

УДК 528.8.04

А. В. Соколовська, О. В. Томченко

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України



## ДОСЛІДЖЕННЯ АНТРОПОГЕННИХ ЗМІН ЕКОСИСТЕМ ЗАСОБАМИ ГІС/ДЗЗ-ТЕХНОЛОГІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМНИХ МЕТОДІВ

Дослідження та оцінка екологічного стану антропогенно змінених ландшафтів виконані засобами ГІС/ДЗЗ-технологій з використанням методів системного аналізу. В даній роботі наведені результати дешифрування багаторічних космічних зйомок з КА Landsat 5 на ділянках з різним рівнем антропогенного навантаження. Зокрема, на одній з них простежується природна тенденція до самовідновлення в наслідок тривалого невтручання людини (мілководдя верхів'я Київського водосховища), а на іншій – навпаки – посилення техногенного впливу (територія м. Київ). В роботі були використані наступні методи: системної динаміки – адаптивного балансу впливів; багатокритеріальної оптимізації; просторово-частотного аналізу; марковських моделей зображень; фрактальної геометрії. Запропоновані підходи надають змогу не лише проводити на якісно новому рівні моніторинг впливу складових ландшафту на стан території, але також з незначними похибками прогнозувати зміну екологічної ситуації та розробляти збалансований менеджмент і план дій державних служб.

**Ключові слова:** системний аналіз, метод адаптивного балансу впливів, метод багатокритеріальної оптимізації, антропогенний ландшафт

A. Sokolovska, O. Tomchenko

### THE STUDY OF ANTHROPOGENIC CHANGES IN ECOSYSTEMS ON A BASIS OF TOOLS OF GIS / RS TECHNOLOGIES USING METHODS OF SYSTEM ANALYSIS

Research and environmental state evaluation of anthropogenically altered landscapes was made on a basis of tools of GIS / RS technologies using methods of systems analysis. The image interpretation of Landsat 5 satellite imagery time series of the test areas with different stress levels was made. In particular, the natural tendency of self-regeneration is observed on the one of the test areas, as a result of prolonged human noninterference (shallow waters of upper Kiev reservoir). In contrast, the intensive anthropogenic impact is evidenced on other area (the territory of Kyiv). The following methods were used in the research: system dynamics – influences adaptive balance; multiobjective optimization, spatial-frequency analysis, Markov model images, fractal geometry. The proposed approach provides an opportunity not only to conduct a qualitatively new level of monitoring of the impact of landscape elements on the territory state, but also to predict changes in the ecological situation with minor errors and develop a sustainable management plan and public services.

**Keywords:** system analysis, methods of influences adaptive balance, methods of multiobjective optimization, antropogenous landscape

А. В. Соколовская, О. В. Томченко

### ИССЛЕДОВАНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМ СРЕДСТВАМИ ГИС / ДЗЗ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМНЫХ МЕТОДОВ

Исследование и оценка экологического состояния антропогенно измененных ландшафтов выполнены средствами ГИС/ДЗЗ-технологий с использованием методов системного анализа. В данной работе приведены итоги дешифрирования многолетних космических съемок с КА Landsat 5 на участках с разным уровнем антропогенной нагрузки. В частности, на одном из них прослеживается естественная тенденция к самовосстановлению в результате длительного невмешательства человека (мелководье верховья Киевского водохранилища), а на другом наоборот усиление техногенного воздействия (территория г. Киев). В работе были использованы следующие методы: системной динамики – адаптивного баланса влияний; многокритерияльной оптимизации; пространственно-частотного анализа, марковских моделей изображений, фрактальной геометрии. Предложенные подходы дают возможность не только проводить на качественно новом уровне мониторинг влияния составляющих ландшафта на состояние территории, но также с незначительными погрешностями прогнозировать изменение экологической ситуации и разрабатывать сбалансированный менеджмент и план действий государственных служб.

**Ключевые слова:** системный анализ, метод адаптивного баланса влияний, метод многокритерияльной оптимизации, антропогенный ландшафт

**Вступ.** Серед сучасних методів контролю екологічної ситуації найбільш ефективними є методи, що засновані на використанні геоінформаційних систем (ГІС) та даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Незважаючи на те, що за багато років експлуатації ресурсних супутників Землі накопичено значний досвід застосування ГІС і методів ДЗЗ для вирішення природогосподарчих задач, роботи з удосконалення ГІС-технологій і методів дешифрування космічних знімків (КЗ) продовжуються і в даний час. Досліджуються різні інформативні ознаки

ландшафтно-техногенних систем, розробляються нові методи дешифрування КЗ, формуються моделі потенційних кризових ситуацій тощо.

Новітні напрямки підвищення ефективності використання геоінформації передбачають не лише отримання інформації про об'єкт досліджень (дистанційної та наземної), але й самі дослідження, спрямовані на одержання повних уявлень про об'єкт і супутні процеси на основі обчислюваних характеристик. Цим обумовлена необхідність створення якісно нових системних методів використан-

ня даних ДЗЗ, що дозволяють підвищити ефективність вирішення завдань природокористування на основі комплексних досліджень екосистеми [4].

**Мета дослідження:** оцінити поступові зміни, що відбуваються в природних та урбанізованих екосистемах, використовуючи багаторічні космічні знімання супутника Landsat 5, та змоделювати різні сценарії подальшого розвитку екологічного стану території.

**Об'єкт дослідження та передумови.** Об'єктом дослідження є дві ділянки антропогенно змінених ландшафтів, на одній з яких простежується природна тенденція до самовідновлення внаслідок тривалого невтручання людини (мілководдя верхів'я Київського водосховища), а на іншій, навпаки, посилення техногенного навантаження (територія м. Київ).

Сучасний розвиток великих міст багато в чому відбувається за рахунок перетворення і більш раціонального використання внутрішньої структури без розширення меж міської території. В результаті витісняється зелена зона, відбувається ущільнення забудови території, збільшується чисельність населення і, відповідно, транспорту, що, безумовно, позначається на екологічному стані міського середовища. Площа території під забудовою у місті Київ збільшилася більш ніж на 15% від загальної площі міста за період з 1984 р. по 2011 р., безпосередньо за рахунок зменшення зелених насаджень, а також забудови прибережної зони річки Дніпро. Разом зі збільшенням площі забудови майже вдвічі збільшився загальний показник забруднення атмосферного повітря, що вказує на безпосереднє збільшення кількості автотранспорту, який є головним забруднювачем повітря (приблизно 83,4 % усіх шкідливих викидів в атмосферу). Саме ці фактори й обумовлюють вибір міста Київ в якості об'єкта дослідження.

Створення Київського водосховища в 1964 р., як і взагалі Дніпровського каскаду, поряд з позитивними результатами поставило ряд важливих екологічних проблем. В результаті створення водосховищ затоплено 694,8 тис. га земель, а прилегли до них підтоплені території (з глибиною залягання ґрунтових вод до 2 м) займають 93,5 тис. га. Найбільшу увагу привертають до себе мілководдя – ділянки акваторії з глибинами менше 2 м. На думку фахівців-гідробіологів, мілководдя повинні займати близько 20 % загальної площі водосховищ – це той необхідний мінімум, що утворює природний біофільтр між основною акваторією водосховищ і прилеглим суходолом [2]. Сучасна площа заростання верхів'я Київського водосховища становить більше 40 % та збільшилась вдвічі від 1985 р. за рахунок поширення вищої водної рослинності з домінуванням плейстофітів та гелофітів. Паралельно з цим з мілководдями пов'язані такі негативні процеси, як замулювання і заболочування, зокрема впродовж 25 років втричі зросла концентрація  $CO_2$ , що було аналізовано за даними ЦГО.

**Методи дослідження.** В якості методичної основи досліджень екологічного стану антропогенно змінених ландшафтів використовується системний підхід, що всебічно враховує взаємозв'язок процесів у складній системі, включаючи технічні, екологічні, економічні та соціальні аспекти.

Дослідження проведені з використанням наступних методів:

- системної динаміки – адаптивного балансу впливів;
- багатокритеріальної оптимізації;
- просторово-частотного аналізу, марковських моделей зображень, фрактальної геометрії.

Для обробки та інтерпретації матеріалів ДЗЗ були використанні ПК Erdas Imagine та ArcGIS. Статистичні дані щодо зміни площ досліджуваних ландшафтів отримані на основі автоматичної класифікації та розрахунку «спектральних індексів» (нормалізованого різницевого індексу рослинності  $NDVI$  та нормованого водного індексу  $NWI$ ). Автоматична класифікація виконувалася методом неконтрольованої класифікації кластерів (*Iso Cluster Unsupervised Classification*), в основі якої лежить ітеративний процес, який застосовується для обчислення мінімальної Евклідової відстані при віднесенні кожної найближчої комірки до певного кластеру.

Запропоновані методи були апробовані на обох тестових ділянках. Для прикладу детально розглянемо метод адаптивного балансу впливів - *Adaptive Balance of Causes (ABC-memog)* для оцінки екологічного стану м. Києва.

У роботі І. Е. Тімченко і Е. М. Ігумнової показано можливість застосування для моделювання природних процесів методу АВС, який заснований на врахуванні ієрархії та причинно-наслідкових зв'язків між модулями складної системи на основі системної динаміки Д. Форрестера [6]. АВС-метод передбачає, що модулі системи знаходяться в стані динамічної рівноваги, підтримуваної функціями впливу, які пов'язують даний модуль з іншими модулями системи. При управлінні зовнішньої дії на систему всередині неї зберігається режим динамічного балансу впливів [1].

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

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

Рівняння (1) стає найбільш простим у разі вибору базової функції впливів  $F^{(+)}$  у формі параболи, що асимптотично наближається до одиниці [5]. При цьому рівняння стає лінійним і набуває вигляду:

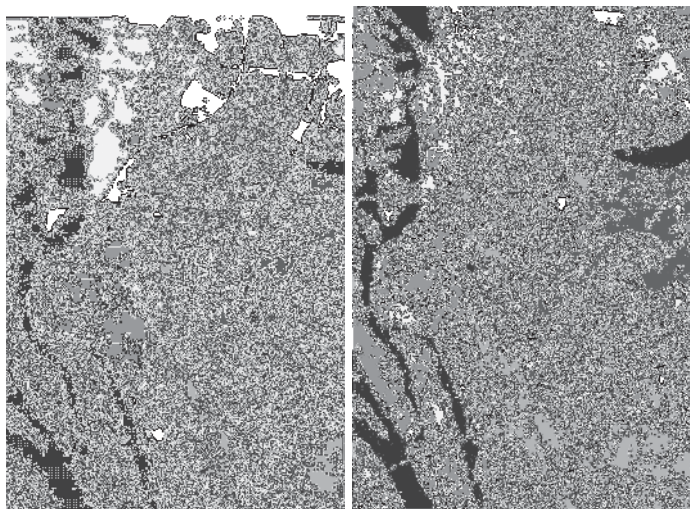
$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{i,i-1}x_{i-1} + a_{i,i+1}x_{i+1} + \dots + a_{in}x_n - x_i \quad (2)$$

де  $t$  – часовий або просторовий аргумент процесу.

Надаючи індексу  $i$  в останньому рівнянні значення 1, 2, ...  $n$ , при дотриманні умови (2) одержимо систему рівнянь математичної моделі, яку будемо використовувати в подальшому [3].

У даній роботі для моделювання складних систем на основі викладеної вище теорії було використано програму, розроблену у Центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України.

**Результати досліджень.** На основі дешифрування і аналізу космічних зображень міста Київ за період 1994–2011 рр. було отримано основні складові урболандшафту, вплив яких на екологічний стан міської території досліджується далі, а саме: забудова (С), зелена зона (А), водні об'єкти (В) і техногенне навантаження (Т), значення яких приведені в табл. 1.



а) Landsat 5 TM, 1994 рік      б) Landsat 5 TM, 2010 рік

Таблиця 1

**Результати обчислення площ складових урболандшафту (км<sup>2</sup>), чисельних оцінок екологічного стану Е в умовних одиницях та техногенне навантаження (мг/м<sup>3</sup>).**

Роки	К (ум. од)	Е (відн. од)	А (км <sup>2</sup> )	В (км <sup>2</sup> )	С (км <sup>2</sup> )	Т (мг/м <sup>3</sup> )
1994	9,80	0,102	602,2	48,3	174,4	1,72
1996	10,00	0,099	601,4	48,4	177,9	1,74
1998	10,25	0,097	600,7	47,2	178,4	2,10
2000	11,02	0,090	598,6	48,4	175,4	2,13
2002	14,30	0,069	591,2	45,2	182,7	2,00
2004	14,96	0,067	584,7	45,8	190,9	2,32
2006	15,40	0,065	585,3	45,6	192,5	2,59
2008	15,96	0,062	573,7	45,9	202,9	2,81
2010	18,32	0,055	568,2	45,6	211,8	2,95
2011	18,50	0,054	567,8	45,6	217,6	3,18

Екологічний стан міста був оцінений на основі комплексного індексу забруднення атмосфери (К), значення якого були отримані наземною оцінкою екологічного стану за матеріалами ЦГО. При цьому в якості критерію оцінки екологічного стану міста використовувалося відношення  $E = 1/K$  (у. о.). В якості техногенного навантаження використовувалося значення концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері, які були отримані сенсором AIRS KA Aqua за період з 2002 по 2009 рр. За відсутні роки використовувалося значення загазованості атмосфери міста газом СО на основі даних ЦГО. При цьому коефіцієнт кореляції супутникових і наземних вимірювань складав близько 0,9.

На рис. 1, як приклад, представлені два фрагменти зображень міста Київ, отримані в результаті дешифрування космічних знімків за 1994 і 2010 роки. Зіставлення наведених зображень дозволяє побачити істотні розходження в розмірах 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 (1).

Рис. 1. Фрагменти зображень міста Київ, отримані в результаті дешифрування космічних знімків за 1994 р. (а) і 2010 р. (б)

Моделювання екологічного стану міської території за досліджуваний період виконувалося шляхом виявлення впливу на екологічний стан міста змін кожної складової урболандшафту на 10%: зеленої зони, водойм, забудови та техногенного навантаження. Результати моделювання приведені на рис. 2.

З графіків (рис. 2) видно, що модель адекватно реагує на зміну складових урболандшафту. Так, підвищення техногенного навантаження викликає значне погіршення екологічного стану. Зростання площ забудови впливає в меншій мірі, а збільшення площ зеленої зони і водойм приводить до значного покращення екологічного стану території міста Київ.

Описана методика була використана як для урбанізованої території, так і для самовідновлюваної екосистеми верхів'я Київського водосховища. Отримані результати доводять ефективність системного аналізу для вивчення екологічного стану різних типів антропогенних ландшафтів.

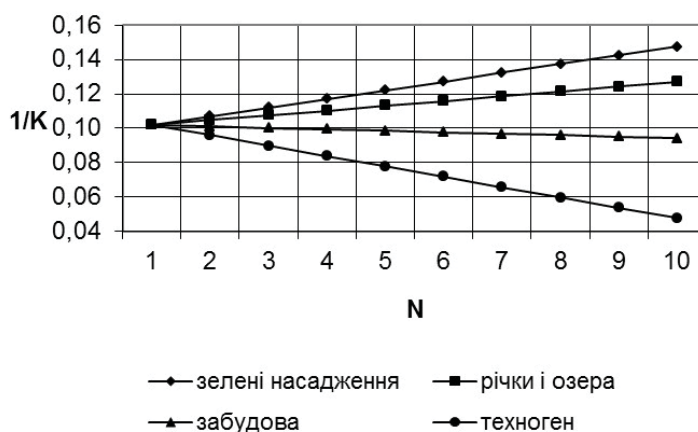


Рис. 2. Результати моделювання змін екологічного стану в залежності від зміни площ зеленої зони, водойм та забудови техногенного навантаження

**Висновки.** Розглянуті методи системного підходу до дослідження антропогенних змін екосистеми на основі даних ДЗЗ дозволяють розширити функціональні можливості космічного геомоніторингу і тим самим підвищити його ефективність.

На основі системного підходу з використанням АВС-методу і даних ДЗЗ проведено системне моделювання впливу основних складових урболандшафту на екологічний стан міста Київ, яке визначило, що сформована модель адекватно реагує на збільшення обсягу техногенного навантаження ( $T$ ) та інших складових ( $A$ ,  $C$ ,  $B$ ), яке призводить до відповідних змін екологічного стану ( $E$ ) міської території.

Запропоновані підходи дають змогу не лише проводити на якісно новому рівні моніторинг впливу складових урболандшафту, але також з незначними похибками прогнозувати, виходячи із реальних умов, зміну екологічного стану територій та розробляти збалансований менеджмент і план дій державних служб.

Рецензент – доктор геологічних наук  
О. І. Сахацький

### Література:

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування. / [В. І. Лялько, О. Д. Федоровський, М. О. Попов та ін.] – К.: Наукова думка, 2006. – 352 с.
2. Даргейко Л. Ф. Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли / Л. Ф. Даргейко, В. П. Зубко, А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук // Космична наука і технологія. – 2001. – Т 7. № 5-6. – С. 75-79.
3. Згуровский М. З. Системный анализ / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова. – К.: Наукова думка, 2005. – 743 с.
4. Зеров К. К. Формирование растительности и зарастание водохранилищ Днепровского каскада. – К.: Наукова думка, 1976. – 142 с.
5. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 831 с.
6. Forrester J. W. Principles of Systems. Cambridge MA, Productivity Press / J. W. Forrester, 1968. – 320 pp.

УДК 004.418:528.94

**В. П. Ткаченко, М. І. Губа, В. Д. Овраменко, О. П. Зелений**  
Харківський національний університет радіоелектроніки



## ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ СТВОРЕННЯ МІСЬКИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ З ВІДКРИТИМ КОДОМ

Розглядаються концептуальні засади створення інструментальних засобів міської геоінформаційної системи (МГІС) на базі програмних продуктів з відкритим кодом. Наводиться організаційно-технічна структура МГІС, основні положення її концептуальної архітектури, функції інструментальних модулів та засоби їх реалізації.

**Ключові слова:** міська геоінформаційна система, програмні продукти з відкритим кодом

W. Tkachenko, N. Guba, W. Owrmenko, A. Zeleny

### TOOLS CREATION OF URBAN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS BASED ON SOFTWARE AND OPEN SOURCE

Conceptual principles of the creating instrumental base of the urban Geographic Information System (MGIS) based program products with open source are considered. Provides organizational and technical structure of MGIS the main provisions of her conceptual architecture, function development software modules and tools for their implementation.

**Keywords:** urban geographic information systems, software and open source