

А. В. Соколовська

Мультифрактальний аналіз варіабельності структури складових міських територій на основі космічної інформації ДЗЗ (на прикладі м. Київ за 1986—2011 рр.)

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Д. Федоровським)

Обґрунтовано можливість використання мультифрактального аналізу для інтегральної оцінки варіабельності структури основних складових міських територій на підставі космічної інформації ДЗЗ (на прикладі м. Київ). Проведено оцінку варіабельності структури складових міської агломерації, що виконувалась на основі індексів варіабельності — узагальнених розмірностей Реньї як інтегральних оцінок. У результаті отримано спектр узагальнених фрактальних розмірностей як інтегральних характеристик структури складових територій м. Київ, досліджено динаміку змін структури складових за період 1986–2011 рр. та їх зв'язок з екологічним станом міста.

Сучасний розвиток великих міст багато в чому відбувається за рахунок перетворення і більш раціонального використання внутрішньої структури без розширення меж міської території. Застарілі об'єкти заміщаються економічно перспективнішими, зносяться малоповерхові будівлі і на їхньому місці зводять сучасні висотні, оптимізується транспортна мережа тощо. Цьому процесу сприяють вимоги сучасних генеральних планів розвитку міст за рахунок більш раціонального використання існуючих територій. Як наслідок, витісняється зелена зона, відбувається ущільнення території забудовою, збільшується кількість міського населення і відповідно транспорту, що незмінно позначається на екологічному стані середовища [1, 2]. У зв'язку з цим актуальним було дослідження динаміки змін територіально-функціональних зон міста, вивчення варіабельності (розмаху мінливості, різноманітності) структури складових міських територій і оцінювання їх взаємозв'язку з екологією міста. Незважаючи на безліч існуючих наукових праць у містобудівній сфері, питанню оцінки міських територій з урахуванням варіабельності складових урболандшафту та їх впливу на екологічний стан міста приділялося мало уваги [3].

Розпочаті Бенуа Мандельбротом роботи в області фрактальної геометрії [4] на сьогодні широко застосовуються для вивчення об'єктів різного походження, зокрема для міських агломерацій. Використання мультифрактального аналізу для дослідження варіабельності складових міської території пов'язане з таким поняттям, як самоподібність. Математичним виразом самоподібності є степеневий закон, що встановлює залежність числа складових урболандшафту від розміру вибірки площі території міста. Відомі роботи присвячені темі фрактальної урбаністики, а саме, мультифрактальній морфології окремих міст, фрактальній архітектурі та забудові, сокультурним аспектам міста [5–7 та ін.].

Як вихідна інформація, що буде використана при подальшому моделюванні міських територій, найінформативнішими є космічні знімки ДЗЗ [8]. За допомогою космічних знімків ДЗЗ можна отримувати інформацію як для оперативного використання в разі аварійних ситуацій, так і для поточного контролю ландшафтно-функціональних зон міських агломерацій та прилеглих до них територій. Отримана таким чином інформація використовується

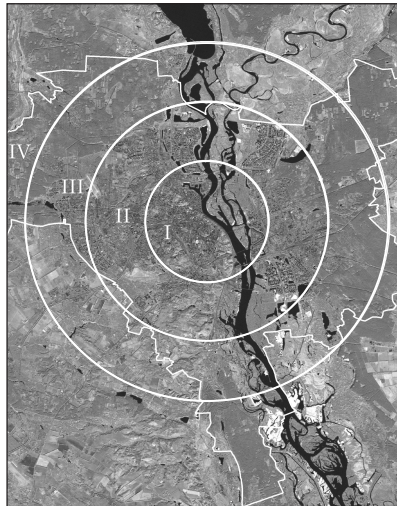


Рис. 1. Космічний знімок супутника Landsat 5 ТМ м. Київ за 2011 р.

для моделювання різноманітних сценаріїв перспективного розвитку міст, розробки довгострокових прогнозів і накопичення статистичних даних змін урболандшафтів.

Мета роботи полягала в обґрунтуванні застосування мультифрактального аналізу для оцінки мінливості структури складових міської території на прикладі м. Київ за період 1986–2011 рр. і виявлення взаємозв'язків складових урболандшафту з екологічним станом міста.

Для дешифрування було використано дані з супутників “Landsat 7/ETM+”, “Landsat 5 ТМ”, а саме, обрано та опрацьовано 23 знімки за період з 1986 по 2011 рр., на яких над досліджуваною територією відсутня хмарність.

За офіційними даними, площа Києва становить 835,6 км², вона розділена на 10 адміністративних районів. Своєрідність і різноманітність природних умов міста пов'язані з його розташуванням на межі фізико-географічних зон: лісостепової та мішаних лісів.

Велику площу займають численні парки і сквери, зелені насадження — 361 км² або 43%. Проте вирубка дерев у парках і на прибудинкових територіях протягом останнього десятиріччя зменшує площу зелених насаджень. На кліматичні та екологічні особливості Києва впливає наявність поверхневих водних об'єктів: річок, озер, ставків. За офіційними даними, їх площа у межах міста становить 47 км² або 8,0% від загальної. Ландшафтна структура території міста дуже складна. За функціональним використанням територія Києва розділяється на 5 основних типів міських ландшафтів: селітебний (міська забудова), селітебно-транспортний, агротехнічний, промисловий, рекреаційний (лісові масиви, парки, сквери, зелені насадження загального користування, об'єкти природоохоронного фонду, водоймища).

Основними речовинами, що забруднюють атмосферне повітря, є оксид вуглецю, сполуки азоту, леткі органічні сполуки, діоксид та інші сполуки сірки. На їх частку припадає понад 96,9% загальної кількості викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря міста. Найбільш високе забруднення повітря в Києві спостерігається в місцях, прилеглих до автомагістралей та їх перехресть. У Києві автомобільний транспорт дає 83,4% усіх шкідливих викидів в атмосферу [9]. Рис. 1 ілюструє космічний знімок м. Київ (“Landsat 5 ТМ”) за 2011 р., на якому виділено площі вибірок (I, II, III, IV) для подальших досліджень.

Виходячи з параметрів використовуваних космічних знімків та зазначених територіальних функціональних зон, для подальших досліджень були обрані такі типи складових урболандшафту міста: територія під забудовою і дорогами, загальна площа рослинності, хвойний ліс, листяний ліс, водне дзеркало, пустирі, вирубка.

Екологічний стан міста оцінювався на основі комплексного індексу забруднення атмосфери (K), який є наслідком техногенного навантаження на міську територію. Значення K були отримані в результаті наземних спостережень Центральною геофізичною обсерваторією [10].

Для обробки та інтерпретації матеріалів дистанційного зондування застосовували програмні комплекси Erdas Imagine та ArcGIS, які мають розвинутий інструментарій просторового аналізу. Для більш точної обробки та класифікації космічних знімків доречно спільне використання автоматичної класифікації та “спектральних індексів”, отриманих на підставі перерахунку співвідношення яскравості об’єктів у різних спектральних зонах. Автоматична класифікація виконувалася методом неконтрольованої класифікації кластерів (Iso Cluster Unsupervised Classification), що базується на основі ітеративного процесу, який застосовується для обчислення мінімальної Евклідової відстані при віднесенні кожної найближчої комірки до певного кластера. При розрахунку “спектральних індексів” використовували нормалізований різницевий індекс рослинності NDVI, що є показником кількості біомаси і вираховується за формулою:

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

де RED і NIR — спектральні яскравості в червоному і ближньому інфрачервоному діапазоні відповідно. Також було розраховано нормований водний індекс (NWI) з використанням зеленого діапазону та середнього інфрачервоного діапазону. Індекс обчислюється за формулою:

$$NWI = \frac{R560(GR) - R1650(SWIR)}{R560(GR) + R1650(SWIR)},$$

де R560(GR) — спектральне відбиття в зеленому діапазоні електромагнітного спектра на довжині хвиль близько 560 нм; R1650(SWIR) — спектральне відбиття в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра на довжині хвиль близько 1650 нм [11, 12].

Оскільки міські агломерації є самоподібною ієрархічною (тобто фрактальною) структурою, що складається з повторюваних на різних структурних рівнях складових урболандшафту, то застосування мультифрактального аналізу для дослідження варіабельності складових міської території є обґрунтованим [13].

Характеристику відхилення розподілу деякої величини від рівномірного обчислювали за формулою узагальненої ентропії Рені [14], заснованою на моментах q -го порядку ймовірностей p_i :

$$S_q = \frac{1}{1-q} \log \sum_{i=1}^N p_i^q, \quad (1)$$

$$p_i = \frac{N_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n p_i^q = 1, \quad (2)$$

де N — загальний обсяг вибірки (загальна кількість складових на вибраній площі); N_i — кількість i -го типу складових у вибраній площі N ; n — кількість у всіх типів складових, число яких залежить від N ; p_i — імовірність належності даного типу складової у вибірці до i -го типу; q — ступінь моменту (статистичної суми), яка приймає цілочисельні значення в діапазоні $-q_{\max} < q < q_{\max}$, $q_{\max} > 0$.

Для визначення варіабельності різноманітних складових урболандшафту вводиться узагальнена статистична сума Z_q (моменти q -го порядку ймовірностей p_i), яка дозволяє відрізнити нерівномірні розподілення складових від рівномірних:

$$Z_q(N, q) = \sum_{i=1}^n p_i^q \propto N^{\tau(q)}. \quad (3)$$

У виразі (3) показано, що основна умова статистичної самоподібності (мультифрактала) є мірою, пропорційною розміру вибірки в степені $\tau(q)$. Або лінійною залежністю в логарифмічному масштабі — $\log[Z_q(N, q)] = \tau(q) \log N$:

$$\tau(q) = \frac{\log[Z_q(N, q)]}{\log N} = \frac{\log \sum_{i=1}^n p_i^q}{\log N}, \quad (4)$$

де N — обсяг генеральної вибірки.

Для визначення варіабельності різноманітних складових та оцінки степеня відхилення їх від рівномірного розподілу по типах скористуємося узагальненими мультифрактальними розмірностями:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1 - q} \quad \text{при} \quad q \neq 1. \quad (5)$$

Функція D_q , що визначена виразами (4) і (5), показує наскільки неоднорідним є розподіл складових урболандшафту за типами і наскільки цей розподіл відрізняється від рівномірного. Ця функція — назва спектра узагальнених розмірностей Реньї мультифрактала. При $q \rightarrow +\infty$ основний внесок у суму відносних значущостей мають домінуючі типи категорій, що характеризуються найбільшими значеннями p_i , а при $q \rightarrow -\infty$ основний внесок роблять складові суми з малими значеннями p_i , тобто рідкісні типи складових. На практиці обмежуються розглядом порядку десятка значень цілих чисел q , що й прийнято в даній роботі.

Якщо розподіл складових за типами неоднаковий, то фрактал є неоднорідним, тобто мультифракталом, і для цього описання використовують спектр узагальнених фрактальних розмірностей D_q . Значення $D(q)$ — інваріантне до розміру вибірки (площі, масштабу) [15].

Існування мультифрактальної структури складових урболандшафту встановлювалося перевіркою виконання двох умов розподілу складових за типами: по-перше, степеневою залежністю зростання компонентів мультифрактальної міри Z_q від розміру вибірки N і, по-друге, незростаючим виглядом функції спектра узагальнених розмірностей $D(q)$. Для оцінки наявності степеневої залежності були виконані обчислення статистичних сум Z_q для чотирьох вибірок: I, II, III і IV (див. рис. 1). Наявність степеневих залежностей між розмірами вибірок і компонентами мультифрактальної міри забезпечують масштабу інваріантність [15].

Результати та їх обговорення. Оцінка варіабельності структури складових міської території Києва на основі космічної інформації ДЗЗ 1986–2011 рр. (табл. 1) виконувалась

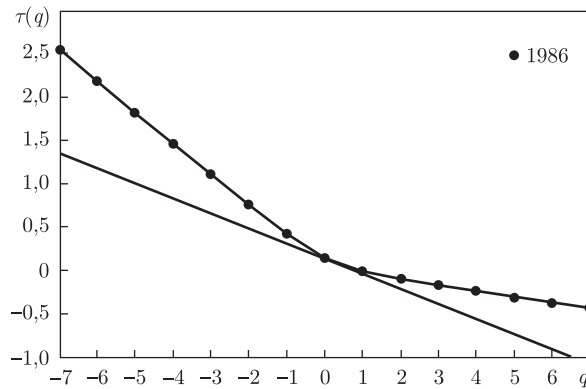


Рис. 2. Оцінка варіабельності різноманітності за мультифрактальними характеристиками розподілу складових урболандшафту по типах на прикладі м. Київ

на основі індексів варіабельності — узагальнених розмірностей Реньї як інтегральних оцінок. У розглянутому аспекті індекси дають змогу оцінити динаміку мінливості структури складових міських територій, а також дати їм об'єктивну оцінку.

За співвідношенням (2)–(4) визначаються розподіл ймовірностей p_i , статистичної суми Z_q та значень $\tau(q)$ за типами складових за весь досліджуваний період 1986–2011 рр.

Нелінійний характер залежності $\tau(q)$, отриманої при дослідженні розподілу складових урболандшафту по типах на прикладі м. Київ, ілюструє рис. 2. Нелінійний характер залежностей $\tau(q)$ та їх відхилення від лінійного показує значний розмах варіабельності в розподілі складових по типах.

Значення індексів варіабельності D_q , де $q \in [-7, 7]$, що обчислені за співвідношенням (5), демонструє табл. 2.

На рис. 3 представлено результати обчислення динаміки інтегральних оцінок варіабельності структури складових за період з 1986 по 2011 рр. Інтегральна оцінка варіабельності D_3 структури складових демонструє значні зміни 1986–2011 рр., які корелюють з коливанням екологічного стану за цей самий період з коефіцієнтом кореляції $R \approx 0,94$.

Таблиця 1. Розподіл складових урболандшафту м. Київ за період з 1986 по 2011 рр.

Роки	Водне дзеркало, км ²	Хвойний ліс, км ²	Листяний ліс, км ²	Загальна площа рослинності, км ²	Територія під забудовою і дорогами, км ²	Пустирі, км ²	Вирубка, км ²	K
1986	50,2	343,2	184,8	613,2	162,4	11,8	4,4	—
1988	51,1	344,7	187,2	607	167	12,3	5,7	—
1990	50,2	341,9	187,5	607,1	167,8	12,5	3,5	9,0
1992	50,9	339,4	193,7	603,4	161,6	12,6	3,2	10,6
1994	48,3	339,2	194,8	602,2	174,4	13,5	5,5	10,6
1996	48,0	338,4	190,2	601,8	177,6	13,8	5,3	9,8
1998	48,4	338,6	190,1	601,4	177,9	13,9	4,2	9,9
2000	47,2	337,7	193,1	600,7	178,4	13,3	5,0	10,0
2002	45,2	330,3	161,5	591,2	182,7	10,3	8,9	10,3
2004	45,8	329,7	173,6	584,7	190,9	10,8	13,9	11,0
2006	45,6	329,0	157,6	585,1	190,1	10,3	14,2	11,0
2008	45,6	328,7	157,9	585,3	192,5	11,7	13,5	13,6
2010	45,7	328,5	156,4	584,5	194,9	11,5	14,0	14,3
2011	45,9	329,8	156,3	573,7	202,9	11,9	12,6	15,0

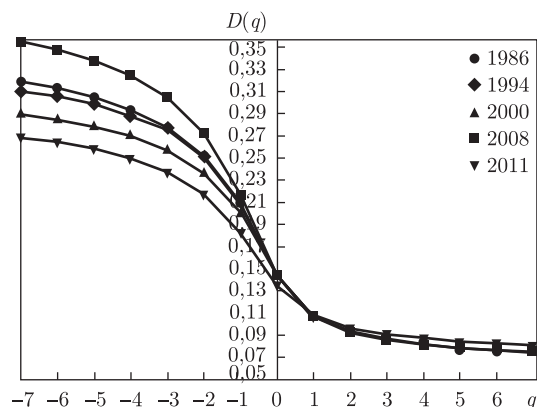


Рис. 3. Графіки функцій D_q , $q \in [-7, 7]$, за 1986–2011 рр.

З розгляду графіків (див. рис. 2, 3) можна зробити висновок, що максимальна варіабельність за аналізований період часу проявляється при від’ємних значеннях q індексів D_q . Найбільш чутливими до екологічних процесів є нечисленні типи складових, а саме: $i = 6$ — пустирі та території, що відведені під будівництво, а також $i = 7$ — вирубка лісів (значення ймовірностей p_i див. у (2)). У той самий час низькі від’ємні значення коефіцієнтів кореляції R для усіх індексів з $q > 0$ вказують на те, що всі найбільш чисельні складові (див. табл. 2), а саме рослинність, яка розділена на хвойну та листяну, мало впливали на екологічний стан міста. Така оцінка певним чином характеризує і саме техногенне навантаження.

Розглянутий приклад використання індексів варіабельності на фактичних даних складових урболандшафту м. Київ підтверджує легітимність методів дослідження варіабельності структури за індексами варіабельності. Основна перевага методів дослідження варіабельності, заснованих на узагальнених ентропіях, полягає в можливості побудови інтегральних

Таблиця 2. Індеси варіабельності D_q розподілу складових урболандшафту за категоріями степені виникнення за період з 1986 по 2011 рр.

q	Значення D_q по роках									R
	1986	1990	1994	1998	2000	2004	2008	2010	2011	
-7	0,32	0,34	0,31	0,32	0,29	0,34	0,36	0,49	0,27	0,38
-6	0,31	0,33	0,31	0,31	0,29	0,33	0,35	0,48	0,26	0,38
-5	0,30	0,32	0,30	0,31	0,28	0,32	0,34	0,46	0,26	0,38
-4	0,29	0,31	0,29	0,30	0,27	0,31	0,32	0,45	0,25	0,38
-3	0,28	0,29	0,27	0,28	0,26	0,29	0,30	0,42	0,24	0,37
-2	0,25	0,26	0,25	0,26	0,24	0,26	0,27	0,37	0,22	0,36
-1	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21	0,27	0,28	0,18	0,32
0	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,49
1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,56
2	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,90
3	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,95
4	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,94
5	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,94
6	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,93
7	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,93

Примітка. R — коефіцієнт кореляції мультифрактальних розмірностей D_q та техногенного навантаження (індекс забруднення атмосфери K) по роках.

оцінок, які дозволяють виявити статистичні зв'язки, що й продемонстровано на прикладі порівняно простій структурі складових урболандшафту.

1. Глебова О. В. Становление и развитие учения о городских ландшафтах: Природный комплекс большого города. – Москва: Наука, 2000. – 242 с.
2. Замятин Д. Н. Географические образы города // География и экология в школе XXI века. – 2006. – № 3. – С. 13–21.
3. Методология и методы оценки состояния городской среды / Отв. ред. Г. Л. Кофф, Э. А. Лихачева, Д. А. Тимофеев. – Москва: Медиа-пресс, 2006. – 200 с.
4. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – Москва; Ижевск: Рег. Хаот. Дин., 2010. – 215 с.
5. Исаева В. В., Касьянов Н. В. Фрактальность природных и архитектурных форм. Сер. Культура // Вестн. ДВО РАН. – 2006. – № 5. – С. 119–127.
6. Sala N. Chaos and fractals in arts and architecture // Inter. J. Chaos Appl. – 2000. – 9. – P. 45–54.
7. Joye Y. Fractal architecture could be good for you // Nexus Network J. – 2007. – 9, No 2. – P. 311–320.
8. Лялько В. И., Федоровский А. Д., Попов М. А. и др. Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем // Космічні дослідження в Україні 2002–2004. – Київ, 2004. – С. 7–14.
9. Екологічний паспорт Київської області (2011 р.) / Державне управління охорони навколишнього природного середовища в Київській області. – Київ, 2011. – 154 с.
10. Праці Центральної геофізичної обсерваторії / За ред. О. О. Косовця. – Київ: Інтерпрес ЛТД, 2009. – Вип. 5 (19). – 116 с.
11. Ермошин И. С. Современные средства автоматизированного дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт // ARCREVIEW. – 2009. – № 1. – С. 12–13.
12. Huete A., Justice C., van Leeuwen W. MODIS VEGETATION INDEX (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Verion 3. April, 1999. – 120 p.
13. Бабич В. Н., Колясников В. А. Фрактальные структуры в планировке и застройке города // Акад. вестн. УралНИИпроект РААСН. – 2009. – № 2. – С. 45–47.
14. Renyi A. Probability theory. – Amsterdam: North-Holland, 1970. – 670 p.
15. Артюшенко М. В., Подгородецкая Л. В., Зуб Л. Н., Федоровский А. Д. Мультифрактальный анализ биоразнообразия и ценотической структуры сообщества растений по данным дистанционного зондирования // Доп. НАН України. – 2011. – № 9. – С. 132–141.

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України”, Київ

Надійшло до редакції 02.04.2013

А. В. Соколовская

Мультифрактальный анализ variability структуры составляющих городских территорий на основе космической информации ДЗЗ (на примере г. Киев за 1986–2011 гг.)

Обоснована возможность использования мультифрактального анализа для интегральной оценки variability структуры основных составляющих городских территорий на основе космической информации ДЗЗ (на примере г. Киев). Проведена оценка variability структуры составляющих городской агломерации, которая выполнялась на основе индексов variability — обобщенных размерностей Реньи как интегральных оценок. В результате получен спектр обобщенных фрактальных размерностей как интегральных характеристик структуры составляющих территории г. Киев, исследована динамика изменений структуры составляющих за период 1986–2011 гг. и их связь с экологическим состоянием города.

A. V. Sokolovska

Multifractal analysis of a variability of the structure of urban areas components based on the information remotely sensed from space (the case of Kyiv from 1986 till 2011)

The possibility of using multifractal analysis for the integral estimation of a variability of the structure of general urban areas components based on the information remotely sensed from space is proven (the Kyiv city is used as an example). We had assessed the variability of the structure of components of the urban agglomeration, which was carried out on the basis of indices of variability of generalized Renyi dimensions as integral estimates. As a result, the spectrum of generalized fractal dimensions as the integral characteristics of structural components of the city area of Kyiv is got. In addition, the dynamics of changes of the components structure for the period of 1986–2011 and their relation to the ecological condition of the city are investigated.