

А. В. Соколовська,

член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський

Деякі методи використання матеріалів космічної зйомки для оцінки і прогнозу сталого розвитку міських територій (на прикладі м. Київ)

Обґрунтовано можливість застосування системних методів використання матеріалів космічної зйомки для оцінки і прогнозу стану довкілля міських територій (на прикладі м. Київ). А саме: фрактального аналізу для інтегральної оцінки мінливості складових міських територій, модель системної динаміки розвитку міста Форрестера–Грехема, а також методу багатокритеріальної оптимізації для моделювання та оцінки екологічного стану міської території.

Сталий розвиток сучасного міста — це зростання благоустрою міської території та підвищення якості життя населення із збереженням і підтримкою на належному рівні стану природного середовища [1]. У зв'язку з цим для всебічного вивчення, аналізу та оцінки міської території використовуються все більш різноманітні методи і джерела інформації. Так, поряд з наземними спостереженнями космічний геомоніторинг міських територій дозволяє не тільки отримувати оперативну інформацію, а й на основі космічних знімків попередніх років отримувати інформацію для моделювання прогнозованої оцінки сталого розвитку міських агломерацій. Тому в сучасному інформаційному потоці для контролю за якісними і кількісними змінами у міських територіях роль космічної інформації ДЗЗ є надзвичайно важливою. Для успішного використання матеріалів космічної зйомки виникає потреба в розробці спеціальної методичної бази космічного геомоніторингу [2].

В результаті збільшення чисельності населення розширюються площі житлової забудови, збільшується щільність будівель і кількість транспорту, витісняються зелені зони і водні об'єкти. При цьому сучасний розвиток міст відбувається за рахунок перетворення, ущільнення і більш раціонального застосування внутрішньої структури без розширення меж міської території, що є ієрархічною сукупністю структурних утворень, які перебувають у взаємообумовленому зв'язку з соціальними, технічними та природними процесами. Це незмінно впливає на стан міського середовища. Отже, залишається актуальним на підставі використання статистичних даних космічних і наземних спостережень дослідження динаміки змін складових урболандшафту територіально-функціональних зон міста та оцінювання їх впливу на екологічний стан міської території. В подальшому дана інформація дозволить виконувати моделювання і прогноз розвитку стану міського довкілля.

Таким чином, розглядаючи міське середовище як складну систему, доцільно для дослідження застосовувати системні методи.

Мета роботи полягала в обґрунтуванні методів (фрактального аналізу, багатокритеріальної оптимізації та системної динаміки) використання матеріалів космічної зйомки для оцінки і прогнозу сталого розвитку міських територій на прикладі м. Київ за період 1994–2013 рр.

Для дослідження було використано космічні знімки території м. Київ: QuickBird, Landsat 7/ETM, Landsat 5 TM та Landsat 8 за період 1994–2013 рр., які доповнювались даними з генерального плану Києва [3].

Методи. Дешифрування космічних знімків проводили програмними комплексами Erdas Imagine та ArcGIS, які мають розвинутий інструментарій просторового аналізу. Для класифікації складових урболандшафту був обраний спосіб “Нейронна мережа” (Neural Net Classification) [4, 5]. На космічних знімках досліджуваної території було виділено основні типи міських ландшафтів: селітебний (міська забудова), селітебно-транспортний, агротехнічний, промисловий, рекреаційний (лісові масиви, парки, сквери, зелені насадження загального користування, об’єкти природоохоронного фонду, водоймища).

Одним із системних методів, які використовуються для дослідження варіабельності (мінливості) структури складових урболандшафту (включно деякі еколого-соціальні фактори), є фрактальний аналіз [6], який характеризується як “структура, що складається з частин, подібних цілому”. Можливість застосування фрактального аналізу для оцінки варіабельності складових міської території встановлювалася перевіркою виконання двох умов: по-перше, степеневі залежності зростання компонентів статистичної суми Z_q від розміру вибірки N , по-друге, не зростаючим виглядом функції спектра узагальнених розмірностей D_q , динаміка змін яких характеризує закономірності росту й еволюції міських територій:

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

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

де

$$\tau(q) = \frac{\log \sum_{i=1}^n p_i^q}{\log N}. \quad (2)$$

Для оцінки динаміки складових урболандшафту, зокрема техногенне навантаження та деякі еколого-соціальні фактори, були використані алгоритми методу багатокритеріальної оптимізації (МБО), що складаються з таких етапів [7]: введення функції близькості порівнюваних величин a й b ; обчислення оцінки для функції близькості — S , функції відповідності — F . Ця функція описує ступінь збігу значень порівнюваних величин. Наприклад, порівнюються такі величини, як складові урболандшафту за всі досліджувані роки за період 1994–2013 відносно їх стану в 1994 р. по річно. Тоді класифікація процесів або об’єктів може бути формалізована як завдання багатокритеріальної оптимізації m критеріїв, кожний з яких виступає як функція відповідності характеристики b параметра a .

Для системного моделювання стану довкілля міста за період 1994–2013 рр. і прогнозу до 2025 р. застосовувалася модель системної динаміки розвитку міста Форрестера–Грехема [8], яка була модифікована шляхом асиміляції космічної інформації ДЗЗ та рівнянь для обчислення функції інтегральної оцінки екологічного стану F . Ця модель полягає в розробці концептуальної і формуванні математичної моделі, які складають рівняння, що описують баланс впливів у системі, ґрунтуються на причинно-наслідкових відношеннях у системі, що

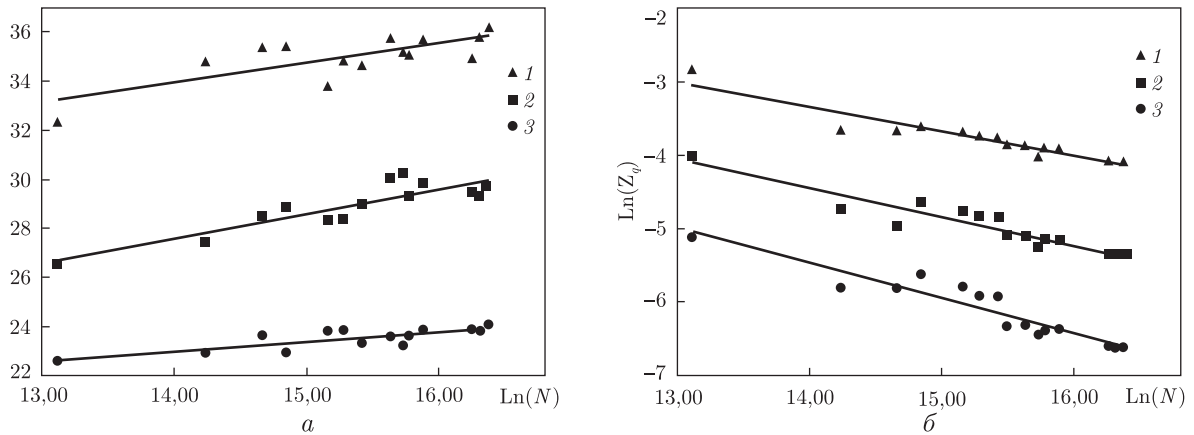


Рис. 1. Залежність компонентів статистичної суми Z_q розподілу складових по типах від розміру вибірки N у білогарифмічній системі координат для значень q : 1 – 4; 2 – 5; 3 – 6 (а); 1 – 4; 2 – 5; 3 – 6 (б)

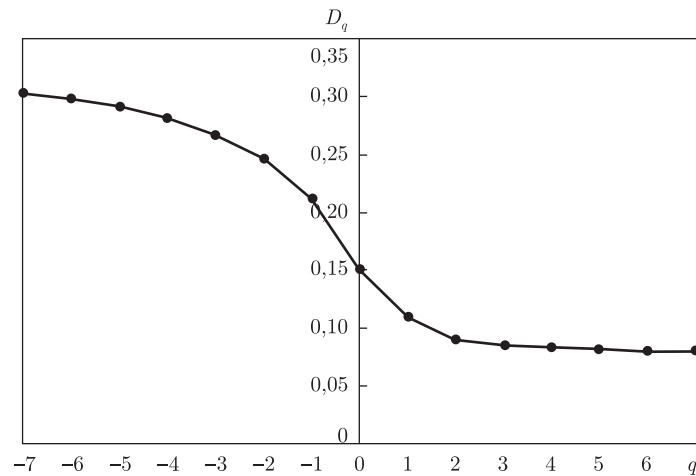


Рис. 2. Графік функції D_q , $q \in [-7, 7]$

моделюється. Моделювання сценаріїв сталого розвитку міських агломерацій виконується при заданих соціально-економічних критеріях, санітарно-допустимих нормах стану довкілля та інших обмеженнях.

Для з'ясування правильності побудови структури моделі та уточнення взаємозв'язків між її підсистемами було проведено верифікацію моделі.

Результати та їх обговорення. Оцінка можливості використання фрактального аналізу для дослідження мінливості складових міської території виконувалась шляхом обчислення (1), (2) статистичних сум Z_q для 15 вибірок, які отримані методом покриття квадратних кластерів, та визначення розмірностей D_q .

З огляду рис. 1 і 2 можна зробити висновок, що основні умови використання фрактального аналізу для оцінки варіабельності складових міської території виконуються. Так, значення $\log Z_q$ по всіх вибірках розташовані майже по теоретичній прямій залежності $\log Z_q$ від $\log N$, а рис. 2 демонструє не зростаючий вигляд функції фрактальної розмірності D_q .

Наступним етапом було визначення функції інтегральної оцінки F екологічного стану довкілля м. Київ на основі отриманих даних космічних і наземних спостережень. Для

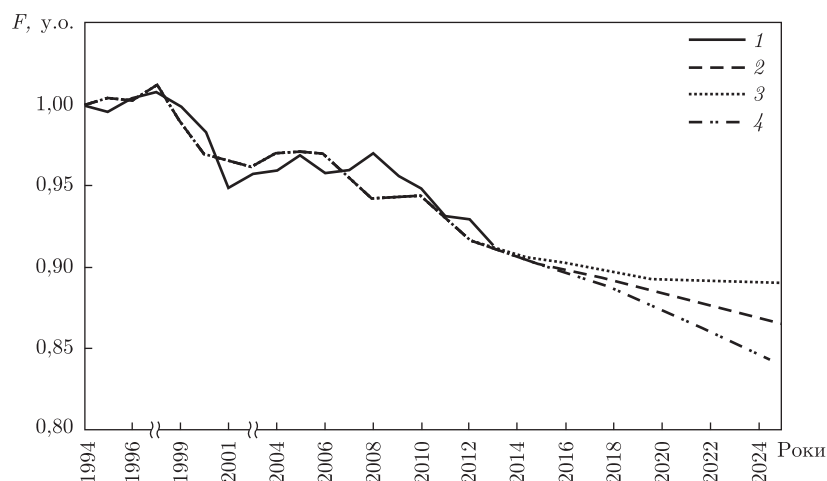


Рис. 3. Результати моделювання стану довкілля м. Київ: 1 — F (модель); 2 — F (БКО); 3 — CO_2 (2%); 4 — зелена зона (-2%)

досліджування було використано дані дешифрування обраних 18 космічних знімків КА Landsat м. Київ за період 1994–2013 рр. [9]. Необхідно було з'ясувати ступінь зв'язку функції F з критерієм E , який характеризує екологічний стан м. Київ за наземними традиційними вимірюваннями [10]. В результаті обчислень коефіцієнта кореляції між значеннями функції F та критерієм E було отримано ймовірність $R = 0,83$, що є достатньою для практичної роботи з даними космічного моніторингу оцінки міських територій.

На рис. 3 наведено графік функції відповідності F (БКО) по роках. Аналізуючи зміни значень F (БКО), відзначимо, що з 1994 р. відбувається плавне збільшення показників F (БКО). Враховуючи, що наприкінці минулого століття техногенне навантаження на міську територію зменшувалось, тенденцію збільшення F (БКО) можна пояснити, як покращення екологічного стану в місті в результаті зменшення виробництва. З 1999 р. значення F (БКО) починають зменшуватися.

Проведені на моделі системної динаміки міста Форрестера–Грехема обчислювальні експерименти показали можливість використання базової моделі для оцінки стану і прогнозу сталого розвитку міських територій. При цьому було виконано модифікацію і доопрацювання моделі міста, а саме, впровадження рівнянь для обчислення функції інтегральної оцінки екологічного стану F (функції відповідності) та асиміляція космічної інформації ДЗЗ для дослідження динаміки змін структури складових урболандшафту міста і прогнозу екологічного стану Києва до 2025 р. Було сформовано модель, відповідні взаємозв'язані підсистеми (модулі), визначено границі модельованої системи та рівня деталізації модельованих процесів. На основі статистичної, аналітичної і експертної інформації були отримані причинно-наслідкові зв'язки між модулями та збудовані відповідні діаграми. Результат моделювання і прогноз стану довкілля м. Київ до 2015 р. демонструє рис. 3.

Як приклад, наведено прогнозну оцінку розвитку стану довкілля при поступовій зміні складових урболандшафту: зеленої зони та техногенного навантаження на 2% від номінального значення 2013 р.

З рис. 3 видно, що модель адекватно реагує на зміну значень складових міської території. Так, збільшення площ зеленої зони приводить до покращення екологічного стану території Києва, а підвищення техногенного навантаження викликає погіршення екологічного стану.

Таким чином, на підставі проведених нами досліджень можна зробити такі висновки: розглянутий приклад використання індексів варіабельності на фактичних даних міської території Києва свідчить про працездатність фрактальних методів, що підтверджується степеневою залежністю зростання компонентів мультифрактальної міри Z_q від розміру вибірки N (див. рис. 1) і не зростаючим виглядом функції спектра узагальнених розмірностей D_q (див. рис. 2). Отримані інтегральні оцінки мінливості складових дозволили виявити певні тенденції розвитку міських територій.

Методом багатокритеріальної оптимізації (на прикладі м. Київ за період 1994–2013 рр.), отримано взаємозв'язок структури складових урболандшафту та деяких еколого-соціальних факторів зі станом довкілля міської території. Виконано моделювання, а також дана і прогнозна оцінка стану довкілля м. Київ до 2025 р. на підставі модифікованої та доопрацьованої моделі системної динаміки Форрестера–Грехема. Перспективність використання космічної інформації ДЗЗ у комплексі з розглянутими методами полягає в можливості інтегральних оцінок, моделюванні та прогнозі сталого розвитку міських агломерацій з урахуванням екологічних факторів.

1. Глебова О. В. Становление и развитие учения о городских ландшафтах // Природный комплекс большого города. – Москва: Наука, 2000. – 242 с.
2. 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.
3. Генеральный план м. Києва. Основні положення / Упоряд., виконавчий орган Київської міської ради (Київська міська державна адміністрація), комунальна організація “Інститут генерального плану м. Києва”. – Київ, 2011. – 107 с.
4. Ермошин И. С. Современные средства автоматизированого дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт // ARCREVIEW. – 2009. – № 1. – С. 12–13.
5. Huete A., Justice C., Van Leeuwen W. MODIS VEGETATION INDEX (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Verion 3. April, 1999. – P. 120.
6. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – Москва: Ин-т компьют. исследований, 2002. – 856 с.
7. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Об оценке эффективности аппаратных комплексов дистанционного зондирования Земли // Доп. НАН України. – 2001. – № 10. – С. 120–124.
8. Форрестор Д. Динамика развития города. – Москва: Прогресс, 1974. – 28 с.
9. Соколовська А. В. Мультифрактальний аналіз варіабельності структури складових міських територій на основі космічної інформації ДЗЗ (на прикладі м. Київ за 1986–2011 р.) // Доп. НАН України. – 2013. – № 12. – С. 187–194.
10. Праці Центральної геофізичної обсерваторії // За ред. О. О. Косовець та ін. – Київ: Інтерпрес ЛТД. – 2009. – Вип. 5 (19). – 116 с.

А. В. Соколовская, член-корреспондент НАН Украины **А. Д. Федоровский**

Некоторые методы использования материалов космической съемки для оценки и прогноза устойчивого развития городских территорий (на примере г. Киев)

Обоснована возможность применения системных методов использования материалов космической съемки для оценки и прогноза состояния окружающей среды городских территорий (на примере г. Киев). А именно: фрактального анализа для интегральной оценки изменчивости составляющих городских территорий, модели системной динамики развития города Форрестера–Грэхема, а также метода многокритериальной оптимизации для моделирования и оценки экологического состояния городской территории.

A. V. Sokolovska, Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. D. Fedorovskiy**

Some methods for using the satellite imagery for assessing and forecasting the sustainable development of urban territories (the case of Kiev)

The possibility of application of system methods using the satellite imagery to assess and to forecast the state of the environment on urban territories (the Kiev city is used as an example) is substantiated. The following methods are used: fractal analysis for the integral assess of the variability of components of the urban territories; system dynamics (Forrester–Graham urban dynamics model), and multiobjective optimization method for the modeling and the estimation of the ecological condition of urban territories.