

СИСТЕМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ МІСТА КИЄВА НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ КОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ І НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

А.В. СОКОЛОВСЬКА, О.В. НІКІТЕНКО, О.Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ

Обґрунтовано можливість використання моделі системної динаміки розвитку міста Форрестера-Грехема для оцінки стану довкілля міста Києва. Розроблено модифіковану імітаційну модель, яка включає в себе можливості асиміляції космічної інформації дистанційного зондування Землі та відображає динаміку змін структури складових урболандшафту та деяких еколого-соціальних факторів, а саме: території під житловою забудовою, дороги, загальну площу рослинного покриву, пустирі та будівельні майданчики, чисельність промислово-торгівельних підприємств, емісію парникових газів, площу водного дзеркала, щільність забудови, чисельність населення. На її основі було визначено інтегральну оцінку екологічного стану міста Києва за період з 1994 по 2013 рік та дано прогноз до 2025 року. Отриману модель можна використовувати як наукову основу під час обґрунтування й формування методик для комплексного оцінювання стану довкілля міських територій з використанням космічної інформації дистанційного зондування Землі.

ВСТУП

Існують різноманітні підходи, що дозволяють виконувати системне моделювання різних сценаріїв розвитку міських територій на відповідних рівнях дослідження: екологічному, соціальному та економічному. Для цього створюють моделі, які включають визначення, аналіз та наслідки взаємодії одночасно усієї сукупності урболандшафтних, геоландшафтних, техногенних та деяких соціальних факторів на стан міських агломерацій. Важливим при цьому є визначення характеру взаємовпливу та взаємозалежності складових урболандшафту та соціальних факторів, які дозволяють виділити зони з різним ступенем техногенно-екологічної небезпеки, розробити прогноз їх змін та обґрунтувати шляхи мінімізації їх шкідливого впливу [1].

Для отримання оперативної інформації, яку буде використано у подальшому моделюванні й оцінці стану довкілля міських територій, найбільш перспективним є космічний геомоніторинг [2]. За допомогою космічних знімків дистанційного зондування Землі (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.

Незважаючи на великий обсяг робіт, що присвячені цій темі, проблема наукового обґрунтування оцінки й прогнозу стану довкілля міських агломе-

рацій з використанням інформації ДЗЗ ще достатньо не опрацьована. У зв'язку з цим є актуальною розробка комплексної оцінки і прогнозу сталого розвитку довкілля міських територій на основі статистичних даних космічних і наземних спостережень, системного моделювання та багатокритеріального аналізу складових урболандшафта.

Мета роботи — системне моделювання стану довкілля м. Києва на основі модифікації моделі системної динаміки розвитку міста Форрестера-Грехема [3], шляхом асиміляції космічної інформації ДЗЗ, обчислення функції інтегральної оцінки екологічного стану F та дослідження динаміки змін структури складових урболандшафта міста (включно деякі еколого-соціальні фактори) за період з 1994 по 2013 рік і прогнозу до 2025 року.

ДЖЕРЕЛА ДАНИХ

Під час дослідження було використано дані із супутників «Landsat 5 TM», «Landsat 7/ETM+» та «Landsat 8», а саме обрано та опрацьовано 18 знімків міста Києва за період з 1994 по 2013 рік, на яких над досліджуваною територією відсутня хмарність.

За офіційними даними, площа Києва дорівнює 835,6 км², яка розділена на 10 адміністративних районів. До міської території включено досить великі лісові масиви, які знаходяться за межами міської забудови. Велику площу займають також численні парки і сквери — 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, їх площа у межах міста становить 8 % від загальної [4].

Основними речовинами, що забруднюють атмосферне повітря, є оксид вуглецю, сполуки азоту, леткі органічні сполуки, діоксид та інші сполуки сірки. На їх долю припадає понад 96,9% від загальної кількості викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря міста.

Виходячи з параметрів перерахованих вище космічних знімків для подальших досліджень було обрано основні складові урболандшафту міста Києва, а також деякі геоекологічні й соціальні фактори, які отримано на основі статистичних даних космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень (таблиця).

МЕТОДИ

Особливістю задач, які відносяться до вивчення навколишнього середовища, є дослідження спільної дії антропогенних і природних факторів. До антропогенних факторів, як результат діяльності людини, належать штучні джерела тепла, вологи і домішок, зміни складу повітря, трансформація різних домішок, взаємодія радіації, забруднення атмосфери тощо. У загальній структурі моделі значне місце займають обробка результатів натурних вимірювань і доведення їх до чисельних моделей, тобто налаштування моделі та перевірка її якості відповідно до фактичної інформації, що є обов'язковим етапом моделювання. Тільки після такої перевірки можна розпочинати вирішення практичних завдань прогнозу й планування.

Для обробки та інтерпретації матеріалів дистанційного зондування було використано програмні комплекси Erdas Imagine та ArcGIS., які мають розвинутий інструментарій просторового аналізу. Для більш точної обробки та класифікації космічних знімків доречно спільне використання автоматичної класифікації та «спектральних індексів», які було отримано на основі перерахунку співвідношення яскравості об'єктів у різних спектральних зонах.

Автоматична класифікація виконувалася методом неконтрольованої класифікації кластерів, що базується на основі ітеративного процесу, який застосовується для обчислення мінімальної Евклідової відстані при віднесенні кожної найближчої комірки до певного кластеру. При розрахунку «спектральних індексів» було використано нормалізований різницевий індекс рослинності NDVI [7], який є показником кількості біомаси та вираховується за формулою:

$$NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED),$$

де RED та NIR — спектральні яскравості в червоному й ближньому інфрачервоному діапазоні відповідно.

Також було розраховано NWI (normalized water index — нормований водний індекс), який використовує зелений діапазон та середній інфрачервоний діапазон [6]. Індекс обчислюється за формулою:

$$NWI = R560(GR) - R1650(SWIR) / R560(GR) + R1650(SWIR);$$

де R560(GR) — спектральне відбиття в зеленому діапазоні електромагнітного спектра на довжині хвиль близько 560 нм; R1650(SWIR) — спектральне відбиття в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра на довжині хвиль близько 1650 нм.

Для оцінки динаміки складових урболандшафту, включно техногенне навантаження та деякі еколого-соціальні фактори, було використано алгоритми методу багатокритеріальної оптимізації (БКО), що складаються з таких етапів [8]: введення функції близькості порівнюваних величин a й b ; обчислення оцінки для функції близькості — S та функції відповідності — F . Ця функція описує ступінь збігу значень порівнюваних величин. Наприклад, порівнюються такі величини, як складові урболандшафту за всі досліджувані роки за період з 1994 по 2013 рік відносно їх стану в 1994 році порічно.

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

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

Близькість значення параметру a до параметру b визначається за допомогою функції близькості — $S_j(b_j, a_j)$ для наступних випадків:

$$S_j(b_j) = (\bar{a}_j - b_j) / \bar{a}_j \text{ — для складових, які покращують стан довкілля;} \quad (2)$$

$$S_j(b_j) = (b_j - \bar{a}_j) / b_j \text{ — для складових, які погіршують стан довкілля.}$$

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

Функція відповідності F є комплексним критерієм, який дозволяє оцінювати стан довкілля міських територій з урахуванням екологічних, технічних і соціальних факторів, а саме: підприємства, територія під забудовою, пустирі, рослинний покрив, водойма, техногенне навантаження, населення тощо.

Для розробки моделі і системного моделювання стану довкілля міста Києва було запропоновано метод, який засновано з урахуванням врахуванні ієрархії і причинно-наслідкових зв'язків між модулями складної системи на основі системної динаміки Д. Форрестера [5]. Цей метод полягає в розробці концептуальної моделі і формуванні математичної моделі, яку складають математичні рівняння, що описують баланс впливів у системі, ґрунтується на причинно-наслідкових відношеннях у системі, що моделюється. При цьому вирішуються чотири типи завдань: аналіз і засвоєння інформації, а також прогноз і планування. Завдання засвоєння інформації дозволяє оцінити параметри моделі та відновити просторово-часову структуру урболандшафтів за даними спостережень. Завдання прогнозу мають стандартне формулювання і схему реалізації: за заданим значенням вхідних параметрів за допомогою моделей розраховуються функції стану, що характеризують поведінку системи у просторі та часі. Моделювання сценаріїв сталого розвитку міських агломерацій виконується при заданих соціально-економічних критеріях, санітарно-допустимих нормах стану довкілля та інших обмеженнях.

Формально математичний опис динаміки системних рівнів зводиться до пов'язаної системи нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку виду:

$$dx/dt = F(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t), \rightarrow \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (3)$$

де $\mathbf{x}(t)$ вектор — функція рівнянь (змінних стану); $\mathbf{p}(t)$ вектор — функція параметрів системи; $F(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$ — нелінійна, в загальному випадку нестационарна вектор функція, яка в переважній більшості випадків являє собою різницю між темпами (потоками, швидкостями) позитивних і негативних зворотних зв'язків:

$$F(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t) = f^+(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t) - f^-(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t), \quad (4)$$

де $f^+(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$ — швидкості позитивних зворотних зв'язків, які включають в себе всі фактори, що викликають ріст змінної \mathbf{x} ; $f^-(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$ — швидкості негативних зворотних зв'язків, що включають в себе всі фактори, що викликають спадання змінної \mathbf{x} .

При цьому припускають, що темпи зростання та спадання мультипликативно залежать від зворотних зв'язків у системі, які є комбінаціями змінних стану x та параметрів p .

Для з'ясування правильності побудови структури моделі та уточнення взаємозв'язків між її підсистемами проводилася верифікація моделі. Для цього на моделі відтворювалася динаміка складових урболандшафту та даних стану довкілля м. Києва, яка потім порівнювалася з динамікою тих же змінних характеристик, взятих з генплану і статистичних звітів [9].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На першому етапі після дешифрування обраних 18 космічних знімків м. Києва за період з 1994 по 2013 роки було отримано значення складових урболандшафтів та деяких соціально-екологічних факторів (таблиця). В якості техногенного навантаження використовувалися значення концентрації CO_2 в атмосфері, які були отримані сенсором AIRS космічного апарату Aqua й супутником GOSAT [10, 11], та чисельність підприємств за цей же період.

Наступним етапом досліджень було визначення функції інтегральної оцінки стану довкілля м. Києва на основі отриманих даних космічних і наземних спостережень. В якості такого параметра було досліджено функцію відповідності F , значення якої були обчислені за кожен досліджуваний рік відносно 1994 року (таблиця). Необхідно було визначити ступінь зв'язку функції F з критерієм, який характеризує екологічний стан м. Києва по наземним традиційним вимірюванням.

Ці дослідження виконуються Центральною геофізичною обсерваторією та Державним управлінням охорони навколишнього природного середовища в Київській області [12, 13, 14]. Останні в якості критерію оцінки екологічного стану міста використовують комплексний індекс забруднення атмосфери (K), значення якого визначаються в результаті вимірювань концентрації забруднюючих речовин у повітрі наземними станціями м. Києва. Для подальшого обчислення було зручно, в якості екологічного критерію, використовувати відношення $E = 1/K$ (в умовних одиницях, таблиця).

Результати обчислень коефіцієнта кореляції між значеннями функції F та критерієм E показали, що функція відповідності F характеризує екологічний стан міської території з ймовірністю порядку $R = 0,83$, що достатнє для практичного використання даних екомоніторингу міських територій.

Таблиця. Статистичні дані по м. Києву та результати обчислення чисельних оцінок екологічного стану E та функції F

Роки	Загальна площа росл. покриття	Території під забудовою	Пустирі та буд. майданчики	Площа водного дзеркала	Щільність забудови	Населення	Обсяги викидів шкід. реч. в пов.	Підприємства	CO_2	E	Функція F (БКО)
	км ²	км ²	км ²	км ²	%	тис. осіб	тис. т	тис. шт.	мг/ дм ³	ум.од.	ум.од.
1994	602	174,4	12,8	48,3	20,5	2640	140	30	363	0,208	1
1995	602	177,6	12,8	48	20,9	2644	139	31,4	364	0,202	0,995
1996	601	177,9	12,3	48,4	20,9	2639	123	32,8	366	0,200	1,004
1998	601	178,4	11,3	47,2	21,0	2630	119	35,8	369	0,225	0,989
1999	600	178,1	14,0	47,8	21,0	2627	112	-	371	0,226	1,003
2000	597	175,4	10,6	47,4	20,7	2632	105	39	373	0,222	1,008
2001	593	179,1	10,5	46,9	21,1	2615	113	40,7	374	0,179	0,998

Продовження таблиці

2002	591	182,7	11,5	45,2	21,6	2611	170	42,5	376	0,189	0,984
2004	585	190,9	12,2	45,8	22,5	2622	173	46,4	379	0,199	0,948
2005	585	190,1	10,5	45,6	22,4	2666	181	48,4	380	0,201	0,958
2006	585	192,5	11,0	45,6	22,7	2693	199	50,5	382	0,185	0,959
2007	584	194,9	11,3	45,7	23,0	2718	210	52,6	383	0,176	0,969
2008	574	202,9	11,6	45,9	23,9	2740	221	54,8	384	0,168	0,958
2009	569	210,9	11,5	46,4	24,8	2766	227	-	386	0,167	0,939
2010	568	211,8	12,8	45,6	24,9	2785	231	59,4	388	0,158	0,942
2011	567	212,6	11,3	45,6	25,0	2799	275	61,8	389	0,149	0,931
2012	566	213,8	10,4	45,5	25,2	2814	278	64,3	391	0,147	0,929
2013	565	215,0	10,1	45,5	25,3	2640	275	66,9	393	0,142	0,914

На рис. 1 приведено графік функції відповідності F по рокам. Аналізуючи зміни значень F , бачимо, що з 1994 року відбувається поступове збільшення показників F . Враховуючи, що наприкінці минулого століття техногенне навантаження на міську територію зменшувалось, тенденцію збільшення F можна пояснити, як покращення екологічного стану у місті в результаті зменшення виробництва. З 1999 року значення F починають зменшуватися.

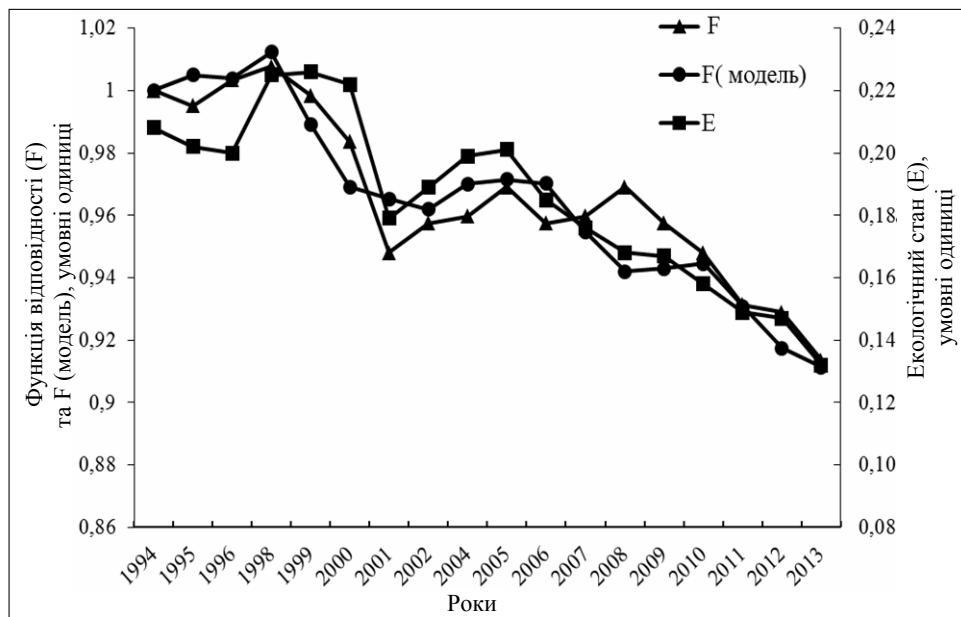


Рис. 1. Результати дослідження стану довкілля міста Києва за період з 1994 по 2013 рік

Оскільки дані, наведені в таблиці, здобуто на відносно обмеженому експериментальному матеріалі, для підтвердження наявності статистично значимої кореляційної залежності між дослідженими величинами необхідно показати, що значення коефіцієнтів кореляції R дійсно не дорівнюють нулю для $n = 18$, де n — кількість років. З огляду на те, що розподіл R повільно

зводиться до нормального, цю операцію було проведено з використанням функції $U = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \ln \frac{1+R}{1-R}$ шляхом перевірки гіпотези про рівність нулю одержаних коефіцієнтів кореляції R для певної кількості експериментів [15]. Відсутність статистично значимої 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 гаусівського розподілення за ординатами $\pm \alpha$. Значення U для 18 років та $R = 0,83$ дорівнює 4,74. Межі зони $-Z_{\alpha/2}$ й $Z_{\alpha/2}$ для функції U обрано при значеннях $\alpha = 0,1$, що відповідає достовірності 0,83 і дорівнюють відповідно $-1,69$ та $+1,69$.

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

Проведені на моделі системної динаміки міста Форрестера-Грехема обчислювальні експерименти показали можливість використання базової моделі для оцінки стану складових міських територій за даними наземних спостережень. Однак базова модель жодним чином не дає інтегральну оцінку і прогноз стану довкілля міських територій на основі узагальнюючого критерію і не використовує можливості космічної інформації ДЗЗ.

У роботі виконано модифікацію і доопрацювання моделі міста в системі Vensim, а саме впровадження рівнянь (1) і (2) для обчислення функції інтегральної оцінки екологічного стану F (функції відповідності) та асиміляції космічної інформації ДЗЗ для дослідження динаміки змін структури складових урболандшафту міста і прогнозу до 2025 року (рис. 1, 2).

На основі модифікованої імітаційної моделі системної динаміки розвитку міста, включаючи складові урболандшафту та деякі еколого-соціальні фактори, а саме: території під житловою забудовою, дороги, загальну площу рослинного покриву, пустирі та будівельні майданчики, чисельність промислово-торгівельних підприємств, емісію парникових газів, площу водного дзеркала, щільність забудови, чисельність населення, було сформовано модель, відповідні взаємозв'язані підсистеми (модулі), визначено границі модельованої системи та рівня деталізації модельованих процесів. На основі статистичної, аналітичної й експертної інформації було отримано причинно-наслідкові зв'язки між модулями та збудовані відповідні діаграми.

Розглянувши рис. 2 видно, що модель адекватно реагує на зміну значень складових міської території. Так збільшення площ зеленої зони призводить до покращення екологічного стану території Києва, а підвищення техногенного навантаження викликає погіршення екологічного стану, у той же час зростання площ забудови і водойм незначно впливає на екологічний стан міської території. В якості прикладу, наведено прогнозну оцінку розвитку стану довкілля за поступової зміни складових урболандшафту: зеленої зони та техногенного навантаження — CO_2 до 10% від номінального значення 2013 року.

Точність прогнозу з обраною моделі виконувалася шляхом розрахунку кореляційного показника (R) даних отриманих у минулому щодо наземної статистики і даних, які отримано в ході моделювання за період з 1994 по 2013 рік. Показник R складає 0,86, що є достатньою умовою.

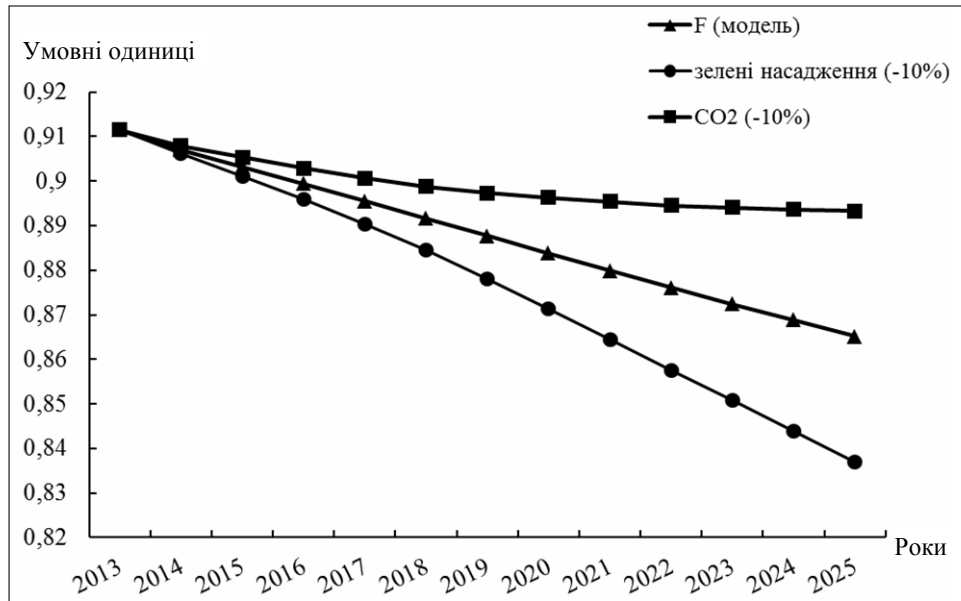


Рис. 2. Результати прогнозу стану довкілля м. Києва (значення функції відповідності F) до 2025 року, а також при поступовому зменшенні CO_2 , і площі зеленої зони до 10% відносно 2013 року

ВИСНОВКИ

На основі методу багатокритеріальної оптимізації, на прикладі м. Києва за період з 1994 по 2013 рік, отримано взаємозв'язок структури складових урболандшафту та деяких еколого-соціальних факторів зі станом довкілля міської території.

Модифіковано та доопрацьовано модель системної динаміки Форрестера–Грехема шляхом асиміляції інформації космічного геомоніторингу, доповнювання математичної моделі рівняннями для обчислення функції відповідності F для інтегральної оцінки стану довкілля міста. Запропонована модель дає змогу, виходячи з реальних умов, моделювати та прогнозувати зміну стану довкілля міських територій під впливом різних факторів та надає відповідним службам міста можливість своєчасно реагувати на можливі наслідки. В результаті зроблено моделювання і прогнозна оцінка стану довкілля м. Києва до 2025 року.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Методология и методы оценки состояния городской среды* / Отв. Ред. Г.Л. Кофф, Э.А. Лихачёва, Д.А. Тимофеев. М.: Медиа-пресс, 2006. — 200 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: звіт за 2002–2004. — К.: КІТ, 2004. — С. 7–14.
3. *Alfeld L.E., Graham A.K.* Introduction to Urban Dynamics. — Waltham: Pegasus Communications, 1976 — 300 p.

4. *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.
5. *Forrester J.W.* Counterintuitive behavior of social systems // *Technology Review* 1971. — **73**(3). — Р. 52–68.
6. *Ермошин И.С.* Современные средства автоматизированого дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт // *ArgReview*. — 2009. — № 1. — С. 12–13.
7. *Huete A., Justice C., van Leeuwen W.* MODIS vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Verion 3. — 1999. — Р. 13–25.
8. *Федоровський А.Д., Даргейко Л.Ф., Зубко В.П., Якимчук В.Г.* Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // *Космічна наука і технологія*. — 2001. — **7**, № 5–6. — С. 75–79.
9. *Генеральний план* м. Києва. Основні положення / Виконавчий орган Київської міської ради (Київська міська державна адміністрація) комунальна організація «Інститут генерального плану м. Києва». — Київ, 2011. — 107 с.
10. *Engelen R.J., Serrar S., Chevallier F.* Four dimensional data assimilation of atmospheric CO₂ using AIRS observations // *Journal of Geophysical Research*. — 2009. — **114**. — Р. 145–159.
11. *NIES.* Database of the GOSAT project. Courtesy JAXA/NIES/MOE. 2013. — <https://data.gosat.nies.go.jp>.
12. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії* / Під ред. О.О. Косовця. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2000–2012 рр.
13. *Огляд стану забруднення* навколишнього природного середовища в Україні у першому півріччі 2013 року за даними спостережень мережі національної гідрометслужби України / Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Центральна геофізична обсерваторія. — Київ, 2013. — С. 23.
14. *Екологічний паспорт* Київської області (2011 р.) / Державного управління охорони навколишнього природного середовища в Київській області. — Київ, 2011. — 154 с.
15. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. — М.: Наука, 1974. — 831 с.

Надійшла 25.12.2013