5.78	20.70	5.00	100
3	62.11	1.01	3.64	16.62	10.30	6.32	100
4	1.32	1.64	3.14	12.74	5.31	75.85	100

Таблиця 3

Характеристика кластерів, виділених при автоматизованій класифікації території дослідження, k = 6.

Кластер	Середня висота н.р.м., м	Середній ухил поверхні, °	Середня кривизна поверхні	Середнє значення індексу TWI	Середнє значення індексу LS	Середнє значення індексу інсоляції
1	864,2	9,9	-0,0037	10,29	6,26	1348,3
2	1434,4	18,4	0,0021	7,98	11,85	1408,4
3	971,1	14,3	0,006	7,53	7,43	1366,4
4	1040	20,9	-0,0124	10,04	19,41	1282
5	954,1	21,3	-0,0013	7,99	15,27	1428
6	1087,8	25,5	0,0003	7,66	18,44	1101,8

В даному дослідженні значення індексу NDVI були обраховані за мультиспектральними космоснімками Landsat 5 ETM+ (Path 184, Row 026, 027, станом на 2 серпня 1998 р.), використовуючи канали 3 (червоний) і 4 (ближній інфрачервоний). Методом зональної статистики обраховані середні значення даного індексу в межах виділених кластерів при k = 4,6,8 (табл.4). Можна зауважити, що кластери суттєво відрізняються за цими значеннями, при чому ступінь диференціації зростає зі збільшенням деталізації класифікації (зростанням k). Найменші значення індексу NDVI прогнозовано спостерігались у кластерах, які відповідають високогірним біотопам з переважанням субальпійської рослинності (кластер 2 при k = 4 і k = 6, кластери 5 і 7 при k = 8), а також – біотопам днищ долин, де поширені антропогенні типи наземного покриву та вторинні луки (кластер 3 при k = 4, кластер 1 при k = 6, кластер 6 при k = 8). Найбільші значення, натомість, властиві схиловим морфотопам, переважно вкритим лісами

Таблиця 4

Розподіл середніх значень індексу NDVI за виділеними кластерами

k=4		k=6		k=8	
Кластер	NDVI	Кластер	NDVI	Кластер	NDVI
1	0,82	1	0,78	1	0,84
2	0,78	2	0,76	2	0,81
3	0,78	3	0,82	3	0,82
4	0,82	4	0,81	4	0,83
		5	0,83	5	0,79
		6	0,82	6	0,76
				7	0,76
				8	0,81

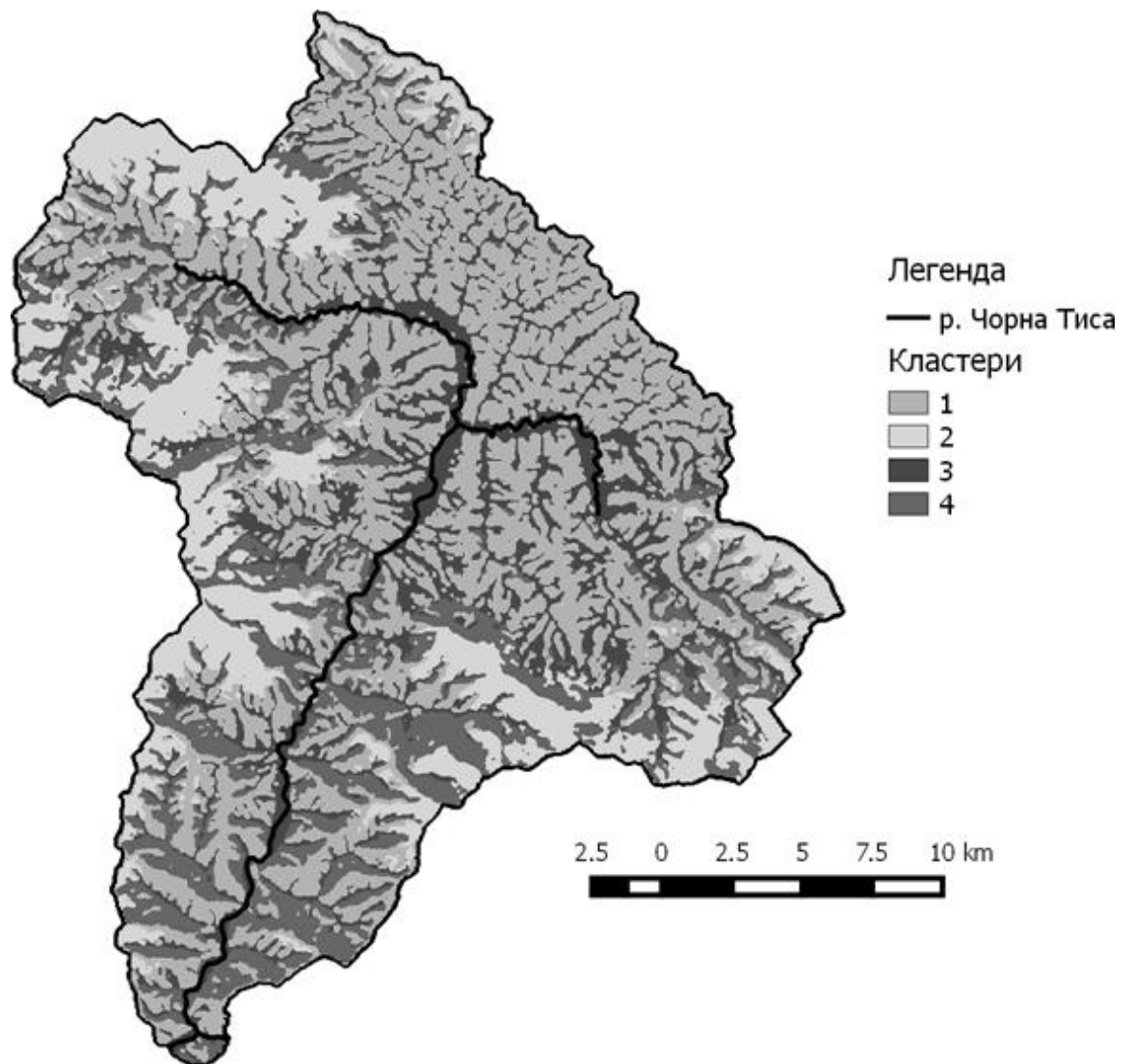


Рис. 3. Просторовий розподіл еколого-мофрометричних кластерів, при $k = 4$.

Отримані кластери також можуть характеризуватись неоднаковою динамікою екологічних процесів, як природних, так і пов'язаних з антропогенною діяльністю. Для обрахунку показника екологічної динаміки нами використано наявний у вільному доступі тематичний набір геоданих, що отриманий в результаті аналізу різночасових знімків Landsat 7 ETM+ та характеризує динаміку лісового покриття за період 2000–2014 р.р. [12] Методом зональної статистики обраховано середні значення зменшення загальної лісистої для виділених кластерів за зазначений період (табл. 5).

Можна зауважити суттєві (у декілька разів) відмінності між різними кластерами стосовно темпів зменшення лісистої за вказаний період. Причини цих відмінностей потребують подальшого вивчення.

Таблиця 5

Розподіл середніх часток втрат лісів за 2010-14 від загальної площі за виділеними кластерами

k=4		k=6		k=8	
Кластер	Частка зменшення залісної площі	Кластер	Частка зменшення залісної площі	Кластер	Частка зменшення залісної площі
1	0,1075	1	0,0881	1	0,0497
2	0,0378	2	0,0173	2	0,0448
3	0,0734	3	0,1081	3	0,0966
4	0,0321	4	0,0438	4	0,0791
		5	0,0842	5	0,019
		6	0,0381	6	0,0784
				7	0,0181
				8	0,1082

Рельєф земної поверхні є важливим чинником перерозподілу сонячної радіації, вологи та потоків речовини, а отже – морфометричні характеристики рельєфу можуть слугувати значимими непрямими екологічними факторами. Запропоновано виділення наукового напрямку – екологічної морфометрії як галузі екологічної геоморфології, яка досліджує екологічне значення морфометричних характеристик рельєфу, залежності між морфометричними параметрами та екологічними чинниками. Одним із завдань екологічної морфометрії є екологічна регіоналізація території шляхом її поділу на морфотопи – територіальні одиниці, які виділяють за ознаками морфології земної поверхні виходячи з принципу екологічної однорідності. Можливості сучасних ГІС-технологій та дистанційних геоданих дозволяють автоматизувати процес виділення таких одиниць, надавши йому відтворюваності, прозорості та об'єктивності. Одним з методів цього є ітераційний кластерний аналіз, що дозволяє розбити територію на певну кількість кластерів, які характеризуватимуться певним рівнем екологічної однорідності. Метод кластерного аналізу відповідає типологічному підходу до районування, адже виділені кластери являють собою просторово розімкнуті територіальні одиниці (представлені сукупністю геометрично не пов'язаних між собою виділів). Даний метод може бути доповнений методом сегментації, який дозволяє отримати просторово суцільні територіальні одиниці (сегменти), враховуючи з-поміж критеріїв районування геопросторові характеристики (суміжність, компактність тощо); останній метод відповідає регіональному підходу до районування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ковальчук І.* Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. - Львів, 1997. - 438 с.
2. *Ковальчук І.* Автоматизована екологічна класифікація елементів рельєфу та її застосування для вивчення річково-долинних ландшафтів / І. Ковальчук, О. Мкртчян // Вісн. Львів. ун-ту. Серія геогр. – 2008. – Вип. 35. – С.159-164.
3. *Мкртчян О.С.* Екологічна морфометрія як перспективний напрямок еколого-геоморфологічних досліджень / О.С.Мкртчян // Фізична географія і геоморфологія. – 2010. – Вип. 1(58). – С.131-136
4. *Мкртчян. О.С.* Еколого-морфометричний аналіз гірських територій на прикладі ділянки Українських Карпат / О.С.Мкртчян // Фізична географія і геоморфологія. – 2013. – Вип. 2 (70). – С.129-137.
5. *Мкртчян О.* Морфотопи як територіальні одиниці картування та оцінки природних умов / О. Мкртчян // Наук. записки Тернопільського національного педагог. ун-ту. Сер. геогр. –2004. –№ 3. – С. 181-187.
6. *Мкртчян О.* Принципи автоматизованого ландшафтно-екологічного картування / О. Мкртчян // Уч. зап. Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. – 2008. – Том 21 (60), №2. – С.238-247.
7. *Мкртчян О.С.* Цифровий аналіз мультиспектрального космоснімка Landsat 7 ETM+ ділянки центральної частини Українських Карпат / О.С.Мкртчян // Вісник Львів. ун-ту. Сер. геогр. – 2013. – Вип. 41. – С.205-212.
8. *Свідзінська Д.В.* Методи геоекологічних досліджень: геоінформаційний практикум на основі відкритої ГІС SAGA: навчальний посібник / Д.В. Свідзінська. – К.: Логос, 2014. – 402 с.
9. *Симонов Ю.Г.* Геоморфологія. – СПб.: Питер, 2005. – 427 с.
10. *Стецюк В.В.* Основи екологічної геоморфології / В.В.Стецюк, Ю.А. Сілецький – Київ: Четверта хвиля, 2000. – 348 с.
11. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geosci. Model Dev. – 2015. – N. 8. – P. 1991-2007.
12. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. – 2013. – Vol. 342, Iss. 6160. – P. 850-853
13. *Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson R. L.* Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS // Int. Journal of Geographical Information Science. –1996.–10(5). – P. 629-641.
14. *Moore I.D., Gessler P. E., Nielsen G. A., Peterson G. A.* Soil attribute prediction using terrain analysis // Journal of Soil Science Society of America. –1993. –Vol. 57. – P. 443–452.
15. *Rouse J.W., Haas R.H., Rouse J.W., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Third ERTS Symposium. NASA SP-351(I), – 1973. – P. 309-317.

AUTOMATED ECOLOGO-MORPHOMETRIC CLASSIFICATION OF RELIEF OF BLACK TISA BASIN

O. Mkrtchian

Ivan Franko National University of Lviv

The principles and methods of automated ecologo-morphometric classification of relief by means of iterative clustering on example of Black Tisa basin are considered in the paper. The ecologically meaningful terrain characteristics have been calculated using SRTM DEM as primary data source. These characteristics pertain to major groups of indirect ecological factors, like solar light exposure, water and sediment redistribution, considering also absolute elevation and total land surface curvature. These characteristics were standardized prior to classification, and the appropriate predetermined numbers of clusters related to the levels of detalisation have been estimated by elbow method. The k-means clusterization algorithm has been computed by kmeans function of R software environment, preceded and followed by appropriate data format transformations. The obtained clusters have been ecologically interpreted, using zonal statistics on ecologically meaningful terrain characteristics, and also by calculating mean values of NDVI index and mean deforestation rates for different clusters.

Key words: DEM, ecological morphometry, cluster data analysis, Black Tisa basin.