

МЕТОДИЧНІ ЗАСОБИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ЯК СКЛАДОВІ МЕТОДОЛОГІЇ АЕРОКОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИРОДОРЕСУРСНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАВДАНЬ

А.В. ХИЖНЯК, О.Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ

Анотація. Показано можливість використання деяких розроблених, модифікованих і адаптованих методичних засобів системного аналізу як складових методологій аерокосмічного геомоніторингу для розв'язання природоресурсних і екологічних завдань, а саме це методи: статистичного критерію, багатокритеріальної оптимізації, аналітичних мереж, системної динаміки, фрактального і структурно-текстурного аналізу. Наведені методи ілюструються конкретними прикладами вирішення тематичних завдань, що поряд з принципами системності, міждисциплінарності і структуризації є основою методології аерокосмічного геомоніторингу раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища.

Ключові слова: методи, моделі, аерокосмічний геомоніторинг, системність, міждисциплінарність, структуризація, дистанційне зондування Землі.

ВСТУП

Сучасна концепція аерокосмічного геомоніторингу (АКГМ) полягає не тільки в забезпеченні регулярних спостережень за станом довкілля, але й у дослідженнях, спрямованих на отримання більш повних уявлень про об'єкт і супутні процеси на основі використання нових функціональних можливостей, які підвищують ефективність використання інформації АКГМ для розв'язання природоресурсних та екологічних завдань.

У роботі показано можливість та доцільність застосування методичних засобів системного аналізу до розв'язання природоресурсних та екологічних завдань для забезпечення раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища.

Вибір об'єкта дослідження обумовлений тим, що однією з наріжних та необхідних, проте недостатніх умов сталого розвитку є розв'язання природоресурсних та екологічних завдань для раціонального природокористування, а саме: а) добування і перероблення природних ресурсів, їх відтворення і відновлення; б) використання і охорона природних умов середовища життя; в) збереження, відтворення і раціональні зміни екологічного балансу природних систем, що є основою збереження природно-ресурсного потенціалу розвитку суспільства [1].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У роботі розглядається можливість та доцільність застосування методичних засобів системного аналізу до розв'язання природоресурсних та екологічних

завдань для забезпечення раціонального природокористування і відновлення навколишнього природного середовища. Це методи: статистичного критерію, багатокритеріальної оптимізації, аналітичних мереж, системної динаміки, фрактального і структурно-текстурного аналізу. Наведені приклади вирішення тематичних завдань: класифікації сільськогосподарських полів, комплексування оцінок, отриманих методами різних наукових дисциплін, детального оцінювання і вибору найбільш нафтогазоперспективної ділянки, оцінювання структури складових урболандшафту, комплексне оцінювання стану міського середовища та оцінювання динаміки змін руслових гирлових потоків, що поряд з принципами системності, міждисциплінарості і структуризації є основою методології аерокосмічного геомоніторингу раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Метод статистичного критерію розв'язання природоресурсних і екологічних завдань. Основною перевагою запропонованого методу на основі евристичного критерію перед іншими статистичними методами вважається структуризація складної задачі шляхом обчислення ступеня належності значень параметрів досліджуваних об'єктів з даними об'єкта, взятого за еталон.

У праці [2] для подання евристичного критерію розпізнавання класів об'єктів за результатами вимірювання їх інформативних ознак у статистичних теоріях ідентифікації і розпізнавання застосовуються ймовірнісні і статистичні методи, які використовуються для вирішення завдань оптимізації. Для розглянутих задач інтерес становить оброблення матеріалів багатозональних аерокосмічних знімків, експертних даних та різнорідних картосхем з метою класифікації об'єктів за відомими еталонами. Емпіричні дані вказують на те, що значення спектральної яскравості та вхідних даних $\bar{\xi}_q = (\xi_{q1}, \dots, \xi_{qk})$ конкретного досліджуваного об'єкта або групи об'єктів під номером q змінюються від поля до поля випадковим чином, набуваючи значень у колі своїх середніх значень. Відповідно до цього вектор ξ_q будемо вважати випадковим, координати якого є випадковими нормально розподіленими величинами.

Відповідність указаних розподілів нормальному встановлюється за вибірковими значеннями за допомогою, наприклад, критерію Пірсона χ^2 , або критерію Колмогорова, або критерію Смірнова.

Середні значення $D_{q,k}$ і середньоквадратичні $\sigma_{q,k}$ обчислюються за стандартними формулами:

$$D_{q,k} = \frac{1}{N_q} \sum_{n=1}^{N_q} \xi_{q,k,n};$$

$$\sigma_{q,k} = \pm \sqrt{\frac{1}{N_q - 1} \sum_{n=1}^{N_q} (\xi_{q,k,n} - D_{q,k})^2},$$

де N_q — обсяг вибірки для визначення невідомих параметрів випадкової величини, $\xi_{q,k}$; $\xi_{q,k,n}$ — її вибіркові значення.

Функція $P_{q,k}(t_k)$, яка є щільністю розподілу випадкової величини $\xi_{q,k,n}$, має вигляд

$$P_{q,k}(t_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{q,k}} e^{-\frac{(t_k - D_{q,k})^2}{2\sigma_{q,k}^2}},$$

а багатовимірною щільністю $P_q(\bar{t})$ розподілу вектора $\bar{\xi}_q$ визначається як добуток

$$\begin{aligned} p_q(\bar{t}) &= p_q(t_1, \dots, t_k) = p_{q_1}(t_1) \times \dots \times p_{q_k}(t_k) = \\ &= \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{K}{2}} \prod_{k=1}^K e^{-\frac{(t_k - D_{q,k})^2}{2\sigma_{q,k}^2}} \times \frac{1}{\sigma_{q,k}}. \end{aligned}$$

Задане значення вектора $\bar{X} = (X_1, \dots, X_k)$ розглядається як вибіркове значення деякого випадкового вектора $\bar{\xi}_q$ з невідомим значенням q , яке необхідно визначити. Це відповідає тому факту, що ділянка, яка розглядається, має той чи інший ступінь навантаження з номером q .

Мета дослідження полягає в тому, щоб вказати критерій, який дозволить з високою мірою упевненості визначити номер q за заданим значенням вектора \bar{X} . При цьому повинно бути достеменно відомо, що ділянка, яка досліджується, має конкретний ступінь навантаження з номерами $1, k, q$. Це означає, що із сукупності конкуруючих гіпотез H_q у кількості q потрібно обрати ту, яка найбільше відповідає набору \bar{X} .

Остаточно отримуємо критерій у вигляді

$$C_q = \frac{P_q(\bar{X})}{\sum_{r=1}^Q P_r(\bar{X})}.$$

Кінцевим продуктом цього процесу є визначення класу досліджуваних об'єктів за максимальним значенням імовірності їх відношення до конкретного об'єкта-еталона, відповідного класу та створення картосхеми, що характеризує результати вирішення поставлених завдань природокористування чи екології.

Поданий метод застосовано для розв'язання задач із пошуку вуглеводнів на суходолі за наявності двох і більше класів еталонів, для класифікації сільськогосподарських полів та оцінювання їх стану, для оцінювання техногенного навантаження на гірничо-промислові території.

Як приклад наведено результати класифікації сільськогосподарських полів методом статистичного критерію (рис. 1).

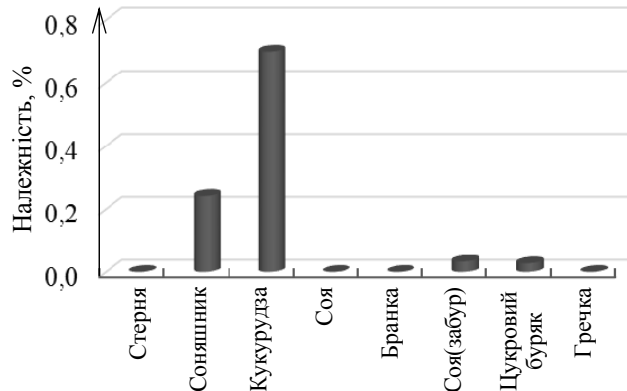


Рис. 1. Результати апробації методу статистичного критерію на сільськогосподарських полях Київської області

Для кожної з 5 культур (соняшник, кукурудза, соя, цукровий буряк, гречка) вибираються еталонні ділянки по 15 еталонних значень спектральних характеристик.

Як видно з рис. 1, запропонований метод дає можливість отримати результати не лише загальної класифікації за культурами, а і їх відсоткової належності одна одній. Це розширює можливості подальшого оцінювання стану посівів конкретної сільськогосподарської культури.

Метод багатокритеріальної оптимізації (МБО). Адаптований до розв’язання природоресурсних завдань на основі комплексування результатів, отриманих методами різних наукових дисциплін і створення міждисциплінарного віртуального еталона. Адаптація методу для вирішення конкретного завдання природокористування полягає у формуванні відповідного узагальненого критерію F та виборі функцій близькості S і відповідності f , які визначаються характером завдання [3].

Принциповою методологічною відмінністю методу МБО від прогнозу покладів вуглеводнів на основі традиційних прямопошукових показників у вигляді аномалій типу покладів полягає в тому, що в разі МБО належність досліджуваної ділянки до певного класу замінюється неперервною функцією належності. Саме вона визначає міру відповідності досліджуваної ділянки параметрам ділянки як еталон. Як еталон вибирається близька за геологічними і фізико-географічними умовами ділянка з установленою промисловою нафтогазоносністю.

Зведемо початкову задачу до одноразової максимізації функції належності, яка являє собою лінійну згортку власних критеріїв мінус штраф за порушення обмежень:

$$F(a, b_c) = \sum_{j=1}^m \rho(a_i, b_{c_j}) f(a_j, b_{c_j}) - \sum_{b \notin a} \mu(a, b);$$

$$s(b_{j_r}, a_{j_l}) = \frac{|(a_{j_l} - b_{j_r})|}{|a_{j_l}|},$$

де $f(a_j, b_{c_j}) = [1 - S(a_j, b_{c_j})]$ — функція відповідності, яка описує ступінь збігу значень порівнюваних величин; $\rho(a_j, b_c)$ — ваговий коефіцієнт ознак

еталона, який відображає пріоритети інформативних ознак; $\mu(a,b)$ — функція штрафу за те, що в досліджуваній ділянці наявні ознаки, які не належать даному еталону. Функція відповідності тим більша, чим менша різниця між значеннями інформативних ознак еталонної ділянки і характеристиками досліджуваної ділянки; $S(a_j, b_{cj})$ — функція близькості, яка характеризує близькість окремих значень інформативних ознак досліджуваної ділянки до відповідних значень ознак віртуального еталона.

Функція близькості дорівнює нулю, якщо значення ознак досліджуваних ділянок вищі або дорівнюють значенням характеристик еталона. Функція штрафу дорівнює нулю, якщо в досліджуваній ділянці наявні ті і тільки ті ознаки, які є на еталонній ділянці, і зростає зі збільшенням кількості незбіжних ознак.

Як приклад на рис. 2 наведено результати міждисциплінарної оцінки нафтогазоперспективності ділянок Хухринсько-Чернетчинської площі, отриманих комплексуванням оцінок методами різних наукових дисциплін на основі адаптованого методу багатокритеріальної оптимізації з віртуальним еталоном [4].

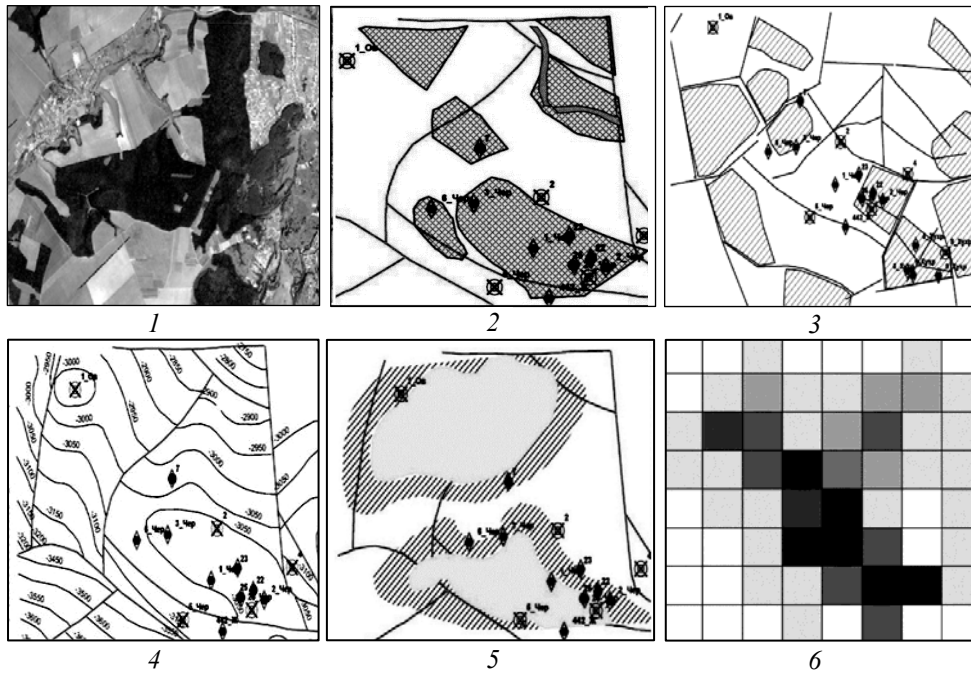


Рис. 2. Результати оцінювання нафтогазоперспективності ділянок Митяївської та Хухринсько-Чернетчинської площі, отриманих методами різних наукових дисциплін (спектрометричним 2, морфоструктурним 3, структурно-стратиграфічним 4, геохімічним 5); результат комплексування оцінок нафтогазоперспективності ділянок цієї території, поданий картою 6 у відносних градаціях яскравості (чорний колір відповідає максимальному значенню нафтогазоперспективності)

Метод аналітичних мереж (МАН). Цей метод модифікований для розв'язання природоресурсних і екологічних завдань в умовах відсутності еталонів. Вибір методу обумовлений тим, що МАН дозволяє обробляти більш різноманітні і складні структури з урахуванням залежності між рівнями і зворотними зв'язками між елементами рівнів, тим самим досягаючи більшої об'єктивності і достовірності в прийнятті рішень. Метод аналітич-

них мереж використовують для детального аналізу у випадках прийняття відповідальних рішень. У мережевих задачах компоненти розглядаються як взаємодійні об'єкти, які впливають один на одного щодо чітко сформульованого керувального критерію. Будь-який розв'язок в МАР зображено у вигляді орієнтованої мережі [5].

Метод аналітичних мереж складається з декількох кроків.

Крок 1. Визначення експертами в предметній галузі пріоритетів, за якими оцінюватимуться досліджувані об'єкти. Оцінка проводилася за шкалою інтенсивності від 1 до 9, запропонованою Т. Сааті [6]. Формується мережева структура $S^t = \{C_1^t, C_2^t, \dots, C_{N^t}^t\}$ критеріїв та факторів $F_j^t, j = 1, \dots, N_f^t$ і альтернативних варіантів розв'язків $A_i^t, i = 1, \dots, N_a^t$ у момент часу $T^t \in T$, де кластер C_i^t містить n_i^t елементів, $C_i^t = \{x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{in_i^t}^t\}, i = 1, \dots, N^t$. Для $\forall C_i^t, C_j^t \in S$ задається значення функціонала впливу $I^t : S^t \times S^t \rightarrow \{0,1\}$:

$$I^t(C_i^t, C_j^t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_j^t, \\ 0, & \text{в іншому випадку,} \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N^t.$$

Крок 2. Будуються взаємозв'язки між критеріями та альтернативами і за кожним вносяться експертні оцінки. Для всіх кластерів C_i^t і C_j^t за умови, що $I^t(C_i^t, C_j^t) = 1$, будуються матриці попарних порівнянь елементів кластера C_j^t відносно p -го елемента кластера C_i^t .

Попарні порівняння кластерів проводилися за всіма критеріями керувальної ієрархії.

Крок 3. Розраховуються суперматриці і граничні матриці елементів взаємозв'язку. Для кожного узагальненого критерію будується суперматриця, у якій послідовно розміщуються всі кластери і елементи, що в них містяться, зверху вниз по вертикалі і зліва направо по горизонталі:

$$W = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j \\ C_1 & W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1j} \\ C_2 & W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_i & W_{i1} & W_{i2} & \dots & W_{ij} \end{matrix}$$

Елементи W_{ij} у суперматриці називаються блоками і являють собою матриці парних порівнянь, C_i, C_j — критерії, $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Крок 4. Використовуючи стандартну адитивну (імовірнісну) формулу (additive (probabilistic)) з урахуванням узагальнених критеріїв і експертних оцінок за пріоритетами вибраних критеріїв на основі кінцевого ранжування об'єктів, отримують фінальні результати оцінки:

$$F_{A_i}^{Add} = \omega_B P_{A_i}^B + \omega_C (1 - P_{A_i}^C) + \omega_R (1 - P_{A_i}^R),$$

де ω — вагові коефіцієнти; P — значення пріоритетів; A_j — i -а альтернатива, якщо $i = 1, 2, \dots, n$; B — вигоди; C — затрати; R — ризики.

Модифікацію та адаптацію методу аналітичних мереж апробовано на конкретних природоресурсних та екологічних завданнях: оцінювання сільськогосподарських полів, ранжування стану міських районів та детальне оцінювання ділянок на нафтопродуктивність на суходолі та шельфі.

Як приклад подано аналітичну модель детального оцінювання і вибору найбільш нафтогазоперспективної ділянки з двох ділянок (A і B), які отримали на першому етапі оцінювання найвищий бал за цільовою функцією належності F (рис. 3). Для визначення найбільш нафтогазоперспективної ділянки на основі МАМ проводиться структурування проблеми шляхом створення мережевої моделі, на основі якої визначаються взаємозв'язки між запропонованими альтернативами і узагальненими критеріями вибору.

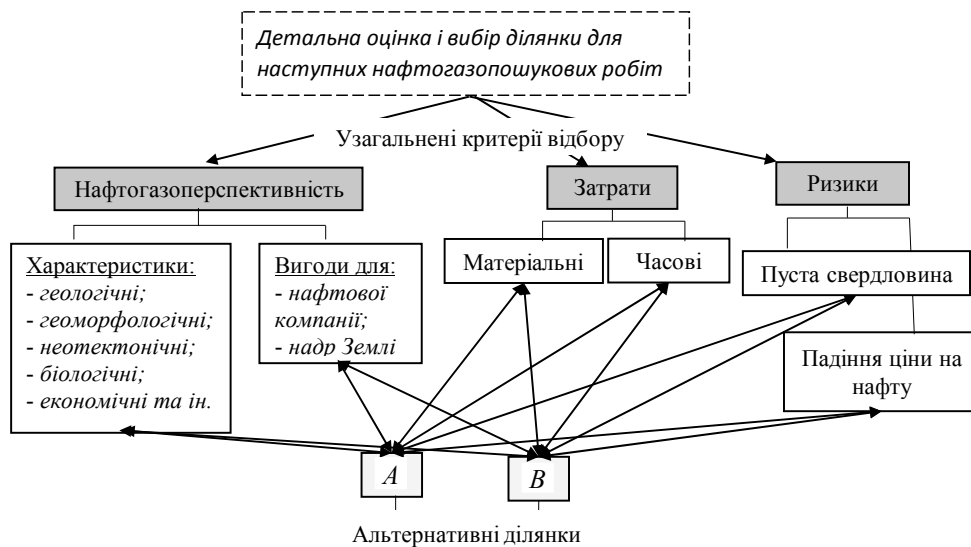


Рис. 3. Модель МАМ детального оцінювання і вибору (однієї з двох) ділянок території для подальших нафтогазоперспективних робіт

Вибір цього методу зумовлено тим, що МАМ дозволяє обробляти більш різноманітні і складні структури з урахуванням залежності між рівнями і зворотними зв'язками між елементами рівнів, тим самим досягаючи більшої об'єктивності і достовірності в прийнятті рішень. МАМ використовують для детального аналізу у випадках прийняття відповідальних рішень. У мережових задачах компоненти розглядаються як взаємодійні об'єкти, які впливають один на одного щодо чітко сформульованого керувального критерію. Будь-який розв'язок в МАМ подано у вигляді орієнтованої мережі, на відміну від методу аналізу ієрархій (МАІ), де потоки строго напрямлені зверху вниз.

Метод фрактального аналізу. Адаптований для оцінювання і прогнозу розвитку варіабельності різних складових природних систем. Фрактальний аналіз відкриває нові можливості для отримання об'єктивної геодинамічної інформації на основі реальних даних, оцінює зміну і структуру досліджуваного процесу або об'єкта, періодичність розподілу геометричних, фізичних та інших характеристик. Уведення мультифрактальних пара-

метрів дозволяє оцінити ступінь впорядкованості та стійкості системи до зовнішнього впливу, що неможливо визначити звичайними іншими статистичними методами. Як кількісну міру, яка описує структуру складових об'єкта, використовують фрактальну розмірність Реньї D_q , яка показує, наскільки щільно і рівномірно елементи даної множини заповнюють евклідовий простір. Значення $D(q)$ — інваріантне до розміру вибірки, площі, масштабу [7].

Можливість використання фрактального аналізу для оцінювання варіабельності складових досліджуваного об'єкта встановлювалося перевіркою виконання двох умов: степеневою залежністю зростання компонентів статистичної суми Z_q від розміру вибірки N_i і не зростаючим видом функції спектра узагальнених розмірностей D_q , динаміка змін яких характеризує закономірності росту і еволюції процесу:

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

де N — загальний обсяг вибірки (загальна кількість складових на обраній площі); N_i — кількість i -го типу складових у вибраній площі N ; n — кількість усіх типів складових, кількість яких залежить від N ; p_i — імовірність належності даного типу складової у вибірці в i -му типі; q — ступінь моменту (статистичної суми), яка набуває цілочислових значень у діапазоні $-q_{\max} < q < q_{\max}$, $q_{\max} > 0$.

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

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

Функція D_q показує наскільки неоднорідним є розподіл складових урболандшафтах за типами і наскільки цей розподіл відрізняється від рівномірного. Функцію D_q називають спектром узагальнених розмірностей Реньї мультифрактала (Sala N., 2000). Якщо $q \rightarrow +\infty$, основний внесок забезпечують складові з найбільшими значеннями p_i , а якщо $q \rightarrow -\infty$, — з малими значеннями p_i , типи складових, які трапляються рідше. На практиці обмежуються розглядом десяткох значень цілих чисел q .

Як приклад, виконано оцінювання структури складових урболандшафту території міста Києва за період 1984–2013 рр. на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і розробленої мультифрактальної моделі (рис. 4). Результати дослідження показали, що розвиток Києва відбувається за рахунок перетворення, ущільнення і більш раціонального використання внутрішньої структури складових без істотного розширення меж міської території, що незмінно позначається на екологічному стані міського середовища [8].

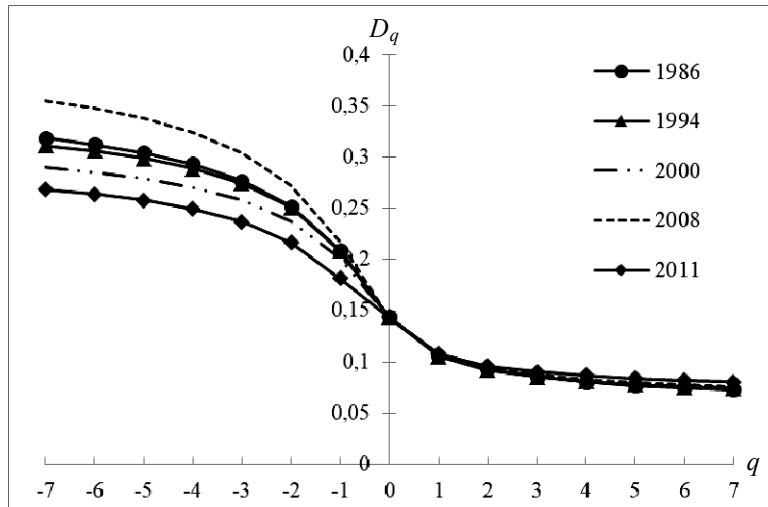


Рис. 4. Графіки залежності D_q від q за окремі роки спостережень

Із графіка (рис. 4) можна зробити висновок, що максимальна варіабельність за аналізований період часу виявляється за від'ємних значень q індексів D_q .

Метод системної динаміки. Цей метод модифікований асиміляцією космічної інформації ДЗЗ і доповнюванням рівняння для обчислення і моделювання прогнозування розвитку екологічного стану промислових територій запропонував Дж. Форрестор [9] для кількісного аналізу складних систем, що мають множинні внутрішні зв'язки між елементами (модулями) системи. Відмінністю методу є побудова динамічної моделі об'єкта керування на основі експертних даних і причинно-наслідкових відношень між модулями в модельній системі і на цій основі широка можливість моделювання процесу розвитку. Метод полягає в розробленні концептуальної моделі та формуванні математичної моделі, яку складають математичні рівняння, що описують баланс впливів у системі, заснований на причинно-наслідкових зв'язках у системі. При цьому вирішуються чотири типи завдань: аналізування і засвоєння інформації, прогнозування і планування. Завдання засвоєння інформації дозволяє оцінити параметри моделі і за даними спостережень відтворити її просторово-часову структуру. Завдання прогнозування мають стандартне формулювання і схему реалізації: за заданими значеннями вхідних параметрів. За допомогою моделей розраховуються функції стану, які характеризують поведінку системи у просторі та часі.

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

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

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;

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

де $f^+(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$ — швидкості додатних зворотних зв'язків, які містять фактори, що зумовлюють зростання змінної \mathbf{x} ; $f^-(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$ — швидкості від'ємних зворотних зв'язків, які містять фактори, що зумовлюють зменшення змінної \mathbf{x} .

Даний метод апробовано на території міста Києва для комплексного оцінювання стану міського середовища з урахуванням соціальних, економічних та екологічних показників [10]. У результаті отримано інтегральний показник стану довкілля міста F та прогнозу картину до 2025 р. (рис. 5).

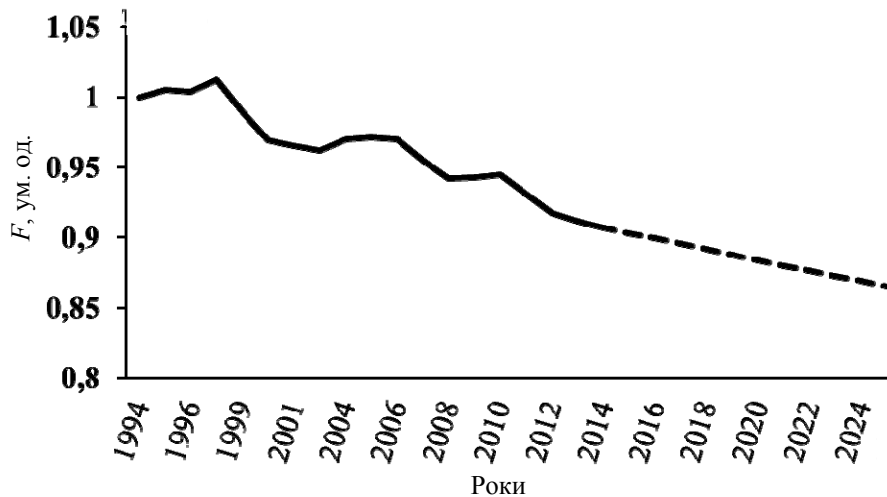


Рис. 5. Результати моделювання стану довкілля міста Києва (суцільна лінія) та прогнозна оцінка (пунктирна лінія)

Структурно-текстурний аналіз. Цей аналіз адаптовано до дешифрування космічних знімків природних і техногенних ландшафтів та об'єктів. За простотою і компактністю описів структурно-текстуровані ознаки значно перевершують морфологічні ознаки; їх можна порівняти з інваріантами моментів або стохастичними інваріантами. Текстурні характеристики, незважаючи на сезонну погоду мінливість, зберігають якісну і кількісну оцінку протягом усього часу [11]. Текстура виражається оцінками статистик енергетичних і просторово-енергетичних розподілів (амплітудних і амплітудно-фазових ознак), автокореляційних і взаємкореляційних функцій (кореляційних ознак), спектрів просторових частот (спектральних ознак) або геометричних і енергетичних параметрів Реона — локальних ознак. В основу текстурних ознак покладено поняття текстури — найважливішої характеристики зорових моделей зображень.

Під час дешифрування космічних зображень ландшафтних зон за структурно-текстурованими ознаками зображення досить точно апроксимуються експонентними функціями. Це дозволяє як стохастичну модель зображень

використовувати випадковий двовимірний марковський процес. Математичною формою опису марковської моделі зображення є матриця суміжних імовірностей значень яскравості космічного знімка.

Найчастіше у практиці ДЗЗ застосовують такі текстурні перетворення:

— лінійні ортогональні перетворення: Фур'є, Адамара, Хаара та ін. Текстурованим спектром є відповідно спектр Фур'є, Адамара, Хаара та ін., а текстурною частотою — його двовимірний аргумент;

— автокореляційні перетворення. Текстурованим спектром є автокореляційна функція, а текстурною частотою — двовимірне зміщення;

— перетворення до гістограми. Текстурованим спектром є гістограма яскравості, а роль одновимірної текстурної частоти виконує значення яскравості. Зазвичай використовуються похідні текстурні ознаки (наприклад, середнє, дисперсія).

Як інформативні текстурні характеристики зображень перевірено кілька десятків різних параметрів Хараліка [12] і обрано для подальшого використання п'ять найбільш інформативних з них (*Contrast, Sum Variance, Sum Entropy, Entropy, Difference Entropy*) як для пошуку вуглеводнів, так і для виявлення аномалій природного і техногенного походження.

Одним з інформативних ознак СТА є просторово-частотний спектр (ПЧС). Як ПЧС найчастіше використовується двовимірний спектр Фур'є. Складові ПЧС $C(n, m)$ обчислюються за методом дискретного двовимірного перетворення Фур'є відповідно до виразу [13]

$$C(n, m) = \frac{1}{A \cdot B} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} D(x, y) \cdot \exp - [(nx / A) + (my / B)],$$

де n, m — номери просторових гармонік по осях X, Y ; x, y — номери пікселів у межах виділеного фрагмента по осях X, Y ; $L(x, y)$ — розподіл яскравості в зображенні; A, B — кількість відліків по осях X, Y .

Для визначення напрямку лінійних елементів зображення використовується залежність нормованої азимутальної спектральної густини (АСГ) енергетичного спектра від кутового напрямку Θ . Обчислюється АСГ за формулою [13]

$$S(\Theta) = \int_0^{\Theta + \Delta\Theta/2} \int_{\Theta - \Delta\Theta/2}^{\Theta + \Delta\Theta/2} S(\Theta, r) dr d\Theta,$$

де $S(\Theta, r)$ — значення енергетичного спектра зображення в точці (Θ, r) ; $\Theta = \arctg(N_y / N_x) + \pi/2$ — кут напрямку двовимірної частоти в полярних координатах, зміщений на 90° ; N_x, N_y — проекції двовимірної частоти просторового спектра на осі X, Y відповідно; $r = \sqrt{N_x^2 + N_y^2}$ — модуль просторової частоти або її радіус у полярних координатах.

На прикладі Дніпра і Дунаю наведено результати оцінювання динаміки змін руслових гирлових потоків на основі методу АСГ (рис. 6) [13].

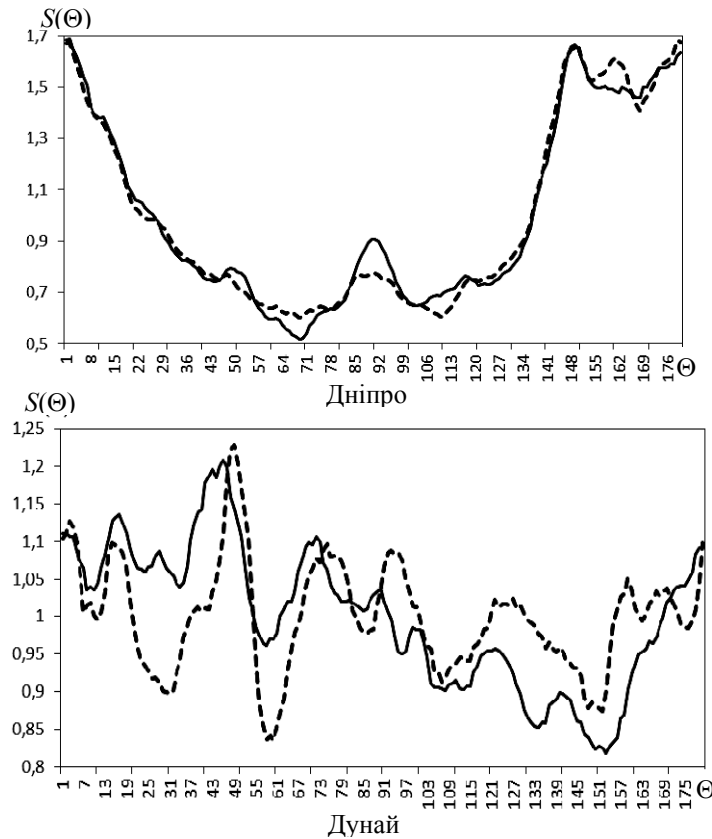


Рис. 6. Оцінювання динаміки змін руслових гирлових потоків за 1986–2015 рр.

На відміну від Дніпра АСГ Кілійського гирла Дунаю за 2015 р. значно змінилася порівняно з 1986 р. як щодо зменшення інтенсивності, так і азимутального розташування піків ПЧС.

ВИСНОВКИ

На основі викладеного матеріалу обґрунтовано можливості та доцільність застосування методичних засобів системного аналізу до розв’язання природоресурсних і екологічних завдань для забезпечення раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища. Створення на цій основі методології дозволить значно розширити функціональні можливості і підвищити ефективність аерокосмічного геомоніторингу.

Розглянуті методи далеко не вичерпують можливості системного аналізу; це лише деяка частина його математичного арсеналу, яка освоєна у відділі системного аналізу ЦАКДЗ для вирішення конкретних тематичних завдань природокористування та екології на основі матеріалів аерокосмічного знімання, і може мати продовження.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.И. Лялько, и др., “Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем”, *Космічні дослідження в Україні 2002–2004*, Київ, 2004, с. 7–14.

2. A.I. Arkhipov, N.M. Glazunov, and A.V. Khyzhnyak, "Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, issue 1, pp. 94–98, 2018. doi: 10.1007/s10559-018-0010-7
3. А.Д. Федоровский, Л.Ф. Даргейко, В.П. Зубко, и В.Г. Якимчук, "Системный подход к оценке эффективности аппаратных комплексов дистанционного зондирования Земли", *Космична наука і технологія*, т. 7, № 5–6, с. 75–79, 2001.
4. А.В. Хижняк, Т.А. Єфіменко, О.І. Архіпов, О.В. Томченко, К.Ю. Суханов, и О.Д. Федоровський, "Евристичні методи оцінки нафтогазоперспективності ділянок досліджуваної території на основі міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної і наземної інформації (на прикладі Дніпровсько-Донецької западини)", *Український журнал дистанційного зондування Землі*, № 9, с. 24–28, 2016.
5. Т. Саати, *Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
6. Т. Саати, *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь, 1993.
7. Б. Мандельброт, *Фрактальная геометрия природы*. Москва–Ижевск, 2010.
8. А.В. Соколовська, "Мультифрактальний аналіз варіабельності структури складових міських територій на основі космічної інформації ДЗЗ (на прикладі міста Києва за 1986–2011 рр.)", *Доповіді Національної академії наук України*, №12, с.187–194, 2013.
9. J.W. Forrester, "Counterintuitive behavior of social systems", *Technology Review*, vol. 73, pp. 52–68, 1971.
10. А.В. Соколовська, О.В. Нікітенко, и О.Д. Федоровський, "Системне моделювання і прогноз стану довкілля міста Києва на основі статистичних даних космічного геомоніторингу і наземних спостережень", *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 4, с. 60–68, 2014.
11. А.Д. Федоровский, В.Г. Якимчук, С.А. Рябоконеко, И.П. Пахомов, и К.Ю. Суханов, "Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа", *Космична наука і технологія*, т. 8, № 2/3, с. 76–83, 2002. Доступно: <https://doi.org/10.15407/knit2002.02.076>
12. R.M. Haralick, "Statistical and structural approaches to texture", *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 5, pp. 786, 1979.
13. О.Д. Федоровський та ін., "Космічний моніторинг водних потоків гірлових об'ластей річок (на прикладі Дніпра та Дунаю)", *Космична наука і технологія*, т. 23, № 2, с. 11–16, 2017. Доступно: <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.011>

Надійшла 25.07.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

A.V. Khyzhniak, ORCID: 0000-0002-8637-3822, State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine", e-mail: avsokolovska@gmail.com.

O.D. Fedorovsky, ORCID: 0000-0003-3611-546X, State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine", e-mail: adfedorovsky@ukr.net.

METHODOLOGICAL APPROACHES OF SYSTEM ANALYSIS AS COMPONENTS OF THE METHODOLOGY OF AEROSPACE GEOMONITORING FOR SOLVING NATURAL RESOURCES MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS / A.V. Khyzhniak, O.D. Fedorovsky

Abstract. The possibility of using some of the developed, modified, and adapted methodological tools of system analysis as components of the methodology of aerospace geomonitoring for solving environmental and ecological problems is shown. The above methods, namely: statistical criterion method, multicriteria optimization method, analytical networks method, system dynamics method, fractal, and structural-texture analysis method. These methods are illustrated with specific examples of solving thematic problems, which, together with systematic, interdisciplinary, and structuring principles, are based on the methodology of aerospace geomonitoring for sustainable nature management and restoring the natural environment.

Keywords: methods, models, system analysis, aerospace geomonitoring, interdisciplinarity, structuring, Earth remote sensing.

МЕТОДИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА КАК СОСТАВЛЯЮЩИЕ МЕТОДОЛОГИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ГЕОМОНИТОРИНГА РЕШЕНИЯ ПРИРОДОРЕСУРСНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ / А.В. Хижняк, А.Д. Федоровский

Аннотация. Показана возможность использования некоторых разработанных, модифицированных и адаптированных методических средств системного анализа как составляющих методологии аэрокосмического геомониторинга для решения природоресурсных и экологических задач, а именно это методы: статистического критерия, многокритериальной оптимизации, аналитических сетей, системной динамики, фрактального и структурно-текстурного анализа. Приведенные методы иллюстрируются конкретными примерами решения тематических задач, которые наряду с принципами системности, междисциплинарности и структуризации являются основой методологии аэрокосмического геомониторинга рационального природопользования и восстановления окружающей среды.

Ключевые слова: методы, модели, системный анализ, аэрокосмический геомониторинг, междисциплинарность, структурирование, дистанционное зондирование Земли.

REFERENCES

1. V.I. Lyalko and et al., "Using satellite data to study natural resource issues ", *Space Research in Ukraine, 2002–2004*, Kyiv, pp. 7–14, 2004.
2. A.I. Arkhipov, N.M. Glazunov, and A.V. Khyzhnyak, "Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, issue 1, pp. 94–98, 2018. doi: 10.1007/s10559-018-0010-7.
3. A.D. Fedorovsky, L.F. Dargeyko, V.P. Zubko, and V.G. Yakimchuk, "A system approach to the estimation of the efficiency of hardware complexes for remote earth sounding", *Space Science and Technology*, vol. 7, no. 5–6, pp. 75–79, 2001. Available: <https://doi.org/10.15407/knit2001.05.075>.
4. A. Khizhnyak, T. Yefimenko, A. Arkhipov, O. Tomchenko, K. Sukhanov, and O. Fedorovsky, "Heuristic methods of assessment of sites within oil and gas prospective areas based on interdisciplinary integration of aerospace and surface information (as exemplified by the Dnieper-Donetsk basin)", *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, no. 9, pp. 24–28, 2016.
5. Thomas L. Saaty, *Decision making with dependence and feedback. The analytic process*. Moscow: LKI Publishing House, 2008.
6. Thomas L. Saaty, *Making decisions. Method of hierarchy analysis*. Moscow: Radio and svyaz', 1993.
7. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. Moscow: Institute for Computer Research, 2002.
8. A.V. Sokolovska, "Multifractal analysis of a variability of the structure of urban areas components based on the information remotely sensed from space (the case of Kyiv from 1986 till 2011)", *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 12, pp. 187–194, 2013.
9. J.W. Forrester, "Counterintuitive behavior of social systems", *Technology Review*, vol. 73, no. 3, pp. 52–68, 1971.
10. A.V. Sokolovska, O.V. Nikitenko, and O.D. Fedorovsky, "System modeling and forecast of environmental conditions of Kyiv based on statistical data of space monitoring and ground-based observations ", *System Research & Information Technologies*, no. 4, pp. 60–68, 2014.
11. O.D. Fedorovsky, V.G. Yakimchuk, S.A. Ryabokononko, I.P. Pakhomov, and K.Yu. Sukhanov, "Interpreting space images of landscape systems on the basis of structural analysis" *Space Science and Technology*, vol. 8, no. 2–3, pp. 76–83, 2002. Available: <https://doi.org/10.15407/knit2002.02.076>
12. R.M. Haralick, "Statistical and structural approaches to texture", *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 5, pp. 786, 1979.
13. O.D. Fedorovsky and et al., "Space monitoring of water stream in estuarial areas (by the example of the Dnieper and the Danube)", *Space Science and Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 11–16, 2017. Available: <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.011>.