

УДК 528.8.04

А. В. Соколовська

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЇ (НА ПРИКЛАДІ МІСТА КИЄВА)

Обґрунтовується можливість використання космічної інформації ДЗЗ і методу багатокритеріальної оптимізації для оцінки екологічного стану урбанізованих територій на прикладі м. Києва шляхом формування функції близькості, обчислювання, на основі статистичних зв'язків, функції відповідності та інтегрального визначення структури складових урболандшафтів.

ВСТУП

Сучасний екологічний стан міст вимагає постійного вдосконалення методів контролю і оцінки екологічних наслідків урбанізації та впливу техногенних факторів. Для цього необхідне створення оперативних і поточних методів контролю та прогнозу розвитку екологічного стану міст та розробка заходів до зниження наслідків техногенного впливу. Серед сучасних методів найбільш перспективними є космічні методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які в режимі реального часу виконують моніторинг досліджуваних територій. За допомогою космічних знімків 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 інформація використовується для моделювання різноманітних сценаріїв перспективного розвитку території міст, розробки довгострокових прогнозів і накопичення статистичних даних динаміки змін екологічного стану міських територій [7].

Сьогодні вже складно уявити ефективне управління екологічною безпекою мегаполісу, прийняття раціональних рішень у сфері охорони навколишнього природного середовища без за-

стосування аерокосмічних та ГІС-технологій. Це дозволяє не тільки вести оперативний контроль за потенційно небезпечними територіями, але й отримувати поточну інформацію для оцінювання, моделювання і прогнозу складних природних та техногенних процесів міських агломерацій. Створення на цій основі нових методик дозволяє значно розширити функціональні можливості космічного геомоніторингу та підвищити ефективність вирішення екологічних задач міських територій.

Відомо багато досліджень, присвячених оцінці стану міських агломерацій, а саме: геолого-екологічне районування міських агломерацій, прогноз факторів геологічного ризику, оцінка техногенного навантаження, інвентаризація та контроль гідрографічної і гідротехнічної мережі, контроль забруднення водних об'єктів та атмосфери та інші [8, 1]. Однак методи інтегральної оцінки екологічного стану міських територій на основі космічної інформації ДЗЗ ще розроблені недостатньо.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні та апробації на прикладі території міста Києва використання космічної інформації ДЗЗ до оцінки екологічного стану міської території шляхом установлення на основі багатокритеріальної оптимізації зв'язку інтегральної характеристики (функції F) складових урболандшафту (включно з деякими геоекологічними факторами) за 1984–2011 рр. з

статистичною оцінкою екологічного стану міста за цей же період, отриманою на основі наземних спостережень.

МЕТОДИ ОБРОБКИ ДАНИХ

Для дешифрування було використано 24 «безхмарні» знімки території Києва, отримані із супутників «Landsat 7/ETM+», «Landsat 5 TM», «Aqua» (сенсор AIRS) у 1984—2011 рр.

За офіційними даними площа Києва дорівнює 835.6 км². Своєрідність і різноманітність природних умов Києва пов'язані з його розташуванням на межі фізико-географічних зон: лісостепової та мішаних лісів. Північна частина міста розташована на Поліській низовині, південно-західна (правобережна) — на Придніпровській височині, південно-східна (лівобережна) — на Придніпровській низовині.

Велику площу займають численні парки і сквери. Проте вирубка дерев у парках та 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, їхня площа у межах міста становить 47 км², або 8.0 % від загальної. Ландшафтна структура території Києва дуже складна. За функціональним використанням територія м. Києва розділяється на п'ять основних типів міських ландшафтів: селітебний (міська і сільська 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 (понад 96.9 % від загальної кількості викидів). Найвище забруднення повітря в Києві спостерігається в місцях, прилеглих до автомагістралей та перехресть. У Києві автомобільний транспорт дає 83.4 % усіх шкідливих викидів в атмосферу [4, 5, 2].

Виходячи з параметрів космічних знімків для подальших досліджень ми відібрали такі складові урболандшафту міста Києва і геоекологічні фак-

тори: техногенне навантаження, зелені насадження, водойма, забудована територія, пустирі і будівельні майданчики.

Для обробки та інтерпретації матеріалів дистанційного зондування використовувались програмні комплекси Erdas Imagine та ArcGIS, які мають розвинутий інструментарій просторового аналізу. Для точнішої обробки та класифікації космічних знімків доцільне спільне використання автоматичної класифікації та спектральних індексів, отриманих на основі значень яскравості об'єктів в різних спектральних зонах.

Автоматична класифікація виконувалася методом неконтрольованої класифікації кластерів (Iso Cluster Unsupervised Classification), в якому застосовується ітеративний процес для обчислення мінімальної евклідової відстані при віднесенні кожної найближчої комірки до певного кластера [3]. При розрахунку спектральних індексів було використано нормалізований різницевий індекс рослинності *NDVI* [14], який є показником кількості біомаси:

$$NDVI = (I_{NIR} - I_{RED}) / (I_{NIR} + I_{RED}), \quad (1)$$

де I_{RED} і I_{NIR} — спектральні яскравості в червоному і ближньому інфрачервоному діапазоні відповідно.

Також було розраховано нормований водний індекс *NWI*, який використовує зелений діапазон та середній інфрачервоний діапазон [11]:

$$NWI = (R_{560} - R_{1650}) / (R_{560} + R_{1650}), \quad (2)$$

де R_{560} , R_{1650} — коефіцієнти відбиття в зеленому та ІЧ-діапазонах ($\lambda \approx 560$ і 1650 нм).

Для оцінки динаміки складових урболандшафту, що включає техногенне навантаження, були використані алгоритми методу багатокритеріальної оптимізації, які складаються з таких етапів [12]: введення функції близькості $S_j(b_j, a_j)$ порівнюваних величин a і b , обчислення оцінки для функції близькості та функції відповідності F_1 . Ця функція описує ступінь близькості значень порівнюваних величин, наприклад середньорічних значень складових урболандшафту за період 1984—2011 рр. відносно їхнього стану в 1984 р.:

$$F_1(B, A) = \sum_{j=1}^n \rho(b_j, a_j) \cdot [1 - S(b_j, a_j)], \quad (3)$$

де $\rho(b_j, a_j)$ — вагові коефіцієнти, $j = 1, \dots, n$.

Близькість значення параметра a до параметра b визначається за допомогою функції близькості $S_j(b_j, a_j)$:

$$S_j(b_j, \bar{a}_j) = \begin{cases} (\bar{a}_j - b_j) / \bar{a}_j & \text{при } b_j < \bar{a}_j, \\ (b_j - \bar{a}_j) / \bar{a}_j & \text{при } b_j > \bar{a}_j. \end{cases} \quad (4)$$

Тоді класифікація процесів або об'єктів може бути формалізована як завдання багатокритеріальної оптимізації m критеріїв, кожний з яких виступає як функція відповідності характеристики b параметрові a .

У даній роботі для обчислення та моделювання складних систем на основі викладеної теорії було використано спеціальну комп'ютерну програму, розроблену у Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі дешифрування і аналізу космічних зображень міста Києва за період 1984 — 2011 рр. було отримано значення основних складових характеристик урболандшафту, вплив яких на екологічний стан міської території досліджується далі (див. таблицю). Екологічний стан міста оцінювався на основі комплексного індексу K забруднення

Обчислені значення площ складових урболандшафту, функції відповідності F , чисельних оцінок E екологічного стану в умовних одиницях, техногенного навантаження та вагових коефіцієнтів $\rho(b_j, a_j)$

Роки	E , у. о.	Техногенне навантаження (min), мг/м ³	Зелені насадження (max), км ²	Забудова (min), км ²	Пустирі і будівельні майданчики (min), шт	Водойма (max), км ²	F
1984		1	618.5	161.6	895	50.6	1.000
1986		0.89	613.2	162.4	931	50.2	0.954
1987		0.87	606.9	163.2	942	51.5	0.943
1988		0.88	607.0	167.0	1012	51.1	0.937
1989		1.02	607.1	167.8	1046	50.2	0.974
1990	0.112	1.38	603.4	161.6	1045	50.9	0.980
1992	0.086	1.48	603.1	165.4	1034	49.8	0.975
1993	0.094	1.71	604.6	170.7	1057	49.9	0.969
1994	0.102	1.72	602.2	174.4	1184	48.3	0.951
1995	0.100	1.68	601.8	177.6	1165	48.0	0.949
1996	0.099	1.74	601.4	177.9	1107	48.4	0.954
1998	0.097	2.1	600.7	178.4	1156	47.2	0.946
1999	0.092	2.05	600.3	178.1	1080	47.8	0.953
2000	0.090	2.13	598.6	175.4	994	48.4	0.964
2001	0.074	2.1	592.6	179.1	1060	46.9	0.948
2002	0.069	2.0	591.2	182.7	1069	45.2	0.939
2004	0.067	2.32	584.7	190.9	1204	45.8	0.923
2005	0.066	2.4	585.1	190.1	1139	45.6	0.928
2006	0.065	2.59	585.3	192.5	1098	45.6	0.929
2007	0.064	2.6	584.5	194.9	1020	45.7	0.934
2008	0.062	2.81	573.7	202.9	1005	45.9	0.926
2009	0.056	3.0	568.6	210.9	1042	46.4	0.918
2010	0.055	2.95	568.2	211.8	1003	45.6	0.919
2011	0.054	3.18	567.8	217.6	1100	45.6	0.907
$\rho(b_j, a_j)$		0.35	0.25	0.15	0.1	0.15	$r = 0.85$

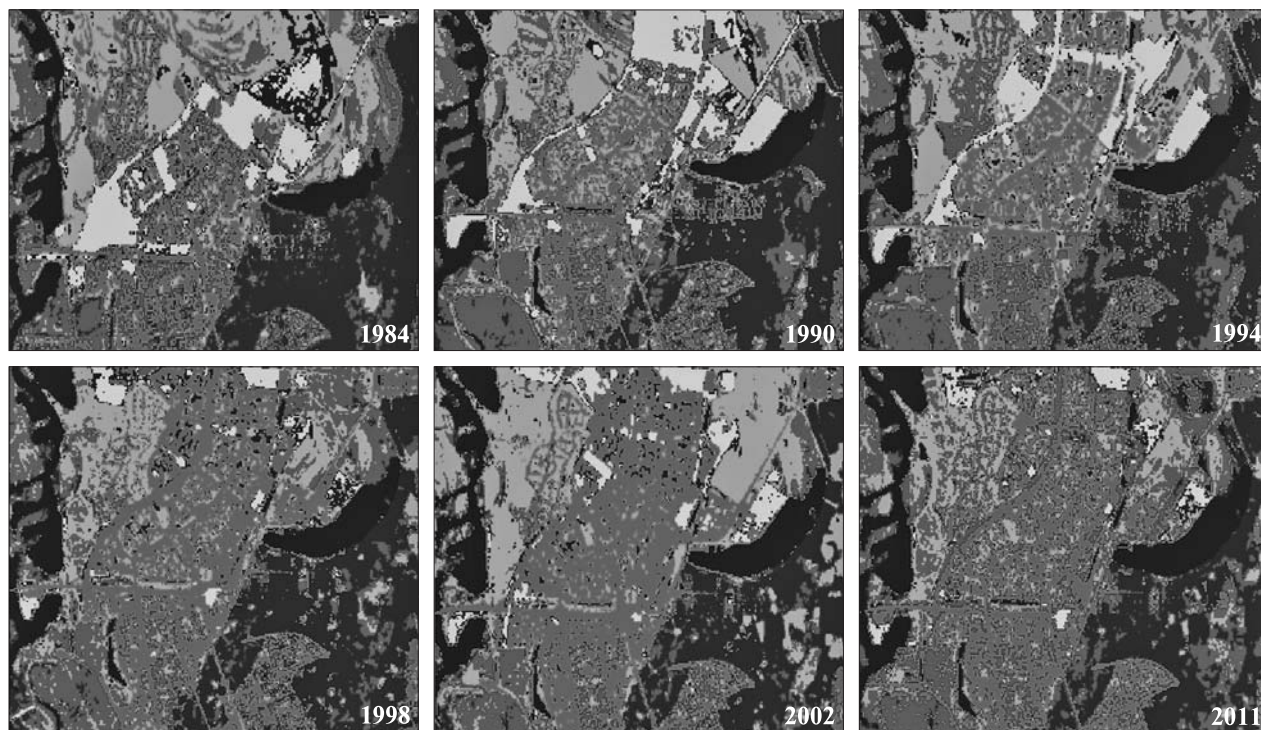


Рис. 1. Фрагменти зображень міста Києва, отримані в результаті дешифрування космічних знімків «Landsat 5 TM» за період 1984—2011 рр.

атмосфери, значення якого були отримані Центральною геофізичною обсерваторією в результаті наземних спостережень. При цьому як критерій оцінки екологічного стану міста використовувалася обернена величина $E = 1/K$ (умовних одиниць). Значення техногенного навантаження у 2002—2009 рр. вважалося рівним значенню концентрації CO_2 в атмосфері, яке було отримане сенсором AIRS космічного апарата «Aqua» [13], а для інших років використовувалося значення загазованості атмосфери міста газом CO на основі даних Центральної геофізичної обсерваторії [9]. При цьому коефіцієнт кореляції супутникових і наземних вимірювань складав 0.9.

На рис. 1 представлено деякі фрагменти зображень міста Києва, отримані в результаті дешифрування космічних знімків за період з 1984 р. по 2011 р. Зіставлення зображень дозволяє побачити істотні зміни розмірів площ складових міської території, які відбулися за цей період.

Функцію відповідності F_1 для складових міської території (таблиця) обчислено для кожного

року досліджень (1986—2011 рр.) на основі рівняння (3) відносно складових за 1984 р., які були умовно прийняті за еталон.

Для обчислення F_1 згідно із рівнянням (3) необхідно врахувати значення вагових коефіцієнтів $\rho(b_j, a_j)$ для кожної складової урболандшафту. Для цього виконувалося експертне оцінювання впливу кожної складової на екологічний стан міської території [10]. Значення експертних оцінок вагових коефіцієнтів і функції F_1 наведено в таблиці. На рис. 2 показано, як змінювалися значення функції відповідності з часом.

Наступним етапом досліджень стали пошуки зв'язку екологічного стану міста з функцією відповідності F_1 , яка характеризує структуру складових урболандшафту. Для цього оцінювався коефіцієнт кореляції r між значеннями функції F_1 та показником E екологічного стану міста за період 1990—2011 рр. Значення коефіцієнта кореляції r виявилось рівним $R = 0.85$.

Аналізуючи зміни значень E і F_1 , бачимо, що з 1988 р. відбувається плавне збільшення по-

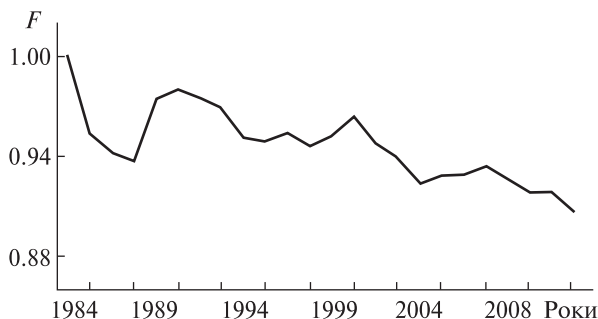


Рис. 2. Обчислені значення функції F_1 в умовних одиницях

казників F_1 , а з 1990 р. значення E і F_1 починають зменшуватися. Враховуючи, що наприкінці минулого століття техногенне навантаження на міську територію стрімко зростало, тенденцію зменшення E і F_1 можна пояснити як свідчення погіршення екологічної ситуації у місті.

Оскільки дані, наведені в таблиці, здобуто на відносно обмеженому експериментальному матеріалі, для підтвердження наявності статистично суттєвої кореляційної залежності між дослідженими величинами необхідно показати, що значення коефіцієнтів кореляції r дійсно не дорівнюють нулю. З огляду на те, що розподіл r повільно сходиться до нормального, дану операцію було проведено з використанням статистики $U = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \cdot \ln \frac{1+r}{1-r}$ шляхом перевірки гіпотези про рівність нулю одержаних коефіцієнтів кореляції r для певної кількості експериментів [6]. Відсутність статистично вірогідної кореляційної залежності виявляється у випадку, коли значення функції статистики потрапляють в інтервал $-Z_{\alpha/2} \leq U < Z_{\alpha/2}$, де $Z_{\alpha/2}$ — обмеження по площі гауссівського розподілу за ординатами $\pm \alpha$. При рівні значущості $\alpha = 0.1$ $Z_{\alpha/2} = 1.65$, тоді як для $n = 19$ років і $r = 0.85$ значення статистики U дорівнює 5.2. Таким чином, підтверджується наявність статистично вірогідної кореляційної залежності та достовірність результатів досліджень.

ВИСНОВКИ

На прикладі дослідження міста Києва обґрунтовано можливість використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки еко-

логічного стану міської території шляхом інтегрального визначення структури складових урболандшафтів (включаючи деякі геоecологічні фактори), обчислювання функції відповідності F_1 , яка має кореляційний взаємозв'язок з наземною оцінкою екологічного стану міської території з ймовірністю 0.85, що цілком достатньо для оперативного контролю екологічного стану території на основі космічного геомоніторингу.

1. Глебова О. В. Становление и развитие учения о городских ландшафтах // Природный комплекс большого города. — М.: Наука, 2000. — 2428 с.
2. Екологічний паспорт Київської області (2011 р.) // Державне управління охорони навколишнього природного середовища в Київській області. — Київ, 2011. — 154 с.
3. Ермошин И.С. Современные средства автоматизированного дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт // ARCREVIEW. — 2009. — № 1. — С. 12—13.
4. Замятин Д. Н. Географические образы города // География и экология в школе XXI века. — 2006. — № 3. — С. 13—21.
5. Звіт про стан навколишнього природного середовища в місті Києві у 2010 р. // Державне управління екології та природних ресурсів в м. Києві. — Київ, 2011. — 122 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1974. — 831 с.
7. 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.
8. Методология и методы оценки состояния городской среды / Отв. ред. Г. Л. Кофф, Э. А. Лихачёва, Д. А. Тимофеев. — М.: Медиа-пресс, 2006. — 200 с.
9. Праці Центральної геофізичної обсерваторії / Під ред. О. О. Косовця. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2009. — Вип. 5 (19). — 116 с.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 186 с.
11. Сахацький О. І. Досвід використання водних індексів супутникових зйомок TERRA/MODIS для моніторингу засухи південних районів України на прикладі вегетаційного періоду 2007 року // Доп. НАН України. — 2008. — № 5. — С. 127—130.
12. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 5—6. — С. 75—79.

13. Engelen R. J., Serrar S., Chevallier F. Four dimensional data assimilation of atmospheric CO₂ using AIRS observations // J. Geophys. Res. — 2009. — **114**, D03303. — doi:10.1029/2008JD010739.
14. Huete A., Justice C., van Leeuwen W. Modis vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Verion 3. April, 1999.

Стаття надійшла до редакції 11.06.13

A. V. Sokolovskaya

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КИЕВА)

Обосновывается возможность использования космической информации ДЗЗ и метода многокритериальной оптимизации для оценки экологического состояния

урбанизированных территорий на примере г. Киева путем формирования функции близости, вычисления на основе статистических связей функции соответствия и интегрального определения структуры составляющих урболандшафтов.

A. V. Sokolovska

SPACE MONITORING OF ECOLOGICAL CONDITION OF URBAN TERRITORIES (THE KYIV CITY IS USED AS AN EXAMPLE)

We substantiate the possibility to use the Earth remote sensing space information and multiobjective optimization method for the estimation of ecological condition of an urban territory. The Kyiv city is used as an example. For this purpose, the compliance function is formed, accordance function is calculated on the basis of statistical data, and integral determination of urban landscape components is performed.