

Использование космической информации для оценки состояния городских территорий (на примере города Киева)

А.В. Соколовская

Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины

Киев, Украина

E-mail: AVSokolovska@i.ua, ania1331@rambler.ru

Методика данной работы ориентирована на использование космических снимков и наземных данных, а также системного подхода, современных методов моделирования и количественного анализа сложных систем, возможностей современных информационных и компьютерных технологий для решения задач комплексной оценки состояния городских территорий.

Обосновывается возможность использования космической информации ДЗЗ для мониторинга антропогенно измененных территорий и оценки состояния окружающей их среды. Приводятся результаты использования системных методов для оценки и моделирования экологического состояния городской территории. При этом используются следующие методы: метод мультифрактального анализа - для исследования вариабельности составляющих городской территории; метод многокритериальной оптимизации - для интегральной оценки и определения связи многокритериальной функции соответствия со статистическими оценками экологического состояния городской территории; системное моделирование - для сравнительной оценки влияния составляющих урболандшафта и техногенной нагрузки на состояние городской среды.

Перспективность использования космической информации ДЗЗ в комплексе с рассмотренными методами заключается в возможности интегральных оценок, моделировании и прогнозе устойчивого развития городских агломераций с учетом экологических факторов.

Ключевые слова: космическая информация, системный анализ, урбанизированные территории, составляющие урболандшафта, экологическое состояние городских территорий.

Введение

Современное экологическое состояние городов требует постоянного совершенствования методов контроля и оценки экологических последствий урбанизации и влияния техногенных факторов. Для разработки мер по снижению последствий техногенного воздействия необходимо создание оперативных и текущих методов контроля и прогноза развития экологического состояния городов. Среди существующих современных методов получения информации наиболее оперативным является космическое дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Полученная, таким образом, информация позволяет не только вести непрерывный мониторинг городских территорий и контролировать потенциально опасные участки, но и создавать базы разновременных космических снимков, служащих основой для статистических исследований, моделирования, оценки и прогнозирования состояния городских территорий (Лялько и др., 2004).

Целью данной работы является исследование, на примере материалов космического мониторинга территории г. Киева с 1984 по 2013 гг., динамики изменений структуры составляющих городских урболандшафтов и оценки их влияния на экологическое состояние городской территории.

Исходные положения

По официальным данным (Звіт про стан..., 2011), площадь Киева составляет 835,6 км², которая разделена на 10 административных районов. К городской территории включены довольно большие лесные массивы, расположенные за пределами городской застройки. Большую площадь занимают также многочисленные парки и скверы. Однако вырубка в течение последнего десятилетия деревьев в зеленой зоне и придомовых территориях для жилищной застройки значительно уменьшает площадь зеленых насаждений. Кроме лесов, на климатические и экологические особенности Киева влияет наличие реки Днепр, озер и прудов, их площадь в пределах города составляет 47 км², но в разное время года, а также на протяжении нескольких лет площадь открытого водного зеркала варьируется в пределах от 5% до 7% от всей площади города, в связи с зарастанием водной растительностью.

Основными веществами, загрязняющими атмосферный воздух, являются транспортные и промышленные выбросы: оксид углерода, соединения азота, диоксид и др. На их долю приходится более 96,9% от общего количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух города (Екологічний паспорт..., 2011).

Для дешифрирования и исследований были выбраны и обработаны 24 снимка со спутников «Landsat 7/ETM +», «Landsat 5 TM», «Landsat 8» за 1984 по 2013 гг., на которых отсутствует облачность. Использованные в работе значения концентрации CO₂ в атмосфере были получены сенсором AIRS космического аппарата Aqua (Joye, 2007) и спутником GOSAT (Global Greenhouse Gas Observation by Satellite) (сайт NIES. Database of the GOSAT). При отсутствии космической информации за отдельные годы использовались данные наземных измерений.

На *рис. 1*, в качестве примера, представлено ряд космических снимков г. Киева, которые использовались для дальнейшего дешифрирования, и выделения составляющих урболандшафта. Сопоставление приведенных изображений позволяет увидеть существенные изменения произошедшие за истекший период в структуре составляющих городской территории.

Исходя из параметров перечисленных космических снимков, для дальнейших исследований были выбраны следующие основные составляющие урболандшафта: зеленые насаждения, территория под застройкой и дорогами, общая площадь растительности, хвойный лес, лиственный лес, водное зеркало, пустыри и содержание в атмосфере CO₂, концентрация которого частично отражало техногенную нагрузку.

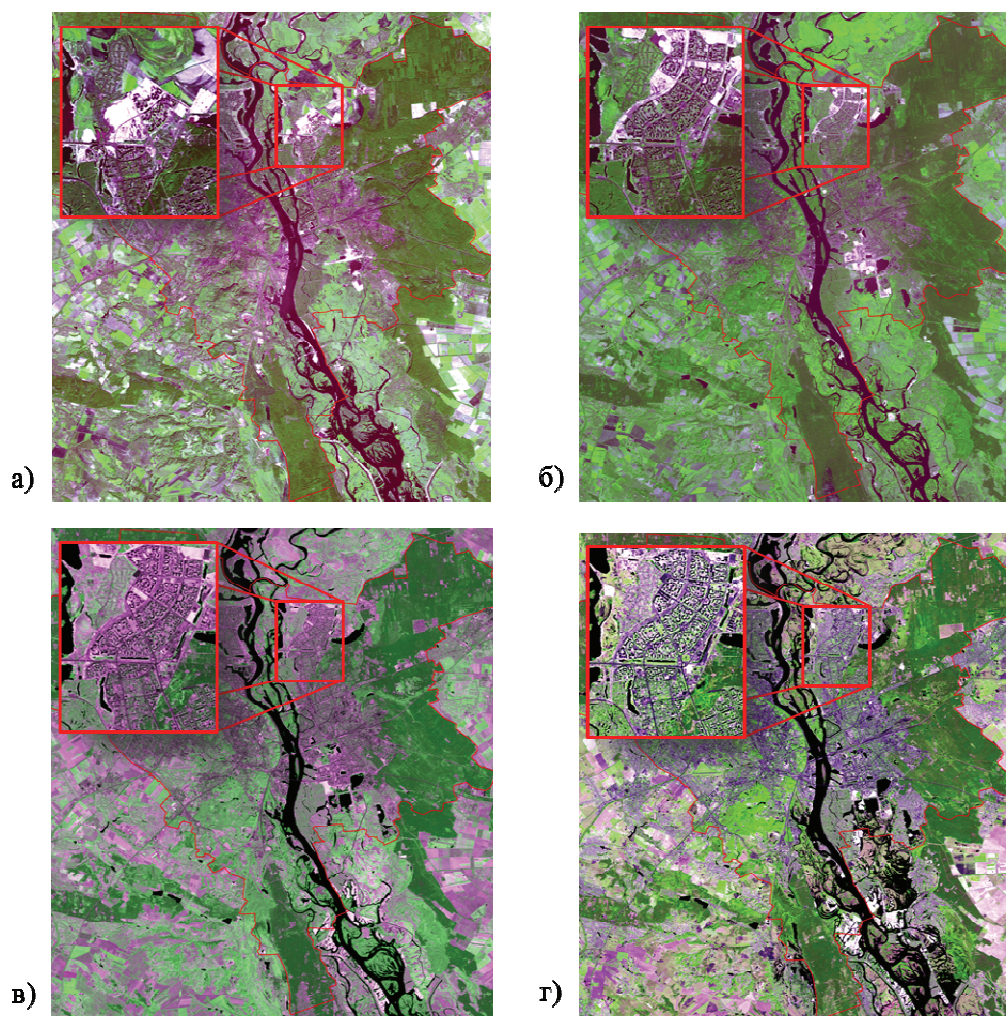


Рис. 1. Космические снимки КА Landsat с изображением территории г. Киева за период: а) 25.10.1984; б) 19.09.1994; в) 31.07.2005; г) 01.06.2013

Методы исследований

Для обработки и интерпретации материалов дистанционного зондирования были использованы программные комплексы Erdas Imagine и ArcGIS., которые имеют развитый инструментарий пространственного анализа. Для более точной обработки и классификации космических снимков применялось совместное использование автоматической классификации и "спектральных индексов", полученных на основе вычислений соотношений яркостей изображений в соответствующих спектральных диапазонах.

На первом этапе дешифрирования была выполнена контролируемая классификация с помощью алгоритма «нейронных сетей» с обучающими выборками, а также неконтролируемая классификация кластеров одного и того же снимка Landsat 5 TM за 1984 г. Результаты показали 91% соответствия распознавания составляющих, что является допустимым условием в данном исследовании. Все последующие снимки были проклассифицированы методом неконтролируемой классификации кластеров (Iso Cluster Unsupervised

Classification). Также для повышения точности распознавания учитывались текстурные признаки, которые рассчитывались в программном продукте ENVI.

При расчете "спектральных индексов" был использован нормализованный разностный индекс растительности NDVI, который является показателем количества биомассы (Ермошин, 2009).

Значения составляющих урболандшафта, полученные в результате дешифрирования космических снимков и выполненные расчеты приведены в *табл.*

Вариабельность (изменчивость) различных составляющих урболандшафта за исследуемый период определялась на основе представления городской территории как самоподобную иерархическую, т.е. фрактальную структуру, состоящую из повторяющихся на разных структурных уровнях составляющих урболандшафта (Бабич и др., 2009).

Таблица. Результаты дешифрирования космических снимков и расчетов

<i>Год</i>	<i>E</i>	<i>CO₂</i>	<i>Общая площадь расти- тельного покрова</i>	<i>Терри- тория под за- строй- кой, до- рогами</i>	<i>Пустыри и строи- тельные участки</i>	<i>Площадь водного зеркала</i>	<i>Функция F</i>
	ус. ед.	мг/дм ³	км ²	км ²	шт.	км ²	ус. ед.
1984	-	-	618,5	161,6	895	50,6	0,992
1986	-	-	613,2	162,4	931	50,2	1,007
1988	-	-	607	167	1012	51,1	1
1990	1,247	357	603,4	161,6	1045	50,9	0,923
1992	1,189	360	603,1	165,4	1034	49,8	0,913
1994	1	363	602,2	174,4	1184	48,3	0,881
1996	0,93	366	601,4	177,9	1107	48,4	0,885
1998	1,16	369	600,7	178,4	1156	47,2	0,886
2000	1,13	373	598,6	175,4	994	48,4	0,866
2002	0,82	376	591,2	182,7	1069	45,2	0,872
2004	0,92	379	584,7	190,9	1204	45,8	0,874
2006	0,79	382	585,3	192,5	1098	45,6	0,867
2008	0,63	384	573,7	202,9	1005	45,9	0,859
2010	0,54	388	568,2	211,8	1003	45,6	0,846
2012	0,44	391	566,4	213,8	1046	45,45	0,849
2013	0,39	393	565,01	215,03	1123	45,49	0,846

При этом использовалась обобщенная статистическая сумма Zq , которая позволяет отличать неравномерные распределения составляющих от равномерных (Joye, 2007).

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

где N - общий объем выборки (общее количество составляющих на выбранной площади);

N_i - количество i -того типа составляющих в выбранной площади N ;

n - количество всех типов составляющих, число которых зависит от N ;

p_i - вероятность принадлежности данного типа составляющей в выборке к i -ой категории;

q - степень момента (статистической суммы), которая принимает целочисленные значения.

В выражении (1) показано, что условием статистического самоподобия (мультифрактала) является мера, которая пропорциональна размеру выборки в степени $\tau(q)$. Или линейной зависимостью в логарифмическом масштабе: $\log[Z_q(N, q)] = \tau(q) \log N$,

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

Для определения вариабельности различных составляющих и оценки степени отклонения их от равномерного распределения использовались обобщенные мультифрактальные размерности:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1 - q} \quad \text{при } q \neq 1. \quad (3)$$

Функция D_q , показывает насколько неоднородно распределение составляющих урболандшафта по типам и насколько это распределение отличается от равномерного. Функция D_q , носит название спектра обобщенных размерностей Реньи мультифрактала (Sala N., 2000). При $q \rightarrow +\infty$ основной вклад вносят составляющие с наибольшими значениями p_i , а при $q \rightarrow -\infty$ с малыми значениями p_i , редкие типы составляющих. На практике ограничиваются рассмотрением порядка десятка значений целых чисел q , что и принято в данной работе.

Для интегральной оценки составляющих урболандшафта, включая техногенную нагрузку, были использованы алгоритмы метода многокритериальной оптимизации, которые состоят из следующих этапов (Кофф и др., 2006): введение функции близости сравниваемых величин a и b , вычисления оценки для функции близости - S и функции соответствия - F . Последняя описывает степень совпадения значений сравниваемых величин.

$$F(B, A) = \sum_{j=1}^n \rho(b_j, a_j) \cdot [1 - S(b_j, a_j)], \quad (4)$$

где: $\rho(b_j, a_j)$ - весовые коэффициенты, $j = 1 - n$.

Близость значения параметра a к параметру b определяется с помощью функции близости - $S_j(b_j, a_j)$ для следующих случаев:

$$S_j(b_j) = (\bar{a}_j - b_j) / \bar{a}_j,$$

для составляющих, которые улучшают состояние окружающей среды;

$$S_j(b_j) = (b_j - \bar{a}_j) / b_j, \quad (5)$$

для составляющих, которые ухудшают состояние окружающей среды.

Тогда классификация процессов или объектов может быть формализована как задача многокритериальной оптимизации m критериев, каждый из которых выступает как функция соответствия характеристики b параметра a .

Развитие состояния городских территорий можно прогнозировать как адаптацию будущей структуры составляющих к уже известной из предшествующих наблюдений методом имитационного моделирования. Этот метод основан на представлении исследуемой системы как совокупности потоков и накопителей, построении причинно-следственных связей одних параметров с другими, создания моделей и последующего моделирования (Тимченко и др., 1974).

В рассматриваемой задаче основой для формирования модели служит уравнение, полученное из условия, что каждый из процессов может быть выражен линейной комбинацией остальных процессов

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{is}x_s + \dots + a_{in}x_n - x_i, \quad (6)$$

где: x_i – исследуемый процесс; $x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_n$ – взаимосвязанные процессы, которые влияют на x_i ; a_{is} – коэффициенты уравнений модели, учитывающие влияние процесса s на процесс i и сохраняющие постоянные значения на выбранном интервале времени.

Определение коэффициентов a_{li} является важным этапом формирования модели. Обладая данными предыдущих исследований можно дать оценку коэффициентов на основе статистических данных. С этой целью используются элементы корреляционной матрицы исследуемых составляющих, что позволяет исключить определение коэффициентов эвристически. Кроме того, упрощается построение уравнений модели, которые в этом случае имеют унифицированную форму.

Результаты исследований

Оценка динамики вариабельности структуры составляющих урболандшафта с 1984–2013 гг. (табл.) выполнялась на основе индексов вариабельности обобщенных размерно-

стей Реньи, как интегральных оценок. В рассматриваемом аспекте индексы позволяют оценить динамику изменчивости структуры составляющих городских территорий и дать им объективную оценку. Существование мультифрактальной структуры составляющих урбандошфта устанавливалось проверкой выполнения 2-х условий: во-первых, степенной зависимостью роста компонентов мультифрактальной меры Z_q от размера выборки N и, во-вторых, не растущим видом функции спектра обобщенных размерностей $D(q)$.

Для оценки наличия степенной зависимости были выполнены вычисления статистических сумм Z_q для четырех выборок: I, II, III и IV (рис. 2). Наличие степенных зависимостей между размерами выборок и компонентами мультифрактальной меры обеспечивают масштабную инвариантность (Мандельброт, 2010).

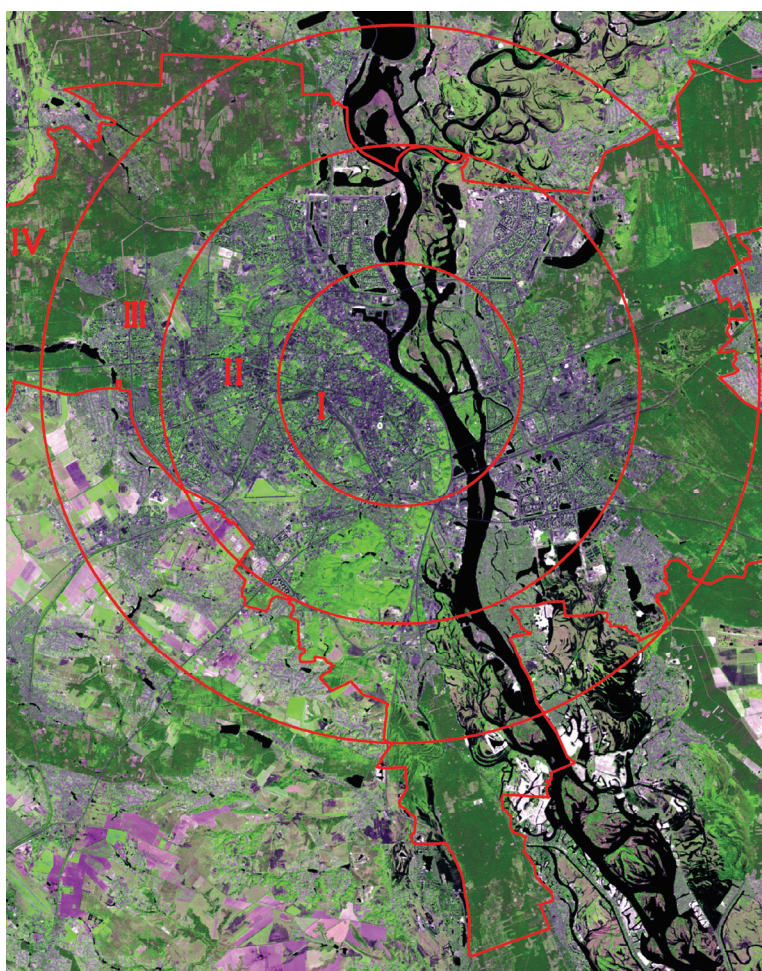


Рис. 2. Космический снимок КА Landsat 8, г. Киев, 2013 год

По соотношениям (1) и (2) определяется распределение вероятностей p_i , статистической суммы Z_q и значений $\tau(q)$ по типам составляющих за весь исследуемый период 1984–2013 гг.

Результаты расчета значений индексов D_q , $q \in [-7, 7]$, вычисленные по соотношению (3), представлены на рис. 3 в виде интегральных оценок вариабельности структуры

составляющих за период 1986–2011 гг. Полученные зависимости демонстрируют существенные изменения структуры составляющих урболандшафта за период с 1984 по 2013 гг.

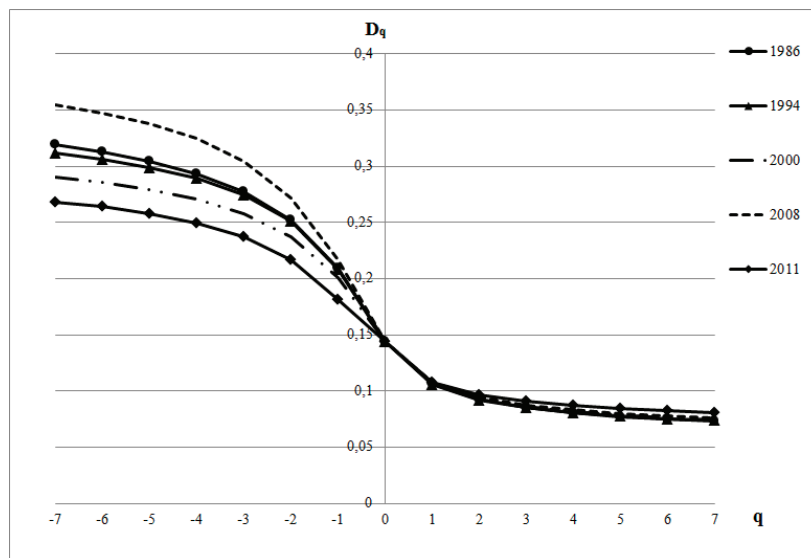


Рис. 3. График функции D_q , $q \in [-7, 7]$ за 1986 – 2013 гг.

Вычисление интегральных оценок (функции соответствия F) для составляющих урболандшафта городской территории (табл.) выполнялось за каждый год исследований на основе уравнения (4) относительно их состояния в 1988 г. Результаты вычислений приведены в табл. и представлены графически на рис. 4.

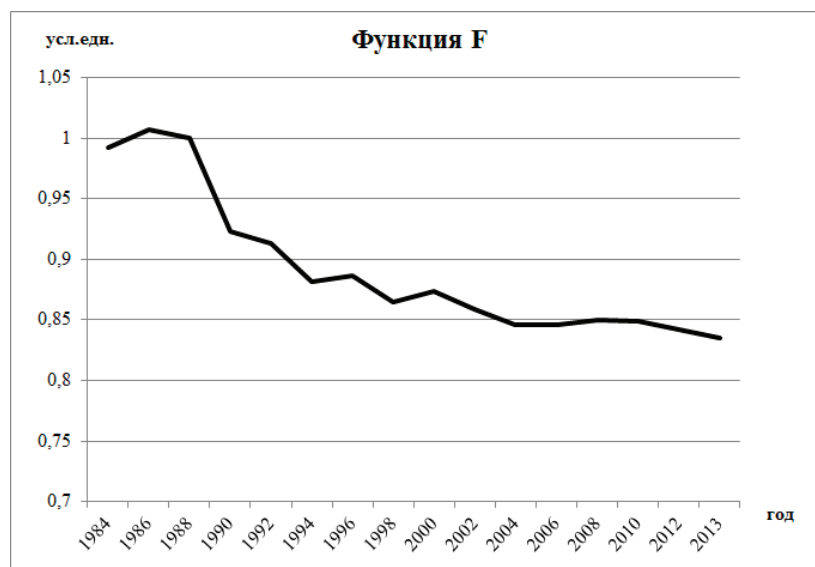


Рис. 4. Результат вычисления функции F в условных единицах.

На следующем этапе определялась связь критерия F с относительными оценками экологического состояния городской территории E (табл.), полученными Центральной геофизической обсерваторией г. Киева по наземным измерениям (Косовец и др., 2010). При этом в качестве критерия оценки экологического состояния города использовались

отношения $E=1/K$, где K – комплексный индекс загрязнения атмосферы в условных единицах.

В результате вычислений был получен коэффициент корреляции между значениями функции F и значениями экологического состояния E равный 0,87. В связи с этим тенденцию уменьшения значения F (рис. 4) можно объяснить, как отражение изменения экологического состояния в городе за исследуемый период.

Для оценки влияния составляющих урболандшафта и техногенной нагрузки на экологическое состояние городской среды было выполнено системное моделирование влияния каждой составляющей в отдельности путем поэтапного их изменения на 10% от начального состояния (1994 г.). Результаты моделирования представлены на рис. 5.

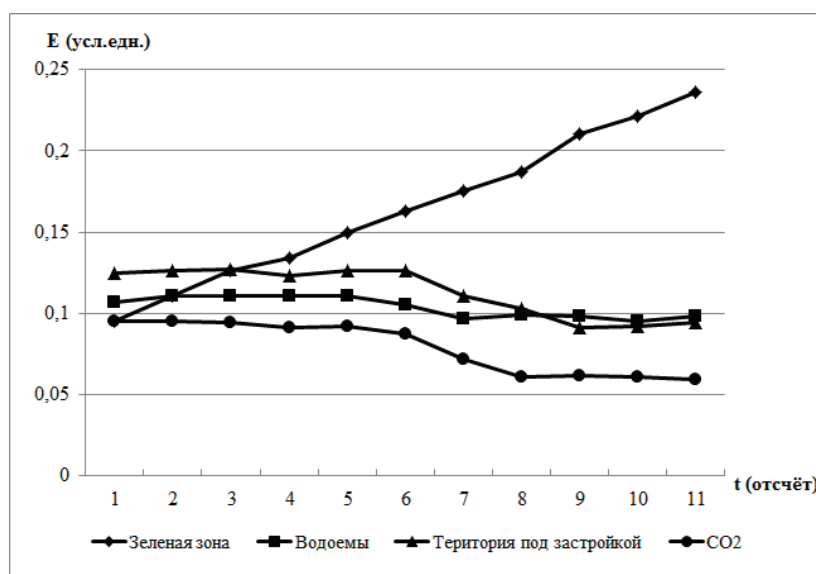


Рис. 5. Результаты моделирования изменений экологического состояния при изменении площадей составляющих урболандшафта и техногенной нагрузки.

Из графиков видно, что модель адекватно реагирует на изменение составляющих урболандшафта и техногенной нагрузки. Так увеличение площадей зеленой зоны приводит к значительному улучшению экологического состояния городской территории, а повышение техногенной нагрузки вызывает ухудшение экологического состояния. Увеличение площадей застройки незначительно влияет на состояние окружающей среды города.

Выводы

На примере исследования территории г. Киева обоснована возможность использования информации космического геомониторинга для интегральной оценки изменений структуры составляющих урболандшафта. Из рассмотрения графика (рис. 3) можно сделать вывод, что максимальная вариабельность составляющих за анализируемый период

времени проявляется при отрицательных значениях q индексов D_q . Эти значения фрактальных индексов характеризуют поведение наиболее редких типов составляющих. Из этого следует, что наибольшему изменению со временем подвержены такие малочисленные составляющие урболандшафта, как пустыри и территории, отведенные под строительство. Изменения же во всей группе индексов с положительными значениями q за анализируемый период крайне незначительны.

В результате оценки корреляционной связи функции соответствия F с наземной оценкой экологического состояния городской территории был получен коэффициент корреляции порядка 0,87, что приемлемо для практического использования при оперативном контроле экологического состояния городских территорий на основе вычисления функции F по данным космического геомониторинга.

Выполнено системное моделирование влияния каждой составляющей урболандшафта и техногенной нагрузки на экологическое состояние городской среды.

Перспективность использования космической информации ДЗЗ в комплексе с рассмотренными методами заключается в возможности интегральных оценок, моделировании и прогнозе устойчивого развития городских агломераций с учетом экологических факторов.

Литература

1. Бабич В. Н., Колясников В. А. Фрактальные структуры в планировке и застройке города // Академический вестник Урал НИИ проект РААСН. 2009. № 2. С. 45–47.
2. Ермошин И.С. Современные средства автоматизированного дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт // ARCREVIEW. 2009. №1. С.12–13.
3. Лялько В.И., Федоровский А.Д., Попов М.А. Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем // Космічні дослідження в Україні 2002-2004. Київ. 2004. С. 7–14.
4. Кофф Г. Л., Лихачёва Э. А., Тимофеев Д. А.. Методология и методы оценки состояния городской среды. М.: Медиа-пресс, 2006. 200 с.
5. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.- Ижевск, 2010. 215 с.
6. Тимченко И.Е. Игумнова ЕМ. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // Морской гидрофизический журнал. 2004. №5. С. 53–63.
7. Форрестер Д. Динамика развития города. М.: Прогресс. 1974. 28 с.
8. Екологічний паспорт Київської області / Державного управління охорони навколишнього природного середовища в Київській області. Київ, 2006-2012. С. 154
9. Звіт про стан навколишнього природного середовища в місті Києві у 2010р./ Державне управління екології та природних ресурсів в м. Києві. Київ, 2011. С.122.
10. Праці Центральної геофізичної обсерваторії // за ред. Косовець О.О. та інш. К.: Інтерпрес ЛТД. 2003–2012. 116 с.
11. Engelen, R.J., Serrar, S., Chevallier, F. Four Dimensional Data Assimilation of Atmospheric CO₂ using AIRS Observations // Journal of Geophysical Research. 2009. P. 145–159.
12. Joye Y. Fractal Architecture Could Be Good for You // Nexus Network Journal. Vol. 9. No. 2. 2007. P. 311–320.
13. NIES. Database of the GOSAT project. Courtesy JAXA/NIES/MOE. 2013. <https://data.gosat.nies.go.jp>.
14. Sala N. Chaos and Fractals in Arts and Architecture // International Journal of Chaos and Applications. 2000. P. 95–114.

Using satellite remote sensing data to assess the status of urban areas (by example of the city of Kiev)

A. Sokolovska

*Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, Institute of Geological Science,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
E-mail: AVSokolovska@i.ua, ania1331@rambler.ru*

This technique focuses on the use of satellite images and ground-based data and a systematic approach, modern methods of modeling and quantitative analysis of complex systems, the capabilities of modern information and computer technology for solving complex assessment of urban areas.

The possibility to use space remote sensing data for monitoring anthropogenically changed areas and for environment state estimation is proved. The Kiev city is used as an example. The results of using system methods for estimation and simulation of an urban area environment state are presented.

The following methods are used:

- multifractal analysis methods to assess the variability of urban area components;
- multicriteria optimization methods for integral estimation of the urban area environment state and for evaluation of the relationship of multicriteria conformity function with statistical estimations of the urban area environment state;
- system simulation for comparative evaluation of urbo-landscape components effects and technogenic stresses effects on the urban area environment state.

The potential of using space remote sensing data in conjunction with the methods described above consists in the possibility to obtain integral estimates, simulate and forecast sustainable development of urban agglomerations taking into account ecological factors.

Keywords: satellite data, system analysis, urban territory, urbolandscape elements, environmental condition of urban territory.

References

1. Babich V. N., Kolyasnikov V. A. Fraktal'nye struktury v planirovke i zastroyke goroda (Fractal structures in planning and building of a city), *Akademicheskii vestnik Ural NII proekt RAASN*, No. 2, 2009, pp. 45–47.
2. Ermoshin I.S. Sovremennye sredstva avtomatizirovannogo deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov i ikh ispol'zovanie v protses se sozdaniya i obnovleniya kart (Modern computer-aided interpretation of satellite images and their use in the process of creating and updating of maps), *ARCREVIEW*, No. 1, 2009, pp. 12–13.
3. Lyal'ko V.I., Fedorovskii A.D., Popov M.A. Ispol'zovanie dannykh sputnikovoi s"emki dlya izucheniya prirodnoresursnykh problem (Using satellite data for the study of natural resource problems), In: *Kosmichni doslidzhennja v Ukraini 2002–2004* (Space achievements in . Ukraine 2002–2004), Kiev, 2004, pp. 7–14.
4. Koff G.L., Likhacheva E.A., Timofeev D.A. *Metodologiya i metody otsenki sostoyaniya gorodskoi sredy* (Methodology and methods of assessing the state of the urban environment), Moscow: Media-press, 2006, 200 p.
5. Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*, Moscow - Izhevsk, 2010, 215 p.
6. Timchenko I.E. Igumnova E.M. Prognozirovanie prirodnykh protsessov metodom adaptivnogo balansu vliyani (Forecasting of natural processes by adaptive balance influences), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, No.5, 2004, pp. 53–63.
7. Forrester D. *The dynamics of the city development*, Moscow: Progress, 1974, 28 p.
8. *Ekologichnii pasport Kiivs'koi oblasti*, Kiev, 2006–2012, 154 p.
9. *Zvit pro stan navkolishn'ogo prirodnogo seredovishcha v misti Kievi u 2010 r.*, Kyiv, 2011. 122 p.
10. *Pratsi Tsentral'noi geofizichnoi observatorui*, Kyiv: Interpres LTD. 2003-2012, 116 p.
11. Engelen R.J., Serrar S., Chevallier F., Four Dimensional Data Assimilation of Atmospheric CO₂ using AIRS Observations, *Journal of Geophysical Research*, 2009, pp. 145–159.
12. Joye Y., Fractal Architecture Could Be Good for You, *Nexus Network Journal*. Vol. 9, No. 2, 2007, pp. 311–320.
13. <https://data.gosat.nies.go.jp/> (2013)
14. Sala N., Chaos and Fractals in Arts and Architecture, *International Journal of Chaos and Applications*, 2000, pp. 95–114.