

УДК 528.88.04:504.064.2

**А.В. СОКОЛОВСЬКА, О.В. ТОМЧЕНКО, А.Ю. ПОРУШКЕВИЧ,
О.Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ, В.Г. ЯКИМЧУК**

МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ В ДИСТАНЦІЙНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

***Анотація.** Обґрунтовується ефективність застосування методів системного аналізу для вирішення тематичних задач на основі матеріалів ДЗЗ. Наводяться результати формування моделей та критеріїв багатокритеріальної оптимізації, аналізу ієрархій, фрактального і мультифрактального аналізу, системної динаміки, адаптивного балансу впливів та множинної регресії при вирішенні різних задач: від оцінки космічних систем ДЗЗ до оцінки стану водойм, міських територій та нафтогазоперспективності ділянок.*

***Ключові слова:** системний аналіз, дистанційні аерокосмічні дослідження, екологія, природокористування.*

Вступ

Розробка та впровадження методів системного аналізу й моделей в технологію використання матеріалів аерокосмічної зйомки сприяють розширенню функціональних можливостей космічного геомоніторингу і створюють методичну основу для формування нового науково-методичного напрямку вирішення завдань природокористування – інтеграції наукових результатів, отриманих у суміжних наукових дисциплінах. За допомогою методів системного аналізу обґрунтовуються найбільш раціональні математичні моделі використання космічної інформації при вирішенні тематичних задач природокористування, виконуються моделювання та прогнозування розвитку досліджуваних процесів. З усіх відомих визначень системного підходу наведемо формулювання, запропоноване Н.М. Моїсєєвим [1]: «системний підхід – це загальнометодологічний принцип, який базується на теорії систем як метод пізнання і реалізується засобами системного аналізу». Найбільш важливими питаннями, які представляють суть системного підходу, є: наявність складної системи з підсистемами, які розглядаються як одне ціле і пов'язані єдиною метою; декомпозиція, оптимізація та синтез системи з корекцією в процесі її формування; введення єдиного узагальнюючого критерію, сформульованого для всієї системи в цілому по більшості системних показників (частинних критеріїв); розробка методу відсіву неперспективних варіантів вирішення задачі і цілеспрямованого вибору компромісного варіанта. Таким чином, системний підхід – це сукупність методів для прийняття рішень на основі всебічного аналізу і моделювання взаємозв'язку складових процесів в складній системі, включаючи: технічні, екологічні, економічні та соціальні підсистеми в умовах великої кількості інформації різної фізичної природи.

У Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГННАН України» на основі матеріалів космічної зйомки та системних методів були вирішені різноманітні тематичні задачі природокористування [2].

В тому числі: оцінка нафтогазоперспективних ділянок ряду територій, моделювання впливу техногенного навантаження на стан навколишнього середовища, оцінка ризику виникнення надзвичайних ситуацій, прогнозна оцінка врожаю озимої пшениці, моделювання та прогноз сталого розвитку міських агломерацій, оптимізація орбітального покриття земної поверхні супутниковим угрупованням, параметричний синтез складу космічних систем ДЗЗ, оцінка ефективності використання космічної інформації ДЗЗ і т. д.

Метод багатокритеріальної оптимізації (БКО) (*Multiobjective Optimization*) використовується при вирішенні задач, для яких потрібне одночасне врахування значень багатьох критеріїв, кожен з яких характеризує одну зі сторін проблеми, що розглядається. При цьому часто необхідно знайти компромісний варіант досліджуваної системи, коли процес вибору відбувається з використанням єдиного узагальненого критерію. Адаптація методу для вирішення конкретної тематичної задачі полягає у формуванні відповідного узагальненого критерію – F і виборі функцій близькості – S , які визначаються характером задачі.

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

де $\rho(b_j, a_j)$ – вагові коефіцієнти; $j = 1 - n$; a і b – величини, які порівнюються;

$$S_j(b_j) = (\bar{a}_j - b_j) / \bar{a}_j, \text{ для випадку } b_j < \bar{a}_j;$$

$$S_j(b_j) = (b_j - \bar{a}_j) / b_j, \text{ для випадку } b_j > \bar{a}_j.$$

На основі методу БКО в ЦАКДЗ були вирішені численні задачі природокористування. Зокрема, в роботі [3] досліджено зміни екологічного стану водно-болотних угідь верхів'я Київського водосховища. На рис. 1 наведено ряд космічних знімків (Landsat 5, 7, 8) водосховища за досліджуваний період 1989–2013 рр.

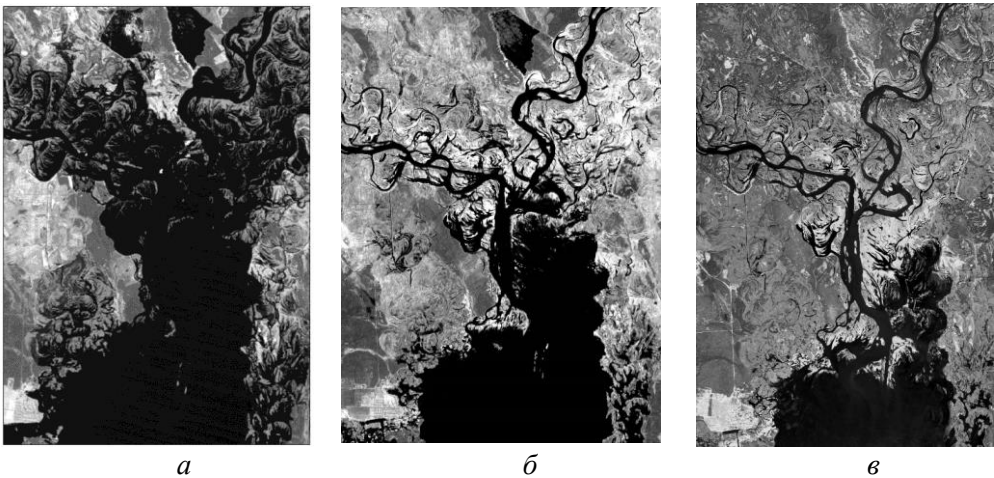


Рис. 1 – Динаміка заростання верхів'я Київського водосховища на КЗ Landsat (а – станом на 06.06.1988; б – станом на 04.08.2001; в – станом на 13.08.2013)

Дослідженням зміни екологічного стану міста Києва за період 1984–2013 рр. присвячена робота [4]. Рис. 2 наглядно демонструє зміни в структурі складових урболандшафту м. Києва за період з 1984 р. по 2013 р.

На рис. 3 представлено результати досліджень на основі методу БКО за матеріалами даних ДЗЗ та верифікацію отриманих результатів на основі даних наземних спостережень ($F_{\text{наз.}}$; коефіцієнт кореляції склав 0,83). Графіки зміни функції приналежності F наочно демонструють погіршення геоекологічного стану міської території за період з 1990 р. по 2013 р.

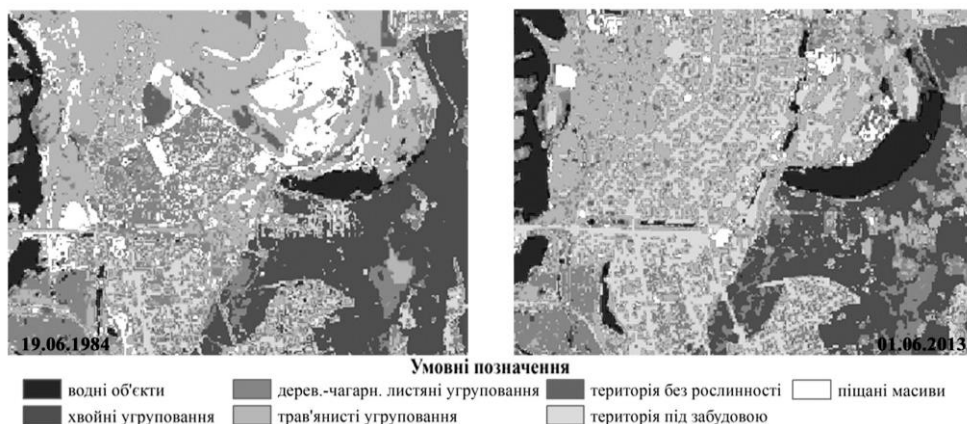


Рис. 2 – Динаміка складових урболандшафту території м. Києва станом на 19.06.1984 р. та 01.06.2013 р. (приклад дешифрування КЗ Landsat)

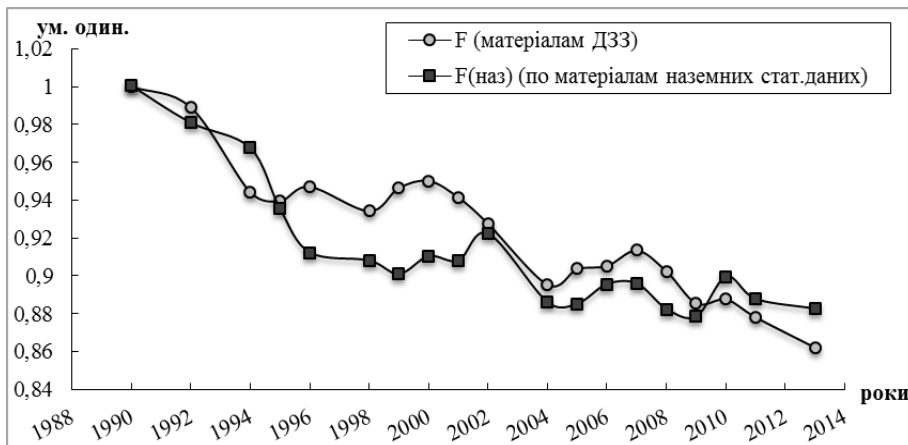


Рис. 3 – Результати оцінки екологічного стану довкілля м. Києва на основі матеріалів космічної зйомки з використанням методу БКО та верифікація результатів на основі даних наземних спостережень

Метод аналізу ієрархій (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), запропонований Т. Сааті (США) на основі лінгвістичного підходу та експертної інформації [5]. Метод дає можливість на основі експертних оцінок сформулювати необхідну цільову функцію, оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи і провести рейтинг альтернативних варіантів.

Для формалізації експертної процедури будується множина матриць попарних порівнянь для кожного рівня і по кожній складовій даного ієрархічного рівня. Обробка матриць, наприклад, чотирьох рівнянь, дає можливість виділити вектори пріоритетів відповідних рівнянь K^1 , K^2 , K^3 і K^4 , компоненти яких визначають їх пріоритети з точки зору експерта.

В узагальненому критерії K , перший рівень відповідає прийняттю рішення по всіх векторах цільових пріоритетів, другий – вектору цільових пріоритетів, третій – компонентам вектора цільових пріоритетів і четвертий – компонентам вектора пріоритетності показників порівнюваних альтернатив. Якщо отримані всі необхідні вагові коефіцієнти, то формула згортки узагальненого критерію для варіантів, які порівнюються, має вигляд:

$$K = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 \cdot x_p^s,$$

де верхній індекс критеріального пріоритету позначає рівень ієрархії; x_p^s – коефіцієнт переваги варіанта S за показником p .

Значення K дозволяє встановити перевагу того чи іншого альтернативного варіанта системи по всій сукупності аналізованих факторів.

На основі методу аналізу ієрархій в ЦАКДЗ було виконано ряд робіт з оцінки космічної системи ДЗЗ [6], нафтогазоперспективності ділянок шельфа [7], екологічного стану Київського водосховища [8] та ін.

Фрактальний аналіз (*Fractal Analysis*) [9] відкриває нові можливості для отримання геодинамічної інформації на основі реальних даних. Використання мультифрактальних параметрів дозволяє оцінити ступінь упорядкованості і стійкості системи до зовнішнього впливу, що неможливо визначити іншими звичайними статистичними методами. В якості кількісної міри, яка описує структуру складових об'єкта, прийнято використовувати фрактальну розмірність Рені – D_q , яка показує наскільки щільно і рівномірно елементи даної множини заповнюють евклідовий простір.

Можливість використання фрактального аналізу для оцінки варіабельності складових досліджуваного об'єкта встановлювалася перевіркою виконання двох умов: по-перше, степеневою залежністю зростання компонентів статистичної суми Z_q від розміру вибірки N і, по-друге, не зростаючим видом функції спектра узагальнених розмірностей D_q , динаміка змін яких характеризує закономірності росту та еволюції процесу.

$$Z_q(N, q) = \sum_{i=1}^n p_i^q, \quad p_i = \frac{N_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad D_q = \frac{\tau(q)}{1-q} \quad \text{при } q \neq 1, \quad \text{де } \tau(q) = \frac{\log \sum_{i=1}^n p_i^q}{\log N}.$$

В роботах [10–12] наводяться результати застосування в ЦАКДЗ методу фрактального аналізу для різних тематичних задач в природокористуванні: від оцінки варіабельності складових урболандшафту міських агломерацій до оцінки стану водних об'єктів та їх ландшафтного біорізноманіття (рис. 4).

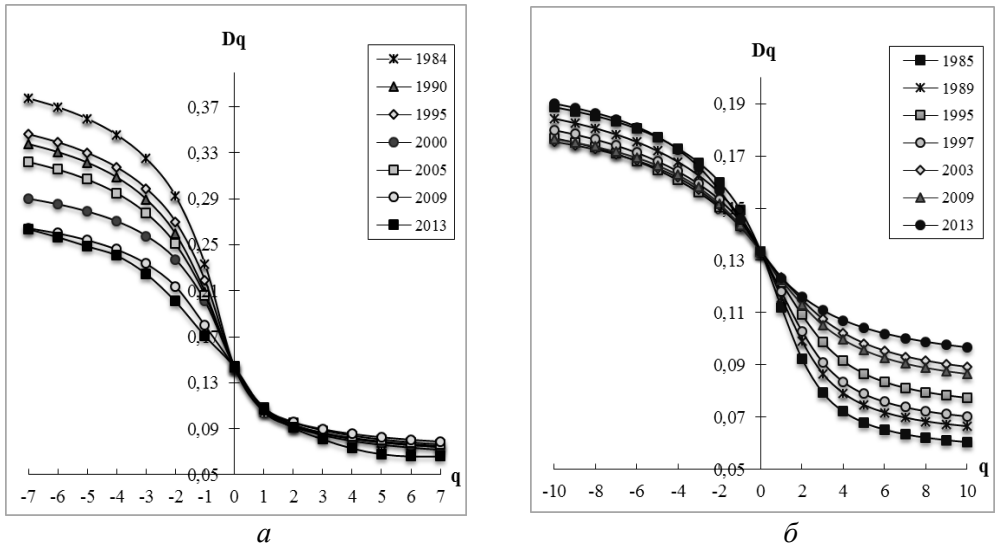


Рис. 4 – Спектри розмірностей D_q від q

(а – варіабельності складових урболандшафту м. Києва; б – варіабельності біотопів водно-болотних угідь Київського водосховища)

Метод системної динаміки (*System Dynamics (SD)*) [13]. Основною перевагою методу є побудова динамічної моделі об'єкта управління на основі експертних даних про причинно-наслідкові відносини в модельованій системі і, на цій основі, широка можливість моделювання процесу розвитку.

На основі методу системної динаміки в ЦАКДЗ було проведено моделювання та прогноз зміни стану довкілля міста Києва під впливом різних факторів [14]. В результаті отримано прогнозну оцінку розвитку стану довкілля міста до 2025 р. при поступовій зміні складових урболандшафту: зеленої зони та техногенного навантаження – CO_2 до 10% від номінального значення 2013 р. (рис. 5).

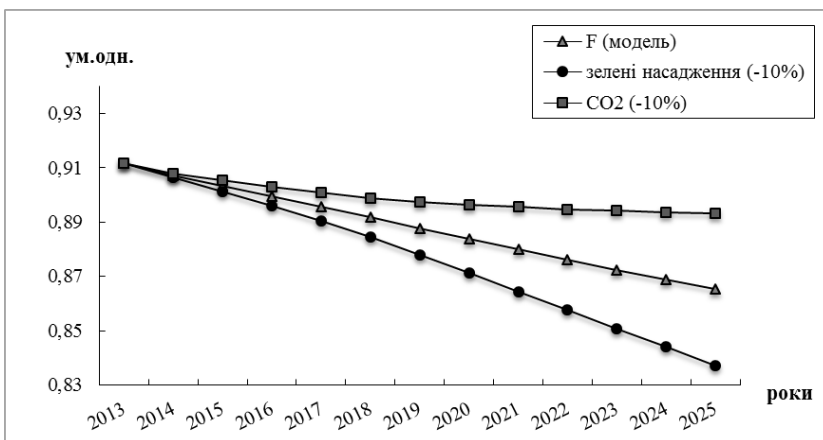


Рис. 5 – Результати прогнозу стану довкілля міста Києва (значення функції відповідності F) до 2025 р., а також при поступовому зменшенні CO_2 і площі зеленої зони до 10% відносно 2013 р.

Метод адаптивного балансу впливів (*Method of Adaptive Balance of Causes (ABC)*) [15]. Метод системної динаміки має ряд обмежень: відсутні загальні алгоритми знаходження функцій, які визначають вплив одних рівнів на значення темпів потоків інших рівнів; не використовуються дані поточних спостережень за процесами розвитку для введення виправлень у модельні сценарії розвитку та ін. Для моделювання інтегральних процесів в екосистемі та оцінки ресурсного потенціалу І. Тимченко та Є. Ігумнова запропонували метод адаптивного балансу впливів (ABC), який, використовуючи основні принципи методу системної динаміки, позбавлений перерахованих вище обмежень.

В роботі [16] наводяться результати моделювання змін екологічного стану міської території від змін площ, зайнятих: зеленою зоною, водоймами, житловою забудовою і промисловими об'єктами.

Метод множинної регресії (*Multiple Regression*) [17]. Множинна лінійна регресійна модель залежності процесу u від впливових факторних змінних x_1, x_2, \dots, x_k має вигляд: $u = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$.

Для оцінки невідомих коефіцієнтів b_j беруться архівні дані n значень процесу u_1, u_2, \dots, u_n і k впливових факторів x_1, x_2, \dots, x_k .

Метод використано для прогнозування врожайності озимої пшениці на основі вимірювань ознак-факторів (температура, кількість опадів і вегетаційний індекс (NDVI)) та результативної ознаки (врожайність).

Отримані рівняння у формі множинної регресії зв'язують врожайність озимої пшениці як зі значеннями температури й кількості опадів, так і зі значеннями космічних вимірювань NDVI. Коефіцієнти рівнянь обчислюються за архівними даними врожайності, опадів, температури і NDVI. Прогнозування врожайності виконується шляхом обчислення значення функції множинної регресії, де аргументами є кількість опадів і середня температура або космічні вимірювання NDVI, отримані у попередні до прогнозування місяці вегетації пшениці.

Висновки

Підводячи підсумки, хочемо зазначити, що результати досліджень і розглянутих вище прикладів показали, що запропоновані методи і моделі оцінки та прогнозування стану навколишнього середовища і природокористування за допомогою даних ДЗЗ дозволяють оперативно проводити моніторинг і знизити витрати як часу, так і коштів. Адаптація та застосування методів системного аналізу для вирішення задач екологічної безпеки та природокористування на основі інформації ДЗЗ значно розширить можливості дистанційних аерокосмічних методів.

На закінчення слід відзначити, що розглянуті вище методи не вичерпують можливості системного аналізу та представляють тільки ту частину його математичного арсеналу, яка освоєна у відділі системного аналізу ЦАКДЗ для вирішення конкретних тематичних завдань природокористування на основі матеріалів аерокосмічної зйомки і наземних спостережень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев – М : Наука, 1981. – 487 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 2002–2004. – Київ. – 2004. – С. 7–14.
3. Томченко О.В. Використання методу багатокритеріальної оптимізації матеріалів ДЗЗ та наземних даних для оцінки екологічного стану Київського водосховища / О.В. Томченко // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ. – К., 2014. – Вип. 15. – С. 31–39.
4. Соколовська А.В. Використання космічної інформації ДЗЗ для моделювання впливу складових урболандшафту на екологічний стан території міста Києва / А.В. Соколовська, К.Ю. Суханов, О.Д. Федоровський // Космічна наука і технологія. – 2013. – Т. 19. – № 3. – С. 21–26.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати – М : Радио и связь, 1993. – 278 с.
6. Боднар Е.Н. Оценка и выбор варианта космической системы ДЗЗ на основе метода анализа иерархий. / Е.Н. Боднар, В.Г. Якимчук, А.Д. Федоровский // Доповіді Національної академії наук. – 2005. – № 8. – С. 106–111.
7. Соколовская А.В. Методические основы дистанционных аэрокосмических исследований в природопользовании, как мульти-междисциплинарное научное направление. (на примере оценки нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана) / А.В. Соколовская, А.Д. Федоровский // Український журнал дистанційного зондування Землі. – 2015. – № 4. – С. 10–25. Режим доступу: <http://ujrs.org.ua/ujrs/index>.
8. Томченко О.В. Використання космічної інформації ДЗЗ та наземних спостережень для комплексної оцінки екосистемних послуг Київського водосховища на основі методу аналізу ієрархій / О.В.Томченко // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20. № 5(90). – С. 41–49.
9. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт – Ижевск, 2010 – С. 19–20.
10. Артюшенко М.В. Мультифрактальный анализ биоразнообразия и ценотической структуры сообщества растений по данным дистанционного зондирования / М.В. Артюшенко, Л.В. Подгородецкая, Л.Н. Зуб, А.Д. Федоровский // Доповіді НАНУ. – 2011. – № 9. – С. 132–141.
11. Соколовська А.В. Мультифрактальний аналіз варіабельності структури складових міських територій на основі космічної інформації ДЗЗ (на прикладі міста Києва за 1986–2011 рр.) / А.В. Соколовська // Доповіді Національної академії наук України. – 2013. – № 12. – С.187–194.
12. Томченко О.В., Підгородецька Л.В., Федоровський О.Д. Комплексна оцінка екологічного стану водойм на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (на прикладі оз. Світязь та верхів'я Київського водосховища) // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. пр. – Запоріжжя: НТЦ ПАС НАН України. – 2013. – № 10. – С. 111–117.
13. Forrester J. W. Counterintuitive behavior of social systems / J. W. Forrester // Technology Review. – 1971. – № 73(3) – P. 52–68.
14. Соколовська А.В. 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 // ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ». – К.: – 2014. – № 4. – С. 12–21.

15. Тимченко И.Е. Игумнова Е.М. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // Мор. гидрофиз. журн. – 2004. – № 5, – С. 53–63.
16. Соколовська А.В. Космічний моніторинг екологічного стану міських територій (на прикладі міста Києва) / А.В. Соколовська // Космічна наука і технологія. – 2013. – Т. 19. – № 4. – С. 44–49.
17. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Норман Дрейпер, Гарри Смит // Applied Regression Analysis – 3-е изд. – М.: «Диалектика». – 2007. – С. 912.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2015