ISSN 2078-6441. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2014. Випуск 47. С. 177–184.
Visnyk of the Lviv University. Series Geography. 2014. Issue 47. P. 177–184.

УДК 910.26:911.52

АВТОМАТИЗОВАНЕ ЛАНДШАФТНО-ЕКОЛОГІЧНЕ РАЙОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ МЕТОДАМИ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ І СЕГМЕНТАЦІЇ

Олександр Мкртчян

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. П. Дорошенка, 41, 79000, м. Львів, Україна,
e-mail: alemkrt@gmail.com

Розглянуто принципи автоматизованого ландшафтно-екологічного районування території методами кластеризації та сегментації. Обґрунтовано використання еколого-морфометричних індексів як критеріїв ландшафтно-екологічної кластеризації та сегментації. Запропоновано методику кількісного аналізу просторової пов'язаності типологічних та регіональних одиниць на підставі теорії інформації.

Ключові слова: районування, кластеризація, сегментація.

Чи не найважливіший метод географії – районування – полягає в поділі певної частини земної поверхні на змістовно або функціонально однорідні частини. Функціонально однорідні частини інтерпретують у світлі теоретичних концепцій конкретної географічної науки, зокрема, як системні єдності, частини систем або ареали прояву певних процесів або явищ.

Розвиток геоінформаційних технологій відкрив можливості автоматизації цього методу, коли виділення територіальних одиниць відбувається за допомогою відповідного алгоритму на підставі наперед заданих критеріїв та показників. У цьому разі треба розрізняти напівавтоматизоване районування на засадах наперед визначених класифікаційних ознак та автоматизоване, за якого класифікаційні ознаки визначають у ході класифікації на підставі аналізу структури даних. Перевагами автоматизованого виділення територіальних одиниць є відтворюваність, об'єктивність, швидкість, можливість виявлення прихованих структур у даних. Хоча геоінформаційні технології широко застосовують у географічних дослідженнях уже впродовж двох десятиліть, питання автоматизованого районування розроблені й вивчені недостатньо.

У географії є два підходи до районування: типологічний і регіональний. Перший полягає у виділенні ареалів наперед визначених типів (місцеположень, рослинності, клімату, ґрунтів тощо), другий – у поділі території на частини, які вважають однорідними за певним комплексом ознак (біогеоценози, форми рельєфу, ландшафти тощо).

Метод районування в географії є певною мірою аналогом методу класифікації, який застосовують у різних природничих науках. Сутність методу класифікації полягає у групуванні об'єктів дослідження чи спостережень відповідно до їхніх загальних ознак. Проте в географії, на відміну від багатьох природничих наук, є проблема вибору та ідентифікації елементарного об'єкта дослідження. Оскільки характерна специфіка географії – дослідження геопросторових (територіальних) відношень та структур, то її елементарний об'єкт має бути включений у такі відношення, одночасно він повинен

мати внутрішню геопросторову неподільність та однорідність (в інакшому випадку цей об'єкт може бути поділеним на дрібніші складові і вже не буде елементарним).

Таким елементарним об'єктом географії може слугувати місцеположення (англ. s*ite*), що відповідає будь-яким ділянкам земної поверхні, які розглядають (у межах певного наукового дослідження або прикладної проблематики) як такі, що мають (умовно) внутрішню просторову однорідність (гомогенність). Німецькі дослідники розробили концепцію "топів" – найменших просторових одиниць, яким властива гомогенність змісту та одноманітність процесів, пов'язаних з певним геокомпонентом (морфотоп, педотоп, кліматоп, гідротоп) або з усіма геокомпонентами, що зумовлює екологічну гомогенність таких одиниць (екотоп, геотоп). Оскільки ж поняття гомогенності завжди є відносним, то немає підстав для того, щоб у разі виділення таких одиниць обмежуватись певним просторовим масштабом. Наприклад, під екотопом можна розуміти ділянку, ступінь екологічної гомогенності якої є достатнім для вирішення конкретного наукового чи практичного завдання, тому таку ділянку недоцільно поділяти на дрібніші складові за цим критерієм. Такі топічні одиниці можуть складатися з відмінних елементів, які утворюють регулярну мозаїку (наприклад, ґрунтові комплекси). Склад і співвідношення таких елементів для кожного комплексу можна зазначати в легенді карти, проте ці елементи окремо не картують, тобто внутрішня геопросторова неоднорідність та структура топічних одиниць є поза інтересом та сферою уваги дослідника.

Рельєф земної поверхні – важливий чинник перерозподілу сонячної радіації, вологи та потоків речовини на земній поверхні. Ми запропонували виділення наукового напряму – екологічної морфометрії як галузі екологічної геоморфології, яка досліджує екологічне значення морфометричних характеристик рельєфу, залежності між морфометричними параметрами та екологічними чинниками [3]. Одним із завдань екологічної морфометрії є екологічна регіоналізація території внаслідок її поділу на морфотопи – територіальні одиниці, які виділяють за ознаками морфології земної поверхні, виходячи з принципу екологічної однорідності [5].

За типологічного підходу до районування геопросторовий аспект не беруть до уваги, а критеріями районування слугують речовинно-енергетичні характеристики (наприклад, характеристики водного режиму території, режиму надходження сонячної енергії, особливості міграції мінеральних речовин у ландшафті). Відповідно, у підсумку отримуємо територіальні одиниці, що є просторово розімкнутими (представленими сукупністю геометрично не пов'язаних між собою виділів). Натомість, за регіонального підходу серед критеріїв районування є геопросторові характеристики (суміжність, компактність тощо). У підсумку отримуємо просторово суцільні територіальні одиниці.

Методика автоматизованого виділення територіальних одиниць відрізняється від того, який саме підхід – типологічний чи регіональний – беруть за основу районування. У першому випадку метод районування принципово не відрізняється від звичайної класифікації багатовимірних даних. Зокрема, методика ітераційного кластерного аналізу дає змогу виділити класи на підставі аналізу природних поєднань даних (кластерів) у просторі атрибутів (кластеризація методом k-середніх). Алгоритм, на якому ґрунтується ця методика, полягає в розміщенні у просторі атрибутів (показників, які використовують у класифікації) k центроїдів (k відповідає заданій кількості кластерів) та віднесенні кожного елемента (місцеположення, пікселі) до кластера із найближчим до нього положенням центроїда в багатовимірному просторі атрибутів з 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).

Ця методика дає змогу задавати довільну кількість кластерів, на які поділяють елементи (місцеположення). Більша кількість кластерів відповідає більшій детальності класифікації та вищому ступеню однорідності отриманих кластерів. Оскільки оптимальна кількість кластерів, яка відповідає об'єктивній структурі даних, наперед невідома, то можна послідовно виконувати класифікацію з різною кількістю кластерів, порівнюючи отримані результати й обираючи варіант, який найліпше піддається змістовній інтерпретації.

У разі регіонального підходу до районування певним аналогом цього методу є метод сегментації. В його основі – процедура, подібна до методики виділення вододілів за цифровою моделлю рельєфу (ЦМР). На початку визначають варіабельність значення характеристики чи сукупності характеристик в околицях конкретного місцеположення, обчислюючи дисперсію в межах ковзного вікна наперед визначених розмірів. Далі обчислені значення варіабельності використовують як аналог значень висот ЦМР. Гомогенні ділянки в цьому разі відповідають "западинам", а ділянки підвищеної гетерогенності – "височинам" і "хребтам", які їх розділяють. Далі відповідний алгоритм виділяє на цій поверхні уявні "річкові басейни", які мають високий рівень внутрішньої гомогенності за критеріями сегментації порівняно з відмінностями цих критеріїв між такими "басейнами". На наступному етапі "басейни", що є просторово суміжними (мають спільну межу), об'єднують у більші сегменти за ознакою подібності критеріїв сегментації. Цей процес є ітеративним. На кожному кроці ітерації кожний сегмент порівнюють з усіма суміжними сегментами й об'єднують з тим, що найбільше подібний до нього. У цьому випадку варіабельність критеріїв між сегментами, які є кандидатами на об'єднання, порівнюють з параметром допуску, який задають довільно перед запуском алгоритму сегментації. Лише ті сегменти можуть бути об'єднані в один більший сегмент, відмінності між якими не перевищують значення параметра допуску. Відповідно, чим більше значення цього параметра ми задаємо, тим далі просувається процедура сегментації і тим меншу кількість сегментів отримуємо на виході. Отже, цей параметр певною мірою аналогічний параметру кількості кластерів, яку задають під час процедури автоматизованої кластеризації.

Територія нашого дослідження – це прямокутна ділянка розмірами 90×70 км, розміщена в центральній частині Українських Карпат. Діагональ прямокутника приблизно відповідає осі карпатської дуги: отже, ділянка охоплює північний і південний макросхили Карпат та (північний схід ділянки) частину Передкарпаття (див. рис. 1). Таке розташування ділянки дало змогу включити до неї низку різноманітних з ландшафтного погляду структурно-тектонічних зон. Наприклад, ділянка досліджень охоплює такі фізико-географічні області: Передкарпатську височинну, Зовнішньокарпатську, Вододільноверховинську, Полонинсько-Чорногірську та Вулканічно-міжгірно-улоговинну [2].

Джерелом геопросторових даних слугувала ЦМР SRTM v. 4.1, отримана з онлайнового архіву Консорціуму просторової інформації CGIAR (http://srtm.csi.cgiar.org). Вихідні дані – у географічній координатній системі (еліпсоїд WGS84) з просторовою роздільністю близько 90 м; для спрощення аналізу даних їх спроектовано в координатну систему UTM (зона 34N). Як критерії класифікації використано комплексні показники (індекси), які безпосередньо характеризують рельєф з екологічного погляду. Зокрема, для відображення перерозподілу вологи за елементами рельєфу під дією

гравітації використано запропонований І. Муром та П. Гесслером топографічний індекс вологості, який відтворює положення в ландшафтній катені та який обчислюють за формулою $CTI = \ln(A_s / \tan \beta)$, де A_s – дренажна площа (площа водозбору, розрахована на одиницю довжини замикального контуру); β – похил поверхні [8]. Для визначення ерозійного потенціалу рельєфу застосовано вираз із модифікованого універсального рівняння втрат ґрунту (RUSLE):

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

де A_s – дренажна площа; β – похил поверхні; m, n – стандартні параметри; $a_0 = 22{,}1$ м – довжина; $b_0 = 0{,}09 = \sin (5{,}16°)$ – похил поверхні стандартних ділянок, на яких визначали параметри моделі [7]. Як індекс, який відображає перерозподіл сонячної радіації за елементами рельєфу, використано інтегральну величину надходження короткохвильової сонячної радіації за довільний період з урахуванням ефектів затінення та атмосферного поглинання радіації за низької висоти сонця над горизонтом, однак без урахування поглинання хмарністю та довгохвильової радіації [6].

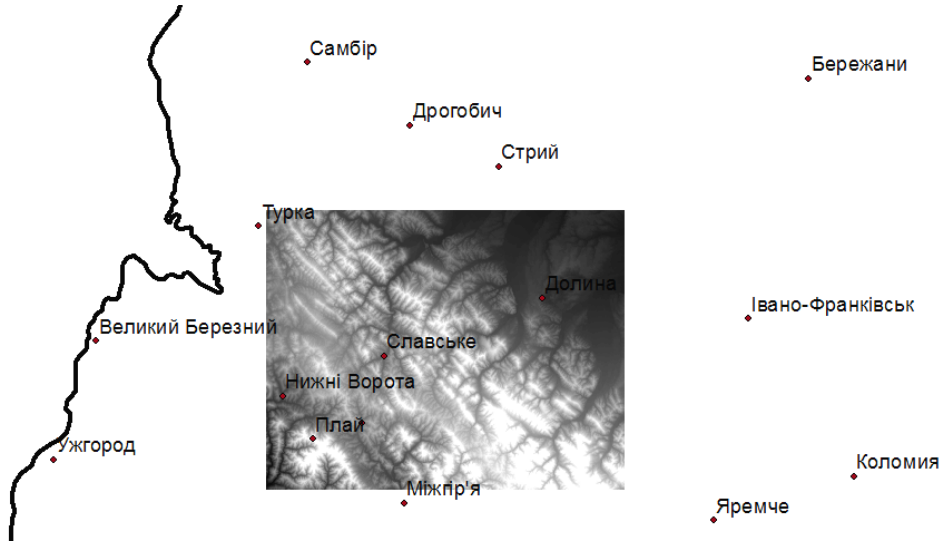

Рис. 1. Місцерозташування території досліджень

Для визначення оптимальних значень параметрів, що задані перед процедурами кластеризації і сегментації (відповідно, кількість кластерів та параметр допуску), виконано візуальний аналіз графіків, що відображають залежність між значенням цих параметрів та зміною варіабельності критеріїв класифікації (див. рис. 2). Варіабельність обчислювали як суму нормалізованої дисперсії критеріїв класифікації (три зазначені вище екологічні індекси плюс абсолютна висота) всередині кластерів. Максимуми на графіку відповідають значенням кількостей кластерів з найбільшим зменшенням внутрішньокластерної дисперсії.

На отриманому графіку виділяються слабковиражені максимуми, які відповідають значенням кількості кластерів 8 і 15. Можна припустити, що ці кількості кластерів відповідають певним природним ієрархічним рівням ландшафтно-екологічної структури території.

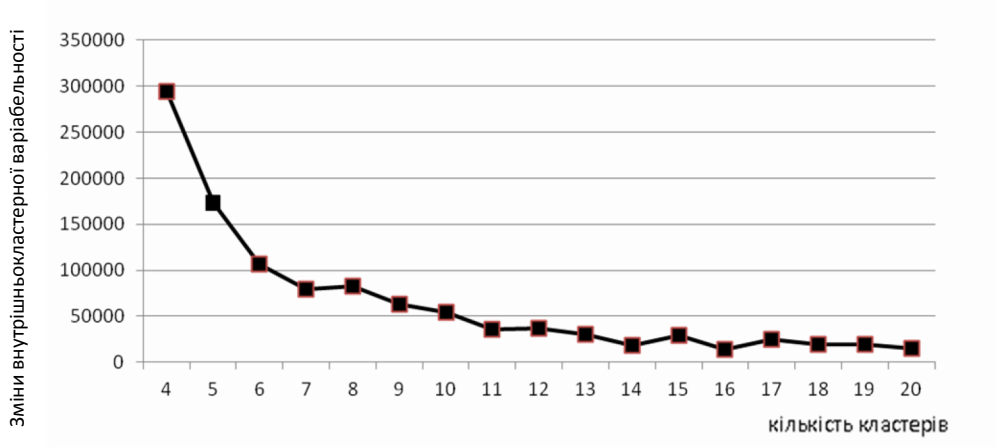

Рис. 2. Залежність між заданою кількістю кластерів
та зміною внутрішньокластерної варіабельності

Аналогічний графік побудовано для рівнів параметра допуску сегментації. У цьому випадку найбільша зміна внутрішньосегментної варіабельності зафіксована за рівнів цього параметра, що дорівнювали 300 і 250 (за яких алгоритм виділив, відповідно, 8 і 14 сегментів).

Інтерпретація виділених кластерів і сегментів повинна ґрунтуватись на аналізі середніх значень і варіабельності значень морфометричних показників та еколого-морфометричних індексів у їхніх межах. Середні їхні значення в межах восьми кластерів, виділених на території дослідження, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Середні значення деяких морфометричних показників і еколого-морфометричних індексів для восьми кластерів (k = 8), виділених у межах території досліджень

Кластер	**Площа кластера, км^2**	**Висота, м**	**Похил поверхні, град.**	**Ерозійний потенціал рельєфу**	**Максимальна інсоляція, Вт-години/м^2**	**Топографічний індекс вологості**
1	1387,65	763,22	10,40	0,88	1027285	3,06
2	609,8	1143,44	14,96	1,02	1086238	2,15
3	495,49	946,81	22,82	4,57	819400	2,33
4	701,29	889,32	18,36	4,45	1047543	2,62
5	1170,26	482,26	4,95	0,6	972745	4,26
6	618,31	383,58	1,06	0,09	975734	6,19
7	1150,42	765,17	13,98	1,46	908369	2,86
8	168,58	846,88	17,91	9,67	954746	2,76

З аналізу табл. 1 можна зробити деякі висновки стосовно змісту виділених кластерів. Наприклад, кластер 2 відповідає вершинам хребтів і привершинним ділянкам схилів з найбільшими абсолютними висотами та рівнями інсоляції, клас 6 – найбільш зниженим ділянкам заплавно-терасового комплексу передгірських річок і заплавним ділянкам гірських річок (з найвищим індексом вологості та найменшими похилами

поверхні), клас 5 – переважно верхнім терасам, схилам і вододільним поверхням передкарпатської частини території та алювіальним терасам гірських річок, клас 8 – балкам і зворам.

Виділені кластери також зіставлено оверлейним аналізом з морфогенними мезоекорегіонами, виділеними мануально І. Кругловим [1]. Як і очікували, їхній розподіл виявився суттєво неоднорідним. Зокрема, у Крайових Бескидах суттєво переважають класи 1, 5 і 7. Понад 50 % площі Сянсько-Стрийської і Бескидської верховин займає клас 1, тоді як майже половину площі Ґорґанської верховини – клас 2 (вершинні поверхні і привершинні схили). Мезорегіон полонини Боржави-Красної має порівняно високу частку класу 8 (глибоко врізані ерозійні форми).

У разі сегментації, на відміну від кластеризації, виділені територіальні одиниці є просторово суцільними. Їм можна поставити у відповідність певні категорії індивідуального районування. На рис. 3 показано результат сегментації території дослідження зазначеними критеріями зі значенням параметра допуску 300 (яке відповідає виділенню восьми сегментів). Інтерпретація виділених сегментів можлива завдяки аналізу розподілу значень екологічних чинників у їхніх межах та зіставленню просторових характеристик сегментів з розташуванням одиниць традиційного ландшафтного та ландшафтно-екологічного районування.

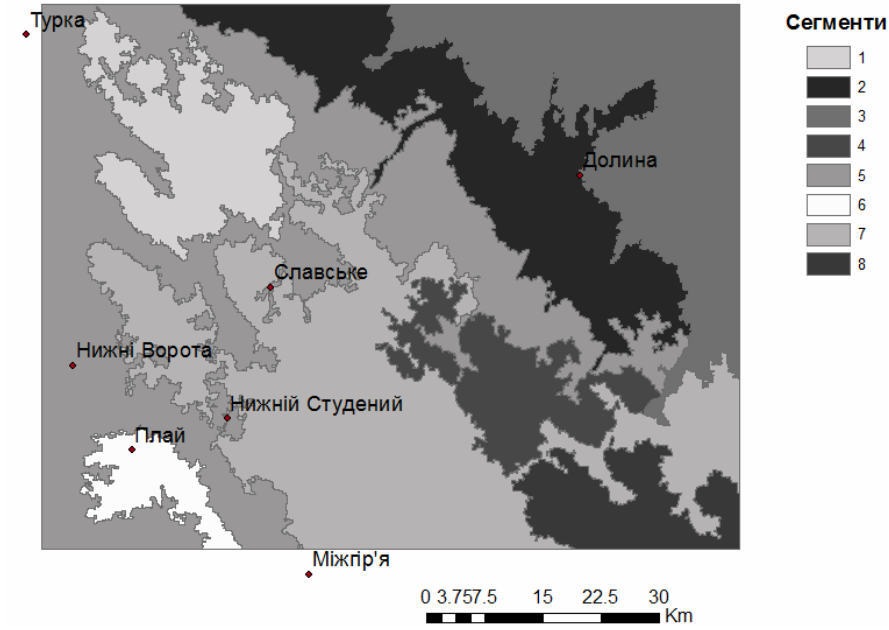

Рис. 3. Результат автоматизованої сегментації території дослідження за еколого-морфометричними критеріями (значення параметра допуску 300)

Цікаво проаналізувати просторову пов’язаність результатів кластеризації і сегментації території, виконаних за тими самими критеріями. Просторову пов’язаність можна дослідити за допомогою оверлейного аналізу відповідних картографічних шарів, із застосуванням відповідних формул теорії інформації [4]. Наприклад, можна визначити

кількість інформації (у бітах), яку містить один шар відносно іншого. Поділивши її на сумарну ентропію обох шарів, можна визначити безрозмірний коефіцієнт інформаційної пов'язаності обох шарів. Чим більші ці показники, тим сильніший просторовий зв'язок між обома шарами (у нашому випадку – результатами автоматизованої кластеризації та сегментації).

Ми проаналізували просторову пов'язаність результатів кластеризації (із параметрами кількості кластерів 8 та 15) та сегментації (із параметром допуску 300 і 250, що відповідає виділенню, відповідно, 8 та 14 сегментів).

Можна побачити (табл. 2, 3), що зі збільшенням кількості кластерів зростає ступінь їхньої просторової пов'язаності з сегментами, які виділяють. Це зумовлене тим, що за меншої заданої кількості кластерів виділяють кластери, які відповідають загальним типам морфотопів (таким, як вершинні поверхні, круті схили тощо), що більш-менш рівномірно розміщені по території. Водночас за великого значення заданого параметра кількості кластерів відображаються вужчі типи екотопів (наприклад, ділянки схилів певної крутості, форми, розташування й експозиції), які приурочені лише до певних регіональних одиниць (природних районів, фізико-географічних областей тощо).

Таблиця 2
Просторова пов'язаність результатів кластеризації та сегментації: кількість інформації, біт

Кількість кластерів (кластеризація)	**Параметр допуску (сегментація)**	
	300	**250**
8	0,649	0,724
15	0,792	0,883

Таблиця 3
Просторова пов'язаність результатів кластеризації та сегментації: коефіцієнт інформаційної пов'язаності

Кількість кластерів (кластеризація)	**Параметр допуску (сегментація)**	
	300	**250**
8	0,136	0,127
15	0,143	0,137

Отже, методи автоматизованої кластеризації і сегментації дають змогу реалізувати, відповідно, типологічний та регіональний підходи до ландшафтно-екологічного районування території. Важливим джерелом детальної просторової інформації можуть слугувати цифрові моделі рельєфу, геоінформаційний аналіз яких допомагає обчислити індекси, які характеризують рельєф з екологічного погляду і можуть слугувати критеріями процедур кластеризації та сегментації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Круглов І.* Делімітація, метризація та класифікація морфогенних екорегіонів Українських Карпат / І. Круглов // Укр. геогр. журн. – 2008. – № 3. – С. 59–68.
2. *Маринич О. М.* Фізико-географічне районування. Карта / О. М. Маринич, Г. О. Пархоменко, В. М. Пащенко, О. М. Петренко, П. Г. Шищенко // Національний атлас України. – К. : ДНВП "Картографія", 2007. – С. 228–229.
3. *Мкртчян О.* Екологічна морфометрія як перспективний напрямок еколого-геоморфологічних досліджень / О. Мкртчян // Фізична географія і геоморфологія. – 2010. – Вип. 1(58). – С. 131–136.
4. *Мкртчян О.* Інформаційна парадигма в географії / О. Мкртчян // Фізична географія та геоморфологія. – 2005. – Вип. 47. – С. 124–131.

5. *Мкртчян О.* Морфотопи як територіальні одиниці картування та оцінки природних умов / О. Мкртчян // Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. геогр. – 2004. – № 3. – С. 181–187.
6. *Kumar L.* Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment / L. Kumar, A. K. Skidmore, E. Knowles // International Journal for Geographical Information Science. – 1997. – Vol. 11(5). – P. 475–497.
7. *Mitasova H.* Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS / H. Mitasova, J. Hofierka, M. Zlocha, R. L. Iverson // Int. J. of Geographical Information Science. – 1996. – Vol. 10(5). – P. 629–641.
8. *Moore I. D.* Soil attribute prediction using terrain analysis / I. D. Moore, P. E. Gessler, G. A. Nielsen, G. A. Peterson // J. of Soil Science Society of America. – 1993. – Vol. 57. – С. 443–452.

Стаття: надійшла до редакції 17.04.2014
доопрацьована 17.09.2014
прийнята до друку 15.10.2014

AUTOMATIC LANDSCAPE-ECOLOGICAL REGIONALIZATION BY THE APPLICATION OF CLUSTERING AND SEGMENTATION

Oleksandr Mkrtchian

Ivan Franko National University of Lviv,
P. Doroshenko Str., 41, UA – 79000 Lviv, Ukraine
e-mail: alemkrt@gmail.com

The paper deals with the principles and methods of automatic landscape-ecological regionalization by the clusterization and segmentation methods. The employment of ecological morphometric indices as criteria for clusterization and segmentation has been justified. The method of the quantification of spatial dependencies between typological and regional spatial units based on information theory has been suggested.

Key words: regionalization, clusterization, segmentation.