

УДК 911.2

Д.В. Свідзінська**ВИДІЛЕННЯ МОРФОДИНАМІЧНИХ МІКРОГЕОХОР ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЧІТКОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ****Д.В. Свидзинская****ВЫДЕЛЕНИЕ МОРФОДИНАМИЧЕСКИХ МИКРОГЕОХОР С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА***Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко*

Рассмотрен алгоритм картографирования морфодинамических микрогеохор с применением нечеткого кластерного анализа методом *k*-средних на основании геоморфометрических показателей. Топографические индексы, положенные в основу исследования, описывают не только морфоскульптурную, но и процессную составляющую, связанную с динамическим перераспределением влаги и вещества в ландшафте. Нечеткая кластеризация исключает субъективизм классификации и адекватно отображает континуальность ландшафта. Сравнительный анализ результатов для четырех тестовых участков свидетельствует о возможности получения содержательной, объективной и воспроизводимой классификационной процедуры.

Ключевые слова: ландшафтное картографирование; морфодинамические микрогеохоры; геоморфометрический анализ; нечеткий кластерный анализ; ЦМБ SRTM.

D. Svidzinska**EXPOSITION OF MORPHODYNAMIC MICROGEOCHORES USING FUZZY CLUSTERING ANALYSIS***Kyiv Taras Shevchenko National University*

The algorithm of morphodynamic microgeochores exposition/highlight by the fuzzy clustering analysis has been discussed. The analysis has been performed using the *k*-means method and based on the geomorphometric variables. The topographic indices underlying the study describe not only morphosculptural, but also process-functional component related to the dynamic redistribution of moisture and solid matter in landscape. The fuzzy clustering excludes the subjectivity of classification and adequately reflects landscape's continuity. The comparative analysis of the results for the four test sites indicates the possibility of obtaining a meaningful, objective and reproducible classification procedure.

Key words: landscape mapping; morphodynamic microgeochores; geomorphometric analysis; fuzzy clustering analysis; the SRTM DEM.

Вибір способу дискретизації континуального простору ландшафту на елементарні територіальні ділянки є важливою методологічною проблемою ландшафтознавчого картографування. На сучасному етапі, коли відбувається поступова заміна традиційного мануального картографування автоматизованим, це питання набуває особливої ваги, на що вказує стрімке зростання кількості відповідних методичних публікацій як за кордоном [9, 10, 13, 15, 19, 20, 25], так і в Україні [3-6, 28].

В основу автоматизованих підходів ландшафтознавчого картографування здебільшого покладено градієнтний та математико-статистичні критерії виділення елементарних ділянок ландшафту [1, т. 1, с. 266-279]. Особливо продуктивно вони можуть бути використані для виявлення ландшафтних територіальних структур, у формуванні яких провідну роль відіграють абіотичні горизонтальні потоки, наприклад катенарної, позиційно-динамічної, басейнової та ін. [2]. Оскільки просторова конфігурація та динамічні властивості горизонтальних потоків значною мірою контролюються рельєфом, в основу автоматизованого картографування доцільно покласти цифрову модель рельєфу (ЦМР) та її аналіз засобами географічних інформаційних систем (ГІС). При цьому постають дві важливі методичні проблеми, а саме – вибір найбільш значущих та інформативних

геоморфометричних показників для виявлення й опису територіальної конфігурації ландшафтної структури, а також обґрунтування методу об'єктивної дискретизації геоконтинууму на територіальні одиниці картографування.

Нині геоморфометричний аналіз спирається на розгалужений набір показників, способи інтерпретації яких визначаються предметним полем дослідження. Так, у геоморфологічних дослідженнях змінні використовуються для характеристики форми земної поверхні [10, 13, 14, 19, 22, 27, 29], в ґрунтознавчому картографуванні – для визначення катенарної позиції, особливостей перерозподілу матеріалу, співвідношення процесів лінійної та площинної ерозії [7, 20, 23, 25], в гідрологічному моделюванні – для аналізу особливостей трансформації поверхневого стоку, визначення місцеположення зон вологонасичення [16, 22]. Ландшафтно-екологічні інтерпретації геоморфометричних індексів розглядають їх як спосіб аналізу геопросторового перерозподілу дії прямих екологічних чинників (тепла, вологи, едафічних умов) [5, 9, 12, 15, 28].

На цій основі можливо визначити склад геоморфометричних показників, значущих для виявлення ландшафтних структур, пов'язаних з абіотичними горизонтальними потоками. До нього передусім слід віднести топографічні атрибути, які описують

форму поверхні [7, 10, 14, 22, 27], та топографічні індекси, що висвітлюють процесну складову [5, 9, 12, 14, 15, 22, 23, 28].

При виборі способу групування даних ми виходили з того, що класифікаційні процедури, які задають необхідну кількість класів [3, 5, 13, 28], призводять до суб'єктивності результатів, а також із того, що природним утворенням не властива жорстка детермінованість, і це зумовлює недоцільність застосування традиційних класифікаційних підходів [1, 6, 8, 9, 20 та ін.].

Зважаючи на ці обставини, як продуктивний спосіб виділення класів може розглядатись нечіткий кластерний аналіз. При його використанні, завдяки об'єктивності вихідних даних і статистичних параметрів класифікації, виключається суб'єктивізм дослідника. Також, на відміну від традиційної жорсткої кластеризації, нечіткий аналіз контролює міру перекриття між класами, тому один об'єкт може одночасно належати до двох або більше кластерів [6, 8].

Завдяки цій особливості застосування нечіткої кластеризації більш доцільне для аналізу континуальних явищ, параметри яких змінюються поступово: класифікації ґрунтів [20, 25], ландшафтів [6, 9], форм рельєфу [10, 19], розпізнавання образів й обробки даних дистанційного зондування [8]. При цьому відкриваються широкі можливості статистичної інтерпретації результатів, які є більш об'єктивними і незалежними від дисциплінарного поля, ніж традиційне семантичне наповнення. Серед методів нечіткого кластерного аналізу найпоширенішим є метод *k*-середніх. Він детально описаний у низці публікацій [6, 8, 9].

Метою дослідження є розроблення й тестування методики автоматизованого картографування морфодинамічних геоохор на основі геоморфометричного аналізу ЦМР із застосуванням нечіткого кластерного аналізу за даними Shuttle Radar Topography Mission (далі – SRTM). При цьому послідовно вирішуються такі завдання: 1) обґрунтування набору геоморфометричних показників та їх інтерпретація у контексті виявлення та аналізу морфодинамічних геоохор; 2) відображення морфодинамічних геоохор через нечітку кластеризацію; 3) верифікація і семантична інтерпретація результатів аналізу з переходом від геокомпонентного до процесно-динамічного наповнення виділених територіальних одиниць.

З огляду на роздільну здатність (РЗ) вихідних даних та зміст показників, покладених в основу аналізу, одиницею картографування є морфодинамічна мікрогеохора [24]. Подібно до ландшафтної смуги вона являє собою групу суміжних геотопів, які «мають спільне місцеположення відносно рубежів зміни інтенсивності речовинних площинних потоків» [1, т. 2, с. 47], тобто є подібними за морфо-

логією, а отже і за складом, напрямком та інтенсивністю горизонтальних абіотичних процесів.

Для відпрацювання методики в межах рівнинної частини території України було обрано чотири тестові ділянки з різними фізико-географічними умовами, кожна загальною площею $10 \times 10 = 100$ км² (рис. 1, табл. 1).

Програмне забезпечення

Підготовка та аналіз ЦМР проводились в середовищі Відкритої ГІС SAGA v. 2.0.8 [11], яка забезпечує широкий спектр функцій обробки та геоморфометричного аналізу ЦМР [26]. Процедури кластерного аналізу реалізовано в програмному забезпеченні (ПЗ) FuzMe v. 3.5с, яке є універсальним засобом виконання некерованої нечіткої класифікації даних (метод *k*-середніх) з можливостями оцінювання її загальної невизначеності та обґрунтування оптимального числа класів [21].

Вихідні матеріали

Спрямованість дослідження на забезпечення середньомасштабного картографування дала можливість використовувати Відкритий глобальний набір геоданих ЦМВ SRTM 4 версії з геометричною роздільною здатністю в три кутові секунди (≈ 90 м) [17]. Згідно висновків [18], матриця ЦМВ SRTM підходить для роботи в масштабі 1:50 000 і менше, що робить її придатною топографічною основою дослідження.

При встановленні РЗ в 50 м одна тестова ділянка містила 40 000 елементів, кожен з яких описувався значеннями десяти геоморфометричних показників. Загальний масив даних, що входив до аналізу однієї тестової ділянки, мав об'єм 400 000 індивідуальних значень.

Геоморфометричний аналіз ЦМР

При аналізі ЦМР враховано дві групи показників, які характеризують особливості рельєфу з різних позицій (табл. 2). Оскільки взаємозалежність характеристик та міжкомпонентні взаємозв'язки в ландшафті є його невід'ємною властивістю, яку не слід виключати з аналізу, а навпаки – враховувати, доцільне використання взаємокорельованих показників. Вони якраз і дозволяють виявити ті риси ландшафту, які є наслідком міжкомпонентних зв'язків у ньому й виявляються через істотну кореляцію. Зокрема, в роботах [9, 10] відмічається, що взаємозалежність геоморфометричних показників, як похідних ЦМР, неунікна і є запорукою того, що виділені на цій основі класи є просторово корельованими та змістовно значущими.

Нечіткий кластерний аналіз та визначення оптимального числа класів

Процедура кластеризації попередньо стандартизованих даних ґрунтувалась на використанні

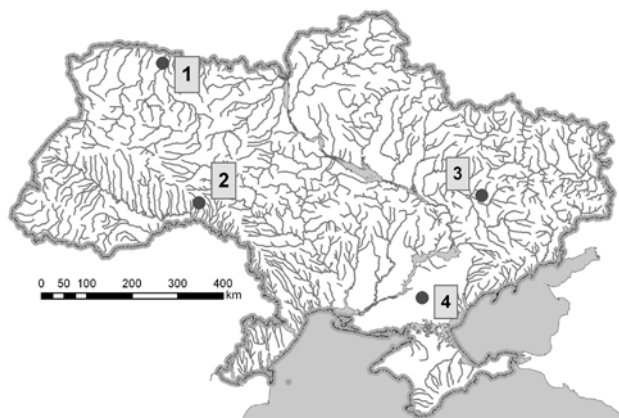


Рисунок 1. Місцезрештування тестових ділянок

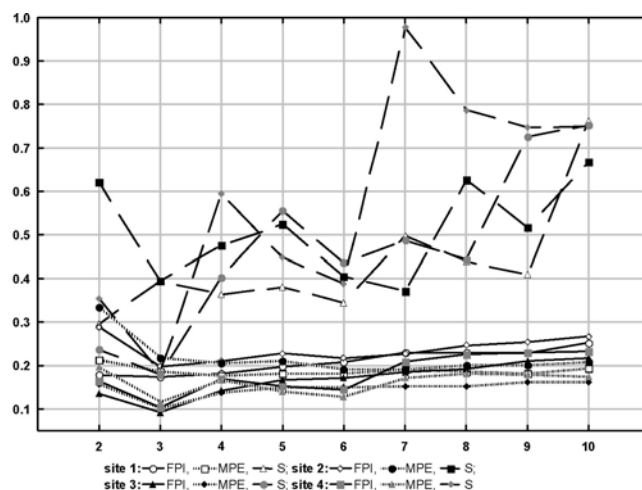


Рисунок 2. Визначення оптимального числа класів

Таблиця 1. Загальна характеристика тестових ділянок

№	Абс. висота, м	Ухил поверхні, градусів	Геоморфологічна характеристика	Природна зона (підзона)
1	133.47-166.24	0-3.95	Алювіальна (терасна) плоска, дуже слабо-розчленована рівнина	Мішаних лісів
2	209.03-356.33	0-10.49	Денудаційна, пологохвиляста, сильнорозчленована височина з давньотерасним рельєфом	Лісостепова
3	69.57-167.75	0-8.11	Акумулятивно-денудаційна, увалиста, сильнорозчленована рівнина	Північностепова
4	26.60-48.07	0-1.72	Алювіальна (терасна) плоска рівнина	Середньостепова

Евклідової дистанції. Аналіз здійснювався для кількості кластерів від 2 до 10 з мірою нечіткості класифікації 1,3 [6].

Обґрунтування оптимального числа кластерів здійснено на основі трьох показників: індекса нечіткості виконання кластеризації (Fuzziness Performance Index – FPI), модифікованої невизначеності розділення (Modified Partition Entropy – MPE), дистанції відокремлення (Separate Distance – S) [6, 8, 25].

Встановлено, що показники якості розподілу даних за різною кількістю кластерів узгоджуються лише частково (рис. 2). Це пояснюється різними підходами до їх розрахунку та відмінностями між тестовими ділянками. Тим не менше, за мінімальними значеннями FPI, MPE та S ідентифікуються два альтернативні варіанти оптимального розподілу – на 3 та на 6 класів, що дає можливість зіставити між собою результати класифікації для всіх тестових ділянок.

Представлення морфодинамічних мікрогеохор через нечітку кластеризацію

Успішність процедури у виявленні класів, придатних до картографічного відображення, оцінювалась на основі відтворення геопросторового роз-

поділу значень міри належності, що розраховані для кожного пікселя в кожному класі (рис. 3). Більша частина території була безпомилково віднесена до одного класу, що є результатом значущої геопросторової кореляції у вихідних даних [9, 10] та робить доцільним зведення всього набору карт до вигляду компактних «жорстких» класів.

Лінії максимальних значень індексу сплутаності класифікацій (Confusion Index - CI) ідентифікують межі між класами, а оконтурені ними ділянки можуть бути віднесені до єдиного «жорсткого» класу (рис. 4). Семантичну інтерпретацію морфодинамічних мікрогеохор у випадку розподілу на 3 та 6 класів подано нижче, картографічне їх відображення демонструє геопросторову значущість розділення типів 1 та 2 із збільшенням числа класів від 3 до 6.

Інтерпретація класів

Інтерпретація розподілу кількісних значень ґрунтувалась на типології місцезональних Полинво-Глазовської, що є інформативною для ландшафтних структур, територіальна конфігурація яких визначається абіотичними горизонтальними потоками [1, т. 2, с. 48].

Характеристика елементарних ділянок у випадку

Таблиця 2. Геоморфометричні показники, що увійшли до аналізу

Показник (одиниці вимірювання)	Значення для виявлення та аналізу морфодинамічних геохор (за [7, 12, 14-16, 22, 28, 29 та ін.])
Первинні топографічні атрибути	
Абсолютна висота (м)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ висотна позиція ▪ потенційна енергія ▪ швидкість поверхневого стоку
Ухил поверхні (град.)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ швидкість поверхневого та внутрішньогрунтового стоку ▪ об'єм стоку ▪ квантифікація процесів транспортування розчинених речовин
Планова кривизна (m^{-1})	<ul style="list-style-type: none"> ▪ локальні чинники динаміки поверхневого та внутрішньогрунтового стоку (вододіли і тальвеги) ▪ відносна конвергентність/дивергентність ліній стоку (перший акумуляційний механізм)
Профільна кривизна (m^{-1})	<ul style="list-style-type: none"> ▪ локальні чинники динаміки поверхневого та внутрішньогрунтового стоку (лінії перегину рельєфу) ▪ відносне уповільнення/пришвидшення перенесення речовини (другий акумуляційний механізм)
Середня кривизна (m^{-1})	<ul style="list-style-type: none"> ▪ процеси концентрації, пришвидшення та вільного проходження стоку; ▪ ємність поверхневого рідкого стоку ▪ визначення зон ерозії, транзиту, акумуляції та розсіювання матеріалу
Гradient низхідної відстані (град.)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ оцінка гідравлічного gradienta з урахуванням топографії низхідного схилу ▪ контроль відхилення гідравлічного gradienta від значень ухилу поверхні
Різниця gradienta низхідної відстані (m^{-1})	<ul style="list-style-type: none"> ▪ заміна локального gradienta ▪ краща за локальний gradient поверхні оцінка гідравлічного gradienta ▪ передбачення місцеположення зон підживлення і розвантаження в межах річкових басейнів
Вторинні топографічні атрибути (складені індекси)	
Топографічний індекс вологості (TWI) ($\ln(m \times \text{град.}^{-1})$)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ перерозподіл вологи ▪ катенарна позиція ▪ передбачення локалізації зон насичення
Індекс потужності потоку (SPI) ($m \times \text{град.}$)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ урахування форми схилу та висотної позиції ▪ міра ерозійної потужності водного потоку ▪ місцеположення зон лінійної ерозії та акумуляції
Індекс ємності транспорту (седиментів) (LS factor) ($m \times \text{град.}$)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ерозійний потенціал рельєфу ▪ міра ерозійної потужності поверхневого стоку ▪ місцеположення зон площинної ерозії та акумуляції

розподілу на 3 класи наведена нижче.

Клас 1 – автономні елювіальні мікрогеохори (A^E) – опуклі та плоскі вододільні й привододільні ділянки. Вторинні топографічні атрибути, які характеризують процеси латеральної міграції, наближаються до мінімальних значень, ідентифікуючи її низьку інтенсивність та ємність перенесення. Виняток становить тестова ділянка №1: клас тут представлений опуклими вододільними поверхнями з відносно великими для цієї території показниками спадистості ($0.03\text{--}3.95^\circ$ з середнім значенням 1.34°) та підвищеним потенціалом площинної ерозії. Отже, в цьому випадку територіальні одиниці класу 1 можуть бути інтерпретовані

як транселювіальні ландшафти (T^E).

Клас 2 – транселювіальні мікрогеохори (T^E) – опуклі та увігнуті схили різного висотного положення та спадистості. Їх визначальною рисою є наявність латерального стоку; баланс речовини (за відсутності ерозійних процесів) близький до нуля. Ландшафти цього класу характеризуються в основному середніми значеннями вторинних топографічних атрибутів, які ідентифікують найвищий (для даної ділянки) потенціал площинної ерозії завдяки дивергентності поверхневого стоку. Для тестових ділянок 1 та 4 цей клас може бути визначений як трансаккумулятивний (T^A), оскільки він в основному представлений підшовою схилу з

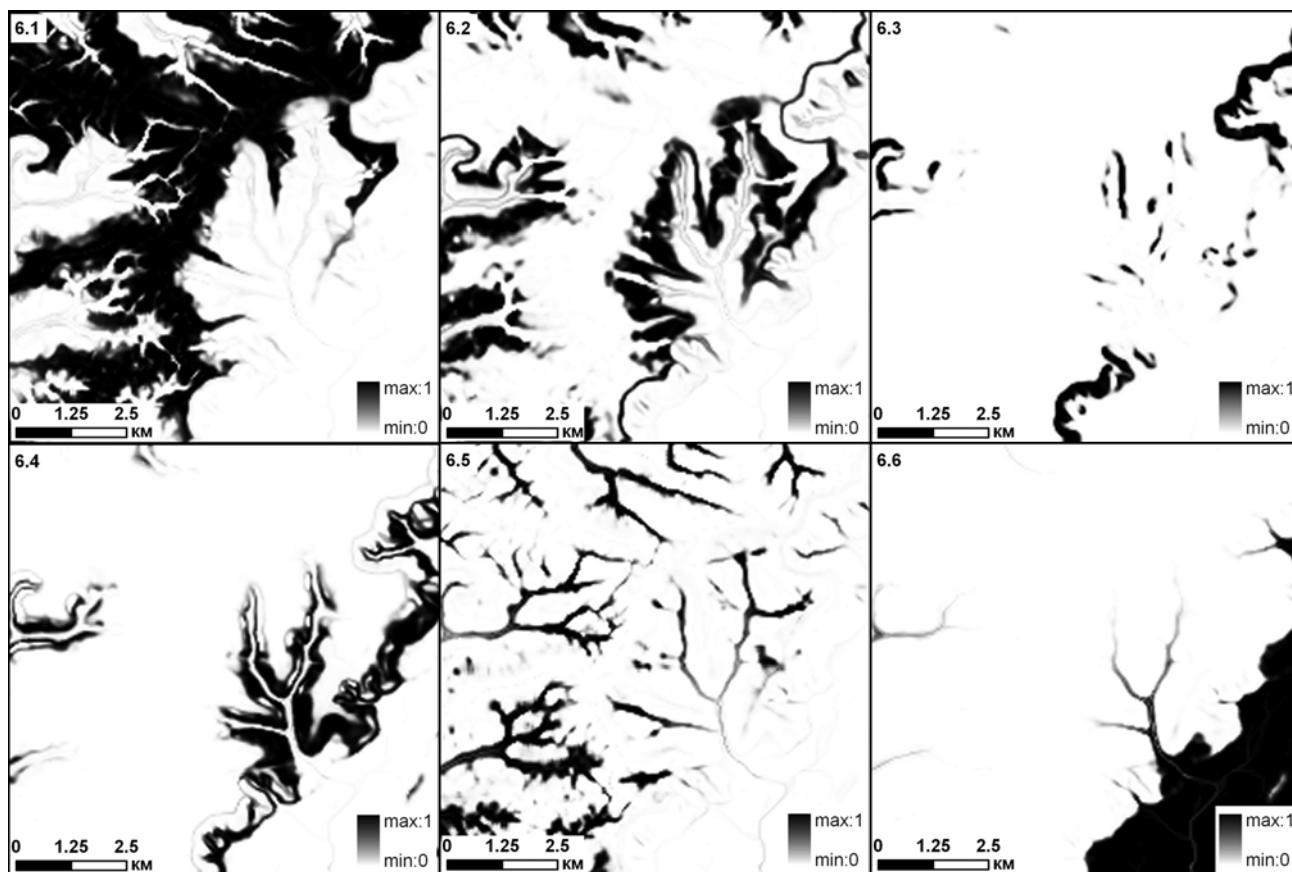


Рисунок 3. Приклад геопросторового розподілу значень показника міри належності для тестової ділянки №3 у випадку поділу на 6 класів

середньовисотною супераквальною позицією, прямим або увігнутим профілем та мінімальною спадистістю. Отже, територіальні одиниці відповідають не тільки за проведення, а й за акумуляцію речовини через уповільнення поверхневого та внутрішньогрунтового стоку.

Клас 3 – трансупераквальні мікрогеохори (Saq^T) – увігнуті долини та депресії між пагорбами. Представлений, головним чином, елементами ерозійної мережі; баланс речовини здебільшого позитивний. Клас характеризується максимальними значеннями топографічного індексу вологості та найвищим потенціалом лінійної ерозії завдяки переважаючій конвергентності стоку. Для тестової ділянки 4 клас асоціюється з замкненими степовими западинами і може бути визначений як елювіально-акумулятивний (E^A).

У випадку розподілу на 6 класів перший з вищезазначених класів залишається відносно стабільним, тоді як транзитні мікрогеохори додатково підрозділяються на три класи, а трансупераквальні – на два, з деякими відмінностями для тестових ділянок 1 та 4.

Клас 1 – автономні елювіальні мікрогеохори (A^E) – плоскі та опуклі вододільні ділянки.

Клас 2 – транселювіальні мікрогеохори (T^E) – зона перегину та верхня частина схилу. Для тестової ділянки 4 клас інтерпретується як транс-

акумулятивний (T^A).

Клас 3 – транзитні мікрогеохори (T) – відкриті та прямі транзитні середні частини схилів середньої спадистості; відіграють ключову роль у забезпеченні процесів перенесення речовини з поверхневим площинним стоком.

Клас 4 – трансаккумулятивні мікрогеохори (T^A) – здебільшого увігнуті спадисті схили. Для тестових ділянок 1 та 4 клас визначається як супераквальні акумулятивно-транзитні (Saq^{AT}) та елювіальні акумулятивно-транзитні (E^{AT}) мікрогеохори відповідно, представлені добре вираженими підніжжями схилів з увігнутим профілем (-0,01, що є максимальним середнім значенням серед усіх шести класів).

Клас 5 – трансаккумулятивні супераквальні мікрогеохори (Saq^{TA}) – плоскі та увігнуті міжпагорбові депресії і долини. Характеризуються середньоінтенсивним, але здебільшого конвергентним стоком. Виключення може бути зроблене для тестової ділянки 4, для якої клас визначається як трансаккумулятивні елювіальні (E^{TA}) мікрогеохори з переважаючою функцією перенесення.

Клас 6 – трансупераквальні мікрогеохори (Saq^T) – плоскі та увігнуті днища долин, що асоціюються з мінімальними значеннями абсолютних висот, конвергентним стоком та найвищим потенціалом лінійної ерозії. Для тестових ділянок 1-3 основним є процес перенесення речовини, а для

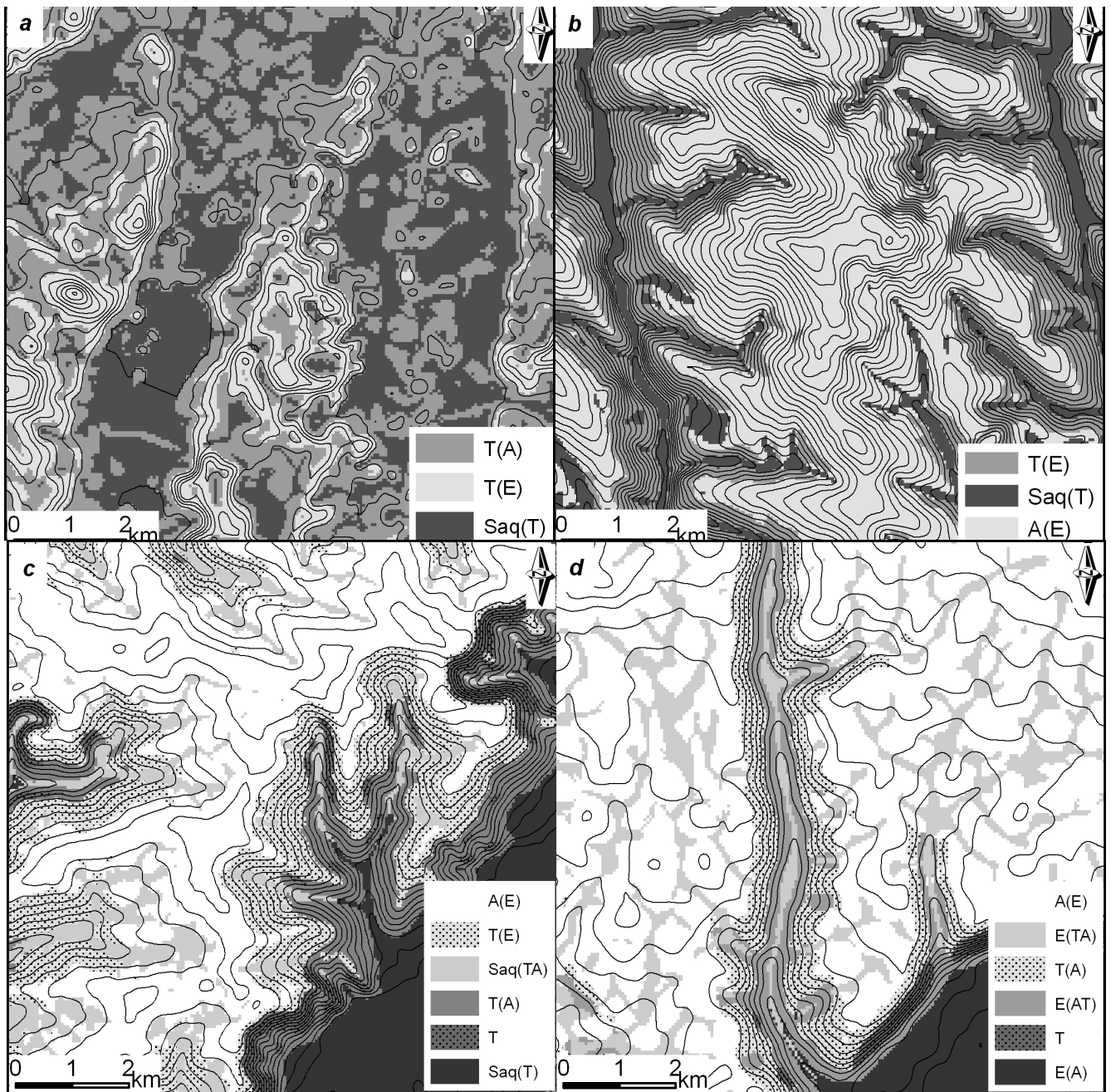


Рисунок 4. Приклади отриманих класів морфодинамічних мікрогеохор: поділ на 3 класи для тестових ділянок №№1, 2 – а та б; поділ на 6 класів для тестових ділянок №№3, 4 – с та d. Горизонталі проведено через 2,5 (а), 5 (б, с) та 1 (d) метр відповідно

ділянки 4 клас асоціюється з замкненими западинами та акумуляцією, що дає підстави визначити його як акумулятивні елювіальні (E^A) мікрогеохори.

Верифікація

Для перевірки достовірності результатів для кожної тестової ділянки було визначено 100 контрольних точок, на яких зіставлено тип місцеположення, визначеного автоматизовано (на основі аналізу ЦМР, детальність відповідає масштабу 1:100 000) та мануально (на основі топографічної карти масштабу 1:50 000). Результати верифікації узагальнено в табл. 3.

Як видно з табл. 3, результати автоматизованого картографування мають рівень достовірності більше 80% з гіршими показниками для тестової ділянки №1 та найкращими для ділянки №3. Варіативність відсутності збігу для різних тестових ділянок пояснюється залежністю вираженості мікрогеохор від характеру мезорельєфу. Так, в сильнорозчленованих лісостепових ландшафтах провідну роль у диференціації місцеположень відіграє сформований поверхневий стік, а характерні риси контрастного рельєфу добре ідентифікуються за ЦМВ. Водночас, у слабкорозчленованих лісових та степових ландшафтах особливості дренажу

Таблиця 3. Збіг типів місцеположень, визначених автоматизовано та мануально

Ступінь збігу	№1	№2	№3	№4	Середнє
	точки, %	точки, %	точки, %	точки, %	%
3 класи					
Повний збіг	83	91	95	89	89,5
Частковий збіг	8	7	3	5	5,75
Відсутність збігу	9	2	2	6	4,75
6 класів					
Повний збіг	71	83	87	85	81,5
Частковий збіг	9	7	4	10	7,5
Відсутність збігу	20	10	9	5	11

більше визначаються не рельєфом, а літологією порід та рівнем залягання ґрунтових вод, що нівелює діагностичні можливості геоморфометричного аналізу.

Середня частка відсутності збігу, при доволі високій точності моделювання, коливається від 5 до 11%, що пояснюється декількома обставинами, насамперед ступенем точності прив'язки аналогових матеріалів, на основі яких проводилась верифікація. При цьому зміщення контурів (та, як наслідок, класів перевірочних точок) знаходиться в межах ± 100 м, що при обраному масштабі відповідає 1 мм на паперовій карті. На якість вихідного результату впливає також необхідність фільтрування ЦМВ для покращення результатів геоморфометричного аналізу. Але практичним наслідком цього є не стільки некоректність результатів, скільки вилучення незначних за площею контурів: не більше 0,5 см² на паперовій карті, або 0,5 км² на місцевості, що не перевищує найменшої раціональної величини контуру для даного масштабу картографування. Разом з тим, загальна рисовка контурів відрізняється більшою детальністю та узгодженістю з характерними рисами рельєфу.

Отже, автоматизація методики, що ґрунтується на нечіткому кластерному аналізі, забезпечує більшу об'єктивність як в делінеації ділянок, так і у визначенні оптимального числа класів порівняно з іншими напівавтоматизованими [3, 4] та автоматизованими [5, 28] алгоритмами. Застосування нечіткої кластеризації дає змогу представити дискретність-континуальність ландшафту в межах єдиної картографічної моделі й відкриває шлях для об'єктивної дисциплінарно незалежної інтерпретації результатів на основі великого набору кількісних показників.

На відміну від попередніх досліджень, де картографування здійснювалось для територій, що репрезентують незначні за площею та/або одноманітні за фізико-географічними характеристиками ділянки [4, 5, 10, 28], ми зіставляли результати для різномірних за природними умовами тестових ділянок. Їх порівняльний аналіз засвідчив мож-

ливість отримання репрезентативної та змістовної класифікації.

Інтерпретація класів здійснювалась з ландшафтно-геохімічних позицій, але масив кількісних показників може бути використаний для переходу до інших тематичних тлумачень (позиційно-динамічного, ландшафтно-екологічного тощо).

Серед складних питань слід відмітити проблематичність інтерпретації результатів, яка виникає при переході від кількісних до якісних характеристик класів. Другим ускладненням є недостатність виключно геоморфометричного аналізу для отримання 100% коректного результату, особливо стосовно територій із слабкорозчленованим рельєфом.

Висновки

Внаслідок дослідження розроблено метод автоматизованого картографування і класифікації морфодинамічних мікрогеохор з урахуванням динамічних властивостей горизонтальних абіотичних потоків.

Для покращення класифікаційного алгоритму важливими питаннями є питання, пов'язані з впливом значень показника нечіткості класифікації та міри належності на результати кластеризації, з потенціалом застосування інших метрик дистанції. Заслуговує на увагу також розширення набору вихідних даних, зокрема за рахунок даних дистанційного зондування.

Інтерпретаційний потенціал алгоритму пов'язаний із використанням показника сплутаності класифікації для визначення і картографування каркасних та структурних ліній рельєфу. Значення СІ у поєднанні з мірою належності можуть бути використані при картографуванні ядер типовості та екотонних смуг у ландшафті. Масиви емпіричних даних, що генеруються в процесі аналізу, доцільно покласти в основу оцінювання мір подібності між місцями ландшафту та нечіткої ординації.

Запропонована процедура автоматизованого картографування дозволяє отримати надійний каркас, придатний для подальшої поглибленої ландшафтознавчої інтерпретації.

1. Гродзинський М.Д. Пізнання ландшафту: місце і простір. Монографія у 2-х т. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2005. – Т.1. – 431 с.; Т.2. – 503 с.
2. Гродзинський М.Д. Територіальний устрій ландшафту: структуроформувальні відносини, конфігурації та структури // Уч. записки Таврического нац. ун-та ім. В.И. Вернадского. Серія «Географія». – 2008. – Т. 21(60). – №2. – С. 36-48.
3. Круглов І.С. Методика напівавтоматизованого створення геопросторового шару педоморфологічних одиниць Басейну Верхнього Дністра // Вісник Львівського ун-ту. Серія геогр. – 2004. – Т. 31. – С. 312-320.
4. Кулачковський Р.І., Круглов І.С. Напівавтоматизована делімітація просторового каркасу природних морфогенних геоекосистем околиць біосферного резервату «Східні Карпати» // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2008. – Вип. 70. – С. 51-57.
5. Мкртчян А.С. Автоматизированное выделение ландшафтных единиц путем классификации рельефа с применением ГИС // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология: труды международной школы-конференции «Ландшафтное планирование». – М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. – С. 203-208.
6. Свідзінська Д.В. Нечіткий кластерний аналіз в ландшафтознавчому картографуванні // Наук. вісник Чернівецького нац. ун-ту. Серія: географія. – 2012. – Вип. 612-613. – С. 147-151.
7. Bagheri Bodaghabadi M. et al. Using Canonical Correspondence Analysis (CCA) to identify the most important DEM attributes for digital soil mapping applications // Catena. – 2011. – Vol. 86(1). – P. 66-74.
8. Bezdek J., Keller J., Krisnapuram R., Pal N. Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing (the Handbooks of Fuzzy Sets). – New York: Springer, 2005. – 785 p.
9. Burrough P., Wilson J., van Gaans P., Hansen A. Fuzzy k-means classification of topo-climatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA // Landscape Ecology. – 2001. – Vol. 16. – P. 523-546.
10. Burrough P., van Gaans P., MacMillan R. High-resolution landform classification using fuzzy k-means // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. – Vol. 113. – P. 37-52.
11. Conrad O. SAGA – program structure and current state of implementation // SAGA – Analysis and Modelling Applications, Göttinger Geographische Abhandlungen. – 2006. – Vol. 115. – P. 39-52.
12. Costa-Cabral M., Burges S. Digital Elevation Model Networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas // Water Resources Research. – 1994. – Vol. 30(6). – P. 1681-1692.
13. Desmet P., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // Journal of Soil and Water Conservation. – 1996. – Vol. 51(5). – P. 427-433.
14. Evans I., Hengl T., Gorsevski P. Applications in Geomorphology // Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science / Hengl T., Reuter H. (Eds.). – 2008. – Vol. 33. – P. 497-525.
15. Gessler P., Chadwick O., Chamran F., Althouse L., Holmes K. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes // Soil Science Society of America Journal. – 2000. – Vol. 64. – P. 2046-2056.
16. Hjerdt K., McDonnell J., Seibert J., Rodhe A. A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage // Water Resources Research. – 2004. – Vol. 40(5). – P. 1-6.
17. Jarvis A., Reuter H., Nelson A., Guevara E. Hole-filled seamless SRTM data V.4. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), 2008. [Електронний ресурс] / CGIAR – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). – Режим доступу: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
18. Karwel A., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland // ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – Vol. 37, Part B7. – P. 169-172 [Електронний ресурс] / International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. – Режим доступу: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/7_pdf/2_WG-VII-2/19.pdf.
19. MacMillan R., Pettapiece W., Nolan S., Goddard T. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. – Vol. 113(1). – P. 81-109.
20. McBratney A., Odeh I. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions // Geoderma. – 1997. – Vol. 77(2-4). – P. 85-113.
21. Minasny B., McBratney A. FuzME v. 3.5b. Australian Centre for Precision Agriculture. The University of Sydney, Australia, 2002. [Електронний ресурс] / The University of Sydney. – Режим доступу: <http://sydney.edu.au/agriculture/pal/software/fuzme.shtml>.
22. Moore I., Grayson R., Ladson A. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrological Processes. – 1991. – Vol. 5. – P. 3-30.
23. Möller M., Volk M., Friedrich K., Lymburner L. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2008. – Vol. 171(3). – P. 419-430.
24. Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen (Forschungen zur Deutschen Landeskunde, Vol. 250) / Haase G., Mannsfeld K. (Eds.). – Flensburg: Selbstverlag, 2002. – 214 p.
25. Odeh I., McBratney A., Chittleborough D. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: Applications to classification and soil-landform interrelationships // Soil Science Society of America Journal. – 1992. – Vol. 56. – P. 505-516.
26. Olaya V., Conrad O. Geomorphometry in SAGA // Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science / Hengl T., Reuter H. (Eds.). – 2009. – Vol. 33. – P. 293-308.
27. Shary P., Sharaya L., Mitusov A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. – 2002. – Vol. 107(1-2). – P. 1-32.
28. Syssouev V. Modelling geosystems differentiation // Вісник Львівського університету. Серія географічна. – 2004. – Вип. 31. – С. 340-349.
29. Zevenbergen L., Thorne C. Quantitative analysis of land surface topography // Earth Surface Processes and Landforms. – 1987. – Vol. 12. – P. 47-56.