

УДК 528.8.04

А. В. Соколовська, К. Ю. Суханов, О. Д. Федоровський

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

ВИКОРИСТАННЯ КОСМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЗЗ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ УРБОЛАНДШАФТУ НА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ТЕРИТОРІЇ МІСТА КИЄВА

Обґрунтовується можливість використання космічної інформації ДЗЗ для системного моделювання змін структури складових урболандшафту на прикладі м. Києва, їхнього впливу на розвиток екологічного стану міської території, шляхом формування математичної моделі процесів, визначення на основі статистичних даних кореляційних зв'язків та коефіцієнтів впливу складових урболандшафту.

ВСТУП

Дослідження, пов'язані з розвитком міських систем, надзвичайно різноманітні і багатогранні. Сучасні моделі дозволяють виконувати системне моделювання різних сценаріїв розвитку міських територій на різних ієрархічних рівнях дослідження: соціальному, екологічному та економічному. На цій основі отримуються оптимальні варіанти напрямків розвитку міських територій [1]. Особливо перспективними дослідженнями є контролювання та прогноз процесів, що відбуваються в екологічній сфері міських агломерацій. Відомо багато досліджень, присвячених оцінці екологічного стану міських територій [6], а саме: геологоекологічне районування, планування забудови, прогноз і оцінка ризику, техногенного навантаження, контроль гідрографічної і гідротехнічної мережі, контроль забруднення водних об'єктів, атмосфери та інші.

Одне з центральних місць у районуванні та оцінці екологічного стану займають дослідження складових урболандшафту включно з деякими техногенними факторами, які справляють найбільший негативний вплив на екологічний стан міста [11]. Для цього створюються моделі, які включають визначення, аналіз та наслідки вза-

ємодії одночасно усієї сукупності техногенних, урболандшафтних, геоландшафтних та деяких інших факторів на екологічний стан міської території. Важливим при цьому є визначення характеру взаємовпливу та взаємозалежності складових урболандшафту та геоекологічних факторів, що дозволить виділити зони з різним ступенем техногенно-екологічної небезпеки, розробити прогноз їхніх змін та обґрунтувати шляхи мінімізації їхнього шкідливого впливу.

Для отримання оперативної інформації, яка буде використана при подальшому моделюванні і оцінці екологічного стану міських територій, найбільш перспективним являється космічний геомоніторинг [7]. 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 для моделювання різноманітних сценаріїв перспективного розвитку міст, розробки довгострокових прогнозів і накопичення статистичних даних динаміки змін екологічного стану міських територій.

Метою даної роботи є обґрунтування можливості використання космічної інформації ДЗЗ для системного моделювання змін структури складових урболандшафту, їхнього впливу на

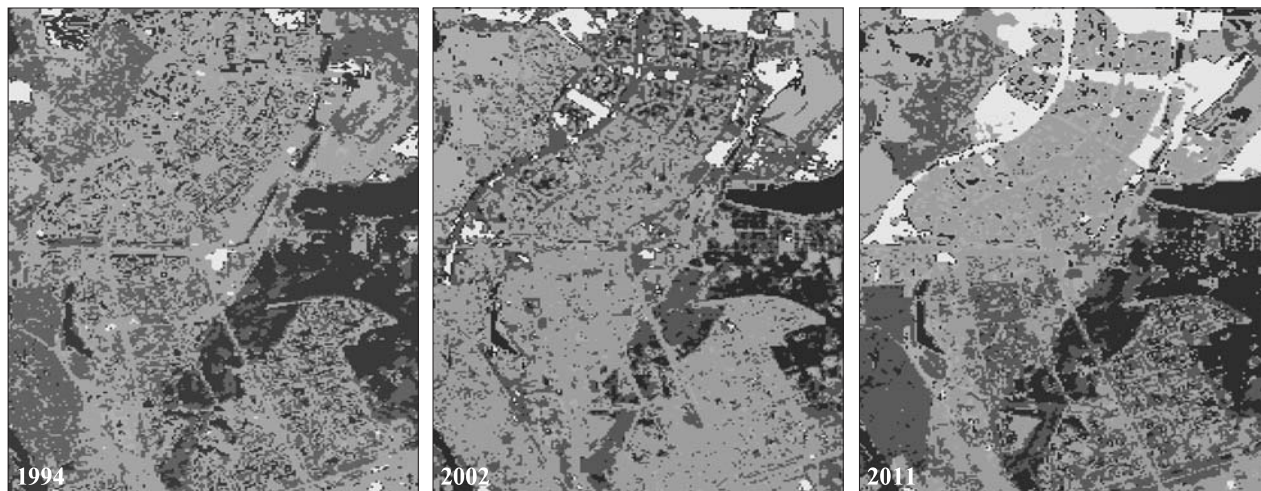


Рис. 1. Фрагменти зображень міста Києва, отримані в результаті дешифрування космічних знімків «Landsat 5 TM» за 1994, 2002 та 2011 рр.

розвиток екологічного стану міської території шляхом формування математичної моделі процесів, визначення на основі статистичних даних кореляційних зв'язків та коефіцієнтів впливу складових урболандшафту (включно з деякими геоecологічними факторами), на прикладі міста Києва за період 1994 – 2011 рр.

ДЖЕРЕЛА ДАНИХ

Для досліджень було використано 16 «безхмарних» знімків території Києва, отриманих з супутників «Landsat 7/ETM+», «Landsat 5 TM» за період 1994 по 2011 рр. (рис. 1).

За офіційними даними, площа Києва дорівнює 835.6 км², яка розділена на 10 адміністративних районів. До міської території включені досить великі лісові масиви, розташовані за межами міської забудови. Велику площу займають також численні парки і сквери. Зелені насадження займають 361 км² або 43 %. Проте вирубка дерев у парках та прибудинкових територіях протягом останнього десятиріччя зменшує площу зелених насаджень. Окрім лісів, 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 [2].

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).

Виходячи з параметрів вище перерахованих космічних знімків, для подальших досліджень були відібрані такі складові урболандшафту міста Києва, а також деякі геоecологічні фактори, отримані на основі космічної інформації: зелені насадження, водні об'єкти, забудована територія та техногенне навантаження.

МЕТОДИ

Для обробки та інтерпретації матеріалів дистанційного зондування були використані програмні комплекси Erdas Imagine та ArcGIS., які мають розвинений інструментарій просторового аналізу. Для точнішої обробки та класифікації космічних знімків доцільне спільне використання автоматичної класифікації та «спектральних індексів», отриманих на основі перерахунку співвідношення 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 комірочки до певного кластера. При розрахунку «спектральних індек-

сів» було використано нормалізований різнице-вий індекс рослинності $NDVI$ [3], який є показником кількості біомаси:

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

де RED і NIR — спектральні яскравості в червоному і ближньому інфрачервоному діапазонах відповідно.

Також було розраховано нормований водний індекс (NWI), який використовує зелений діапазон та середній інфрачервоний діапазон [14]:

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

де $R_{560(GR)}$ — спектральне відбиття в зеленому діапазоні електромагнітного спектра на довжині хвиль $\lambda \approx 560$ нм, $R_{1650(SWIR)}$ — спектральне відбиття в інфрачервоному діапазоні близько $\lambda \approx 1650$ нм.

Для розробки моделі і системного моделювання екологічного стану міської території з використанням космічної інформації ДЗЗ було запропоновано метод адаптивного балансу впливів — *Adaptive Balance of Causes* (ABC-метод). У роботі І. Е. Тимченко та Е. М. Ігумнової [9] показано можливість застосування для моделювання природних процесів методу ABC, заснованого на врахуванні ієрархії і причинно-наслідкових зв'язків між модулями складної системи на основі системної динаміки Д. Форрестора [12]. ABC-метод передбачає, що модулі системи знаходяться в стані динамічної рівноваги, підтримуваної функціями впливу, які пов'язують даний модуль з іншими модулями системи. Під управлінням зовнішньої дії на систему усередині неї зберігається режим динамічного балансу впливів.

Цей метод полягає в розробці концептуальної моделі і формуванні математичної моделі, яку складають рівняння, що описують адаптивний баланс впливів у системі. Побудова моделі міської території виконувалась на основі експертних даних про причинно-наслідкові відношення у модельній системі з подальшим моделюванням та прогнозуною оцінкою екологічного стану міської території.

Основне рівняння методу виражає баланс тенденцій у зміні значень процесу (x), обумовлених впливами на нього з боку інших процесів [10]:

$$\frac{dx_i}{dt} = 1 - 2F^{(+)}(a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + x_i), \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

де a_{is} — коефіцієнти рівнянь моделі (надалі коефіцієнти), які враховують вплив складової s на складову i та зберігають постійне значення у вибраному інтервалі часу.

Якщо базова функція впливів $F^{(+)}$ має форму параболи, що асимптотично наближається до одиниці, рівняння (3) стає лінійним:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{i,i-1}x_{i-1} + a_{i,i+1}x_{i+1} + \dots + a_{in}x_n - x_i, \quad (4)$$

де t — часовий або просторовий аргумент процесу, $i = 1, 2, \dots, n$.

У результаті одержимо систему n лінійних рівнянь математичної моделі, яку будемо використовувати у подальшому. Коефіцієнти впливу a_{ij} можуть бути ідентифіковані двома основними шляхами: за оцінками експертів і на основі статистичної обробки архівних даних.

У Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України» для моделювання складних систем на основі викладеної теорії розроблено спеціальну програму, яку і використано у даній роботі.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі дешифрування і аналізу космічних зображень міста Києва за період 1994—2011 рр. було отримано значення характеристик основних складових урболандшафту, вплив яких на екологічний стан міської території досліджується далі, а саме: зеленої зони (A), водних об'єктів (B), забудови (C) і техногенного навантаження (T) (див. табл. 1).

Екологічний стан міста оцінювався на основі комплексного індексу K забруднення атмосфери, значення якого були отримані Центральною геофізичною обсерваторією [8] в результаті наземних вимірювань. Обернена величина $E = 1/K$ (умовні одиниці) використовується для оцінки екологічного стану міста. Значення техногенного навантаження T у 2002...2009 рр. вважалось рівним значенню концентрації CO_2 в атмосфері, яке було отримане сенсором AIRS космічного апарату.

та «Аqua» [13], а для інших років використовувалося значення загазованості атмосфери міста газом СО на основі даних Центральної геофізичної обсерваторії. При цьому коефіцієнт кореляції супутникових і наземних вимірювань складав 0.9.

На рис. 1 представлено два фрагменти зображень міста Києва, отримані в результаті дешифрування космічних знімків «Landsat 5 ТМ» за 1994, 2002 та 2011 рр. Зіставлення зображень дозволяє побачити істотні зміни розмірів площ складових міської території, які відбулися за цей період.

Системне моделювання і прогнозна оцінка розвитку екологічного стану міської території під впливом змін складових урболандшафту виконувалась на основі рівнянь (2).

Якщо прийняти, що кожна зі складових може бути виражена лінійною комбінацією решти складових, то можна скласти математичну модель взаємозв'язку складових урболандшафту (4):

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= a_{EC}C + a_{ET}T + a_{EA}A + a_{EB}B - E, \\ \frac{dC}{dt} &= a_{CT}T + a_{CA}A + a_{CB}B + a_{CE}E - C, \\ \frac{dT}{dt} &= a_{TA}A + a_{TB}B + a_{TE}E + a_{TC}C - T, \\ \frac{dA}{dt} &= a_{AB}B + a_{AE}E + a_{AC}C + a_{AT}T - A, \\ \frac{dG}{dt} &= a_{BE}E + a_{BC}C + a_{BT}T + a_{BA}A - B. \end{aligned} \quad (5)$$

Для моделювання і оцінки екологічного стану необхідно знати значення коефіцієнтів a_{ij} . Визначення їх є важливим етапом формування моделі. Від того, наскільки правильно визначені значення коефіцієнтів, залежить якість сценаріїв розвитку системи. Особливість методу АВС полягає в тому, що на основі даних попередніх досліджень можна дати оцінку коефіцієнтів на основі статистичних даних. З цією метою використовуються елементи кореляційної матриці досліджуваних складових, що дозволяє виключити визначення коефіцієнтів евристично. Крім того, спрощується побудова рівнянь моделі, які в цьому випадку мають уніфіковану форму. У відповідності до цього стан балансу складових у системі (5) може бути використаний для визначення самих коефіцієнтів впливу.

Прирівнюючи до нуля праві частини рівнянь системи (5), одержуємо систему однорідних лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} a_{EC}C + a_{ET}T + a_{EA}A + a_{EB}B &= E, \\ a_{CT}T + a_{CA}A + a_{CB}B + a_{CE}E &= C, \\ a_{TA}A + a_{TB}B + a_{TE}E + a_{TC}C &= T, \\ a_{AB}B + a_{AP}E + a_{AC}C + a_{AT}T &= A, \\ a_{BE}E + a_{BC}C + a_{BT}T + a_{BA}A &= B. \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки складові урболандшафтів формуються в умовах міських територій, їхні значення повинні бути узгоджені між собою, а саме — з

Таблиця 1. Значення характеристик складових урболандшафту

Роки	<i>K</i> , ум. од.	<i>E</i> , відн. од.	<i>A</i> , км ²	<i>B</i> , км ²	<i>C</i> , км ²	<i>T</i> , мг/м ³
1994	9.8	0.102	602.2	48.3	174.4	1.72
1995	9.95	0.101	601.8	48	177.6	1.68
1996	10	0.099	601.4	48.4	177.9	1.74
1998	10.25	0.097	600.7	47.2	178.4	2.1
1999	11	0.092	600.3	47.8	178.1	2.05
2000	11.02	0.090	598.6	48.4	175.4	2.13
2001	13.58	0.074	592.6	46.9	179.1	2.1
2002	14.3	0.069	591.2	45.2	182.7	2
2004	14.96	0.067	584.7	45.8	190.9	2.32
2005	15.06	0.066	585.1	45.6	190.1	2.4
2006	15.4	0.065	585.3	45.6	192.5	2.59
2007	15.68	0.064	584.5	45.7	194.9	2.6
2008	15.96	0.062	573.7	45.9	202.9	2.81
2009	17.98	0.056	568.6	46.4	210.9	3.0
2010	18.32	0.055	568.2	45.6	211.8	2.95
2011	18.5	0.054	567.8	45.6	217.6	3.18

рівнянь (4) в результаті нескладних перетворень були отримані системи рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів a_{ij} . Нижче приведено рівняння для знаходження коефіцієнтів впливу a_{EC} , a_{ET} , a_{EA} , a_{EB} :

$$\begin{aligned} a_{EC} + r_{CT}a_{ET} + r_{CA}a_{EA} + r_{CB}a_{EB} &= r_{EC}, \\ r_{TC}a_{EC} + a_{ET} + r_{TA}a_{EA} + r_{TB}a_{EB} &= r_{ET}, \\ r_{AC}a_{EC} + r_{AT}a_{ET} + a_{EA} + r_{AB}a_{EB} &= r_{EA}, \\ r_{BC}a_{EC} + r_{BT}a_{ET} + r_{BA}a_{EA} + a_{EB} &= r_{EB}. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогічно можуть бути одержані системи рівнянь для процесів C , T , A , B , які використовуються при знаходженні відповідних коефіцієнтів a_{is} . Необхідні для цієї мети коефіцієнти кореляції знаходяться у відповідних рядках кореляційної матриці. Для знаходження коефіцієнтів досить скористатися формулами Крамера [5].

Таким чином, після визначення всіх значень коефіцієнтів з'являється можливість на основі першого рівняння системи (5) змоделювати вплив складових урболандшафту на екологічний стан міського середовища. Для програмного моделювання вказане рівняння представлено в кінцевих різницях (8):

$$E_m = E_j + \tau(a_{EC}O_j + a_{ET}T_j + a_{EA}R_j + a_{EB}B_j - E_j), \quad (8)$$

де $E_m, E_j, C_j, T_j, A_j, B_j$ — j -ті значення процесів ($m > j$), τ — інтервал часу, протягом якого значення коефіцієнтів можна наближено вважати постійними.

Розраховані за архівними даними досліджуваних процесів коефіцієнти кореляції r_{is} у місті Києві за період з 1994 по 2011 рр. наведено у табл. 2, а коефіцієнти впливу для параметра E дорівнюють: $a_{EA} = 1.14$, $a_{EB} = 0.37$, $a_{EC} = 0.75$, $a_{ET} = -0.26$.

Моделювання екологічного стану міської території виконувалось шляхом виявлення впливу на екологічний стан міста поступової зміни кожної складової урболандшафту (зеленої зони, водойм, забудови та техногенного навантаження) на 10 % від номінального значення 1994 р. При цьому інтервал часу необхідно вибирати з урахуванням сталості коефіцієнтів впливу a_{ij} .

З рис. 2 видно, що модель адекватно реагує на зміну складових урболандшафту. Так, збільшення площі зеленої зони призводить до значного покращення екологічного стану території міста

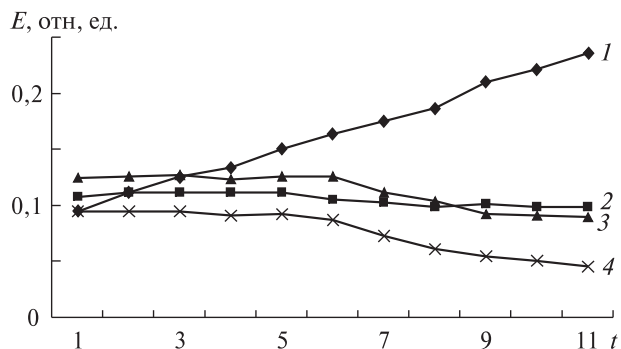


Рис. 2. Модельні залежності екологічного стану від зміни площі зеленої зони (1), водойм (2), забудови (3) та техногенного навантаження (4)

Києва, а підвищення техногенного навантаження викликає погіршення екологічного стану, зростання площі забудови і водойм незначно впливає на екологічний стан міської території.

Оскільки дані, наведені у табл. 2, здобуто на відносно обмеженому експериментальному матеріалі, для підтвердження статистично вірогідної кореляційної залежності між дослідженими величинами необхідно показати, що значення коефіцієнтів кореляції r дійсно не дорівнюють нулю для $n = 16$, де n — кількість років. З огляду на те що розподіл r повільно зводиться до нормального, дану операцію було проведено з використанням функції $U = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}$ шляхом перевірки гіпотези про рівність нулеві одержаних коефіцієнтів кореляції r для певної кількості експериментів [4]. Відсутність статистично вірогідної кореляційної залежності виявляється у випадку, коли значення функції U потрапляють в інтервал $-Z_{\alpha/2} \leq U < Z_{\alpha/2}$, де $Z_{\alpha/2}$ — обмеження по площі гауссівського розподілу по ординатах

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів кореляції r_{is}

	Е	А	В	С	Т
Е	1.0	0.97	0.91	-0.85	-0.82
А	0.97	1.0	0.89	-0.93	-0.84
В	0.91	0.89	1.0	-0.86	0.71
С	-0.85	-0.93	-0.86	1.0	0.82
Т	-0.82	-0.84	-0.71	0.82	1.0

$\pm\alpha$. Значення U для $n = 16$ років і $r = 0.71$ (найменше значення у табл. 2) дорівнює 3.19. Межі зони $-Z_{\alpha/2}$ і $Z_{\alpha/2}$ для функції U обрано при значеннях $\alpha = 0.1$ (це відповідає ймовірності 0.71). Вони дорівнюють відповідно -1.65 і $+1.65$.

Таким чином, підтверджується наявність статистично вірогідної кореляційної залежності та достовірності результатів досліджень.

ВИСНОВКИ

1. На основі системного підходу з використанням АВС-методу і космічної інформації ДЗЗ проведено системне моделювання впливу основних складових урболандшафту на екологічний стан міста Києва, яке визначило, що сформована модель адекватно реагує на збільшення обсягу складових та техногенного навантаження, яке призводить до відповідних змін екологічного стану міської території.

2. Запропонований підхід дає змогу з незначними похибками прогнозувати, виходячи з реальних умов, зміну екологічного стану міських територій під впливом різних факторів та надає відповідним службам міста можливість своєчасно реагувати на можливі наслідки.

1. Гутнов А. Э. Город как объект системного исследования // Системные исследования. — М.: Наука, 1977. — С. 212—234.
2. Екологічний паспорт Київської області. — Київ, 2011. — 94 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. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1974. — 831 с.
5. Крамер Г. Математические методы статистики. — М.: Мир, 1975. — 648 с.
6. Кучерявий В. П. Урбоекологія. — Львів: Світ, 1999. — 359 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. — К., 2004. — С. 7—14.
8. Праці Центральної геофізичної обсерваторії / Під ред. О. О. Косовця. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2009. — Вип. 5 (19). — 116 с.

9. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — 225 с.
10. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияния // Мор. гидрофиз. журн. — 2004. — № 5. — С. 53—63.
11. Федоровский А. Д., Лищенко Л. П. Ландшафтно-системный подход при оценке геоэкологической ситуации в регионе // Доп. Нац. акад. наук України. — 2003. — № 11. — С. 37—40.
12. Форрестор Д. Динамика развития города. — М.: Прогресс, 1974. — 28 с.
13. Engelen R. J., Serran 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. Version 3.1999. — April. — 120 p.

Стаття надійшла до редакції 08.04.13

А. В. Соколовская, К. Ю. Суханов, А. Д. Федоровский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЗЗ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ УРБОЛАНДШАФТА НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КИЕВ)

Обосновывается возможность использования космической информации ДЗЗ для системного моделирования изменений структуры составляющих урболандшафта на примере г. Киева, их влияния на развитие экологического состояния городской территории, путем формирования математической модели процессов, определение на основе статистических данных корреляционных связей и коэффициентов влияния составляющих урболандшафта.

А. V. Sokolovska, K. Yu. Sukhanov, O. D. Fedorovskyi

THE USE OF EARTH REMOTE SENSING INFORMATION FOR ESTIMATION OF THE URBAN LANDSCAPE INFLUENCE ON THE ECOLOGICAL CONDITION OF THE KYIV TERRITORY

We substantiate the possibility to use the Earth remote sensing space information for system simulation of changes in the structure of urban landscape components (the Kyiv city is used as an example), for the simulation of the influence of these changes on the ecological condition evolution of an urban territory. For this, a mathematical model of processes is developed and correlations and influence coefficients for urban landscape components are determined on the basis of statistical data.