Ukrainian Journal of Remote Sensing
journal homepage: www.ujrs.org.ua

https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.3.263

УДК 504.064.2:528.88.04:303.732

Математичні методи аерокосмічного геомоніторингу природних ресурсів з оцінкою їх попиту і прикладами використання: частина перша – водні об'єкти

О. Д. Федоровський, А. В. Хижняк, О. В. Томченко*, К. Ю. Суханов

ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

У статті викладено перелік математичних методів аерокосмічного моніторингу, методика оцінювання попиту тематичних задач аерокосмічного моніторингу, як приклад виконання – оцінювання попиту математичних методів при дослідженні водних об'єктів. Наведено приклади найефективніших з них під час вирішення завдань дослідження стану водних ресурсів. Для оцінювання попиту методичних засад і засобів при розв'язанні задач водокористування на основі методології аерокосмічного геомоніторингу запропоновано використовувати метод аналізу ієрархій. Метод дав змогу оцінити переваги і недоліки розглянутих методичних засобів і отримати за кожним з них формалізовану узагальнену оцінку рівня відносного попиту методичних засобів. З отриманих результатів було визначено, що на сьогодні стосовно розглянутих у статті природоресурсних завдань найефективнішими математичними методами аерокосмічного геомоніторингу є методи на основі статистичного критерію, просторово-частотного та фрактального аналізів. У статті наведено приклад апробації методичних засобів системного аналізу як складових методології аерокосмічного геомоніторингу для вирішення конкретних тематичних завдань водокористування, а саме, результат використання методу на основі статистичного критерію для оцінювання стану міського водного середовища в м. Києві на прикладі системи озер Опечень та водойми-кар'єру озера Вербне, Редькіне. Розглянуто приклад аналізу домінуючих напрямків гирлових потоків дельтових зон Дніпра та Дунаю, отриманий на основі методу просторово-частотного аналізу. Наведено результат фрактального аналізу оцінки варіабельності складових плавнево-літорального ландшафту гирлових областей річок на прикладі Кілійського гирла Дунаю.

Ключові слова: аерокосмічний геомоніторинг, методи системного аналізу, задачі водокористування.

© О. Д. Федоровський, А. В. Хижняк, О. В. Томченко, К. Ю. Суханов. 2024

Вступ

Для оптимізації вирішення актуальних завдань раціонального та екологічно обґрунтованого використання водних ресурсів, підтримання належної якості води, збереження умов існування водної й навколоводної біоти та підвищення ефективності екологічного моніторингу необхідно використовувати сучасні методи отримання та оброблення інформації. Вирішити ці завдання неможливо, не використовуючи матеріали дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Вивчення та оброблення отриманих космічних знімків у поєднанні з окремими контрольними наземними вимірами відображають ретроспективу процесів і дають змогу оцінити динаміку змін, що відбуваються на водоймі, та її сучасний екологічний стан. Під час розв'язання задач комплексного оцінювання стану водойм на основі інформації ДЗЗ та наземних спостережень, доцільно використовувати системний підхід, сучасні методи моделювання, оцінювання та прогнозу складних систем, можливостей сучасних інформаційних і комп'ютерних технологій.

Інформація космічного геомоніторингу дає змогу не тільки оперативно отримувати зображення водних об'єктів, що займають великі площі, а й фіксувати зміни їх характеристик у часі та просторі. Так, з дешифрування космічних знімків водних об'єктів можна за низкою ознак визначити особливості гідрографічної мережі та гідрологічного режиму, тип біотопів, аквальні ландшафти та їх структуру. За супутниковими знімками можна досить впевнено виділити ділянки заболочування і заростання, обчислювати площі, зайняті вищою водною рослинністю (ВВР) і незаросліі акваторії, відстежувати розвиток явищ "цвітіння води".

Водні об'єкти добре розрізняються на космічних знімках, що дає змогу ефективно здійснювати їх дистанційне картографування та моніторинг. За космічними знімками можна стежити за розвитком різноманітних процесів у річках, озерах, водосховищах, виявляти їх наслідки, обумовлені як природними, так і антропогенними факторами. Основними перевагами космічних знімків є: одночасність охоплення значної площі акваторії, безперервність інформаційного змісту знімка для кожної точки зображення, висока періодичність реєстрації стану водних мас і прибережних територій (Хижняк А. В., 2020).

У Державній установі "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України" було розроблено, модифіковано та адаптовано, на

*E-mail: olhatomch@gmail.com

основі системного аналізу і принципів структурності, міждисциплінарності і комплексування даних, математичні методи аерокосмічного геомоніторингу природних ресурсів у сфері водних та лісових ресурсів, агроландшафтів та міського середовища, пошуку нафти і газу, оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій та інших напрямків.

Для дослідження водних об'єктів було розроблено, модифіковано і адаптовано та використано такі методи: статистичного критерію (Fedorovsky O. D., 2021), багатокритеріальної оптимізації (Федоровський О. Д., 2000, Томченко О. В., 2014а), аналізу ієрархій (Томченко О. В., 2014б), аналітичних мереж, просторової інтерполяції Колмогорова (Даргейко Л. Ф, 2008), системної динаміки (Соколовська А. В., 2015), адаптивного балансу впливів (Томченко О. В., 2015), множинної регресії (Федоровський О. Д., 2015), структурно-текстурного аналізу (Федоровський О. Д., 2017) та ентропійні методи (Томченко О. В., 2018). Також на основі цих методів реалізовано тематичні напрями дослідження стану водойм: оцінювання якості води та екологічного стану водойм, моніторинг водних потоків гирлових областей річок, вплив заростання водойм вищою водною рослинністю, варіабельність аквальних ландшафтів, дослідження просторово-часових інформативних ознак дешифрування водойм, еколого-економічне моделювання, оцінювання екосистемних послуг водойм та ін.

Метою цієї публікації є оцінювання попиту математичних методів та визначення перспективи їх використання для раціонального водокористування.

1. Оцінювання попиту математичних методів дослідження водойм

Для оцінювання попиту методів системного аналізу щодо рішення водогосподарських завдань застосовувалися експертні оцінки за методологією аналізу ієрархій – MAI (Analytic Hierarchy Process – AHP) Т. Сааті (Сааті Т., 1993). Цей метод дає змогу оцінити переваги і недоліки різних методичних засобів та отримати формалізовану узагальнену оцінку рівня відносного попиту на них.Ключовим етапом є структуризація цільової функції на прості критеріальні складові – показники, які об'єднуються у відповідні ієрархічні рівні, та встановлення взаємозв'язків між ними. Структуризація допомагає розбити завдання на ієрархічні підсистеми та компоненти, необхідні для ефективного управління завданням і досягнення його цілей.

Процес структуризації є невід'ємною частиною планування завдання і визначення його цілей. Він також включає підготовку зведеного плану завдання і матриці розподілу впливів. Задача нульового рівня полягає у формулюванні мети, яка має бути досягнута в результаті розв'язання поставленої проблеми.

В цьому випадку – це "оцінювання попиту методів системного аналізу для вирішення водогосподарських завдань". Перший рівень – це перелік напрямів дослідження водойм за типами гідрологічних об'єктів, що вирішується на основі космічного геомоніторингу: оцінювання стану підземних вод, оцінювання стану внутрішньоконтинентальних вод, оцінювання стану водних об'єктів на межі ріка-море, оцінювання стану морської акваторії та ін. Другий рівень – це перелік тематичних водогосподарських завдань, що вирішується на основі космічного геомоніторингу: оцінювання якості води та екологічного стану водойм, оцінювання екосистемних послуг, еколого-економічне моделювання стану водойм, дослідження трансформації та варіабельності аквальних ландшафтів (зокрема заростання макрофітами), дослідження просторово-часових інформативних ознак водойм та ін.

На третьому рівні надана космічна інформація ДЗЗ, яка використовується для вирішення водогосподарських завдань: географічна, геологічна, гідрофізична, різночасова, ландшафтна, спектральна тощо. Четвертий рівень включає математичні методи та засоби системного аналізу, рівень відносного попиту яких треба визначити (Рис. 1).

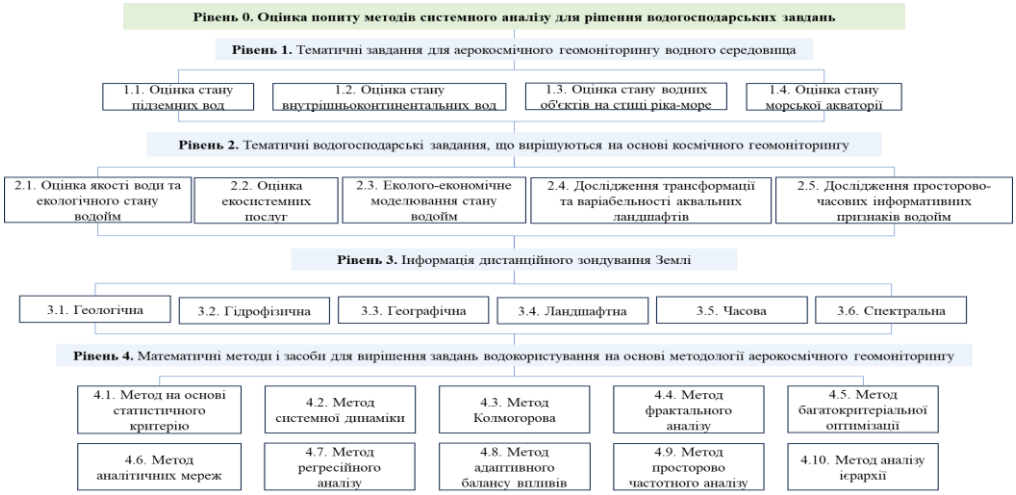


Рис. 1. Ієрархічна схема оцінювання попиту методів системного аналізу для вирішення водогосподарських завдань на основі методології аерокосмічного гемоніторингу

Після ієрархічного представлення розглянутої проблеми для формалізації експертної процедури будується множина матриць попарних порівнянь для кожного рівня і за кожною складовою зазначеного ієрархічного рівня (Табл. 1).

Таблиця 1. Матриця попарного порівняння MAI для тематичних шарів

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	*CR*
1	1.00	6.00	8.00	4.00	1.00	3.00	3.00	5.00	4.00	1.00	0,085
2	0.17	1.00	3.00	0.17	0.13	0.25	0.33	2.00	0.20	0.17	
3	0.13	0.33	1.00	0.50	0.20	0.33	0.20	1.00	0.20	0.20	
4	0.25	6.00	2.00	1.00	0.17	0.25	0.25	2.00	0.50	0.25	
5	1.00	8.00	5.00	6.00	1.00	4.00	3.00	6.00	4.00	1.00	
6	0.33	4.00	3.00	4.00	0.25	1.00	0.20	3.00	0.50	0.25	
7	0.33	3.00	5.00	4.00	0.33	5.00	1.00	4.00	1.00	0.20	
8	0.20	0.50	1.00	0.50	0.17	0.33	0.25	1.00	0.20	0.25	
9	0.25	5.00	5.00	2.00	0.25	2.00	1.00	5.00	1.00	0.33	
10	1.00	6.00	5.00	4.00	1.00	4.00	5.00	4.00	3.00	1.00	

де 1 – Метод на основі статистичного критерію; 2 – Метод системної динаміки; 3 – Метод Колмогорова; 4 – Метод багатокритеріальної оптимізації; 5 – Метод аналізу ієрархій; 6 – Метод аналітичних мереж; 7 – Метод регресійного аналізу; 8 – Метод адаптивного балансу впливів; 9 – Метод просторово-частотного аналізу; 10 – Метод фрактального аналізу.

Проводиться нормалізація і оцінюються вектори пріоритетів, з огляду на їх вплив на складові попереднього рівня. Такі матриці порівнянь потрібно побудувати для кожної альтернативи на другому рівні порівнянь відносно спільної мети на першому рівні і т. д. Відбувається порівняння не за абсолютними значеннями, а за ступенем відносної переваги за кожним параметром. Ця процедура застосовується на кожному ієрархічному рівні, включаючи останній, де визначаються пріоритети з погляду впливу на передостанній рівень експертних суджень.

Далі обчислюються компоненти власного вектора матриці. З отриманих груп матриць визначаються нормальні оцінки вектора локальних пріоритетів. Після того як компоненти власного вектора отримані для всіх рядків матриці, їх можна використовувати для подальших обчислень. Одночасно з матрицею парних порівнянь оцінюється ступінь відхилення від узгодженості отриманих локальних пріоритетів (CR). Для розрахунку CR було використано таке рівняння:

$$CR = CI/RCI, \qquad (1)$$

де *RCI* – індекс випадкової узгодженості, для розрахунку його значень використовуються стандартні дані за Сааті (Сааті Т., 1993); *CI* – індекс узгодженості, який розраховується за допомогою рівняння:

$$CI = \frac{\gamma_{max} - n}{n-1}, \qquad (2)$$

де γ_{max} – головне власне значення, n – загальна кількість вхідних шарів, що використовуються в оцінюванні.

У зваженому аналізі за допомогою MAI допустиме значення $CR = 0{,}10$. Якщо CR перевищує 0,10, експертні оцінки потрібно переглянути.

Метод аналізу ієрархій дає змогу сконструювати необхідну цільову функцію й оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи. Якщо отримані всі необхідні вагові коефіцієнти, то формула згортки узагальненого критерію для порівнюваних варіантів має вигляд (3):

$$F = \sum_l K_l^1 \sum_m K_m^2 \sum_r K_r^3 \sum_c K_c^4 \times x_c^b, \qquad (3)$$

де верхній індекс критеріального пріоритету позначає рівень ієрархії, а нижній – індекс сумування на відповідному рівні; x_c^b – коефіцієнт переваги варіанта c за показником b.

Для автоматизації процесу визначення рівня відносного попиту методів системного аналізу для вирішення водогосподарських завдань на основі методології космічного геомоніторингу шляхом обчислень перерахованих вище визначень у цій роботі було використано математичну програму обчислень Hierarchical Analysis Method (Рис. 2).

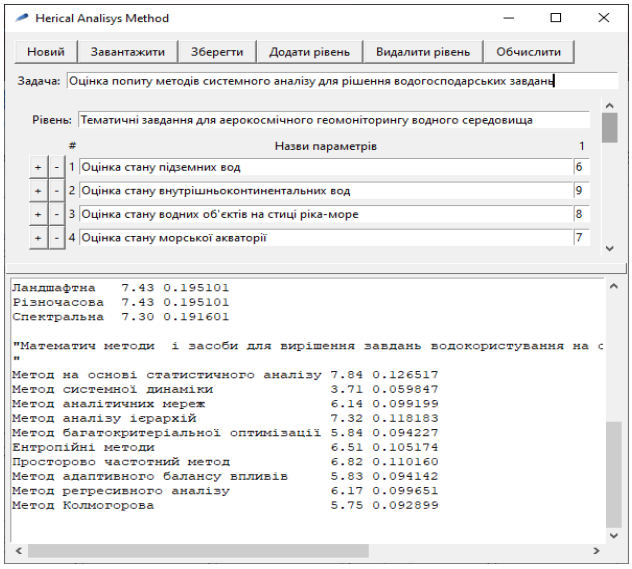


Рис. 2. Вікно програми Hierarchical Analysis Method після введення даних

У результаті було проведено розрахунки на основі експертних суджень, а отримані результати показані на Рис. 3.

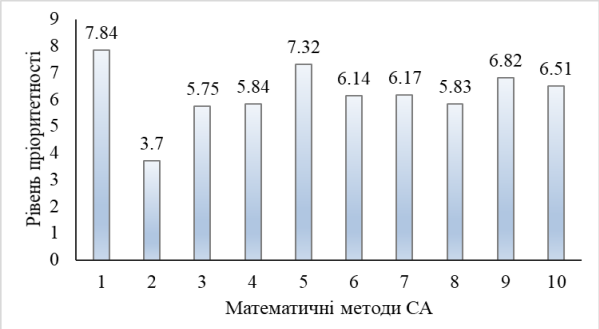


Рис. 3. Результат оцінювання попиту методів системного аналізу для вирішення водогосподарських завдань на основі методології аерокосмічного геомоніторингу: *1 – Метод на основі статистичного критерію; 2 – Метод системної динаміки; 3 – Метод Колмогорова; 4 – Метод багатокритеріальної оптимізації; 5 – Метод аналізу ієрархій; 6 – Метод аналітичних мереж; 7 – Метод регресійного аналізу; 8 – Метод адаптивного балансу впливів; 9 – Метод просторово-частотного аналізу; 10 – Метод фрактального аналізу*

Результати показують, що матриці суджень, використані в аналізі, були достатньо послідовними та точними (*CR* 0,085). Підхід попарного порівняння використовувався для інтеграції тематичних шарів відповідно до їх пов'язаних ваг. За MAI встановлено, що кожен із запропонованих методів досить популярний для вирішення відповідних завдань природокористування, а саме, для оцінювання водних об'єктів. З розгляду графіка та аналізу попередніх досліджень ми бачимо, що дійсно досить часто для оцінювання водних об'єктів використовують метод на основі статистичного аналізу (Fedorovsky O. D., 2021), просторово-частотний метод (Федоровський О. Д., 2017), ентропійні методи (Томченко О. В., 2018) тощо. А от, наприклад, метод системної динаміки частіше використовують для оцінювання стану антропогенних об'єктів, великих агломерацій (Khyzhniak A. V., 2017).

2. Приклади найефективніших математичних методів аерокосмічного геомоніторингу для вирішення водоресурсних завдань

За допомогою методів системного аналізу обґрунтовуються найбільш раціональні математичні моделі використання даних ДЗЗ для вирішення різноманітних тематичних завдань оцінювання стану водних екосистем, моделюється та прогнозується розвиток процесів, що досліджуються. Наведемо приклади застосування трьох математичних методів на різних ділянках водойм України, зокрема озера системи Опечень в м. Києві, дельти Дніпра та Дунаю (Рис. 4).

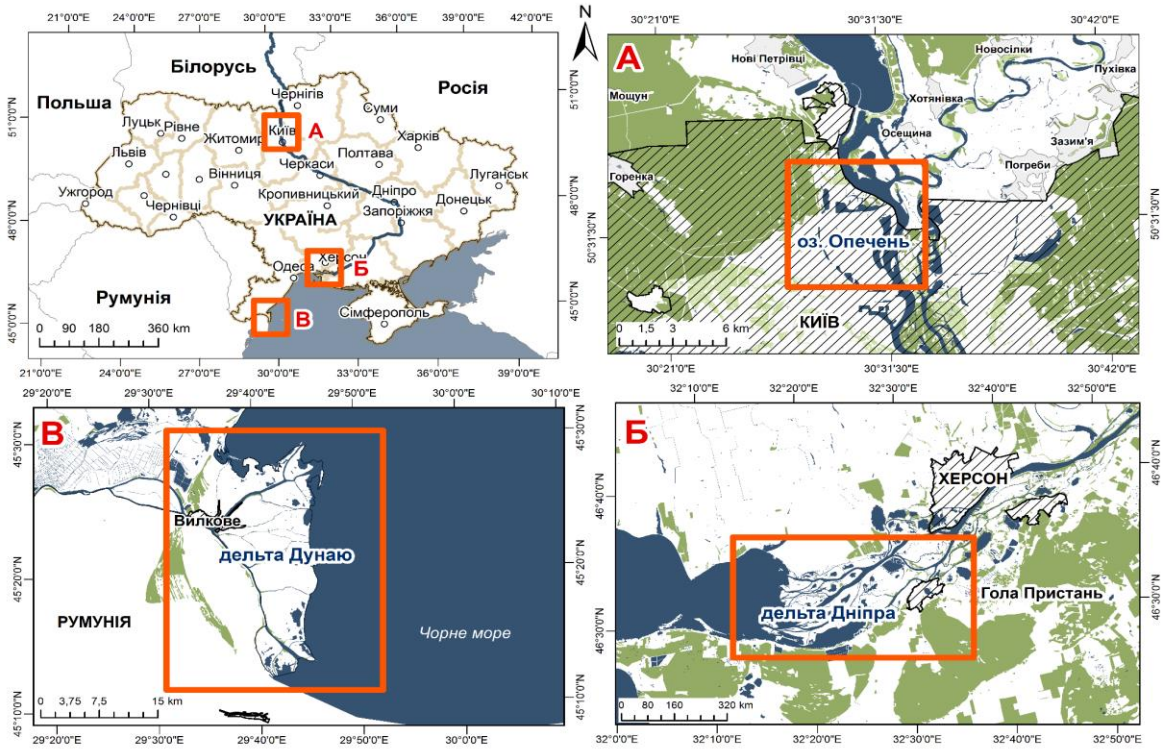


Рис. 4. Оглядова карта розташування водойм, досліджених методами системного аналізу

2.1. Використання методу на основі статистичного критерію для оцінювання стану озер в м. Києві

Для комплексного оцінювання стану міського водного середовища на прикладі озера Кирилівське системи озер Опечень в м. Києві (Рис. 5) викладено результати застосування ймовірнісно-статистичних методів. Зокрема, для детального оцінювання якості водного середовища використовували дані індексованих зображень. За цими даними на основі методу статистичного критерію побудовано картографічне представлення якості водного середовища. Таким чином були отримані важливі дані про екологічний стан озера та його зміну в часі, що важливо для прийняття обґрунтованих рішень з управління водними ресурсами.

Рис. 5. Вигляд озер системи Опечень на космічному знімку Sentinel-2

Для вирішення завдання ідентифікації класів об’єктів за результатами вимірювання їх інформативних ознак у дослідженні (Arkhipov A. I., 2018) застосовано ймовірнісно-статистичний метод. Основна ідея полягає у використанні статистичного критерію (4) для автоматичного обчислення ймовірностей належності досліджуваного об’єкта до певних еталонних класів:

$$C_q = \frac{p_q(\bar{X})}{\sum_{q=1}^{Q} p_q(\bar{X})}, \quad (4)$$

де

$p_q(\bar{X}) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{K}{2}} \prod_{k=1}^{K} e^{-\frac{(L_k - L_{q,k})^2}{2\cdot\sigma_{q,k}}}$ – багатовимірна щільність розподілу;

$L_{q,k} = \frac{1}{N_q} \cdot \sum_{n=1}^{N_q} L_{q,k,n}$ – середнє значення спектральних яскравостей;

$\sigma_{q,k} = \left[\frac{1}{N_q} \cdot \sum_{n=1}^{N_q} \left(L_{q,k,n} - L_{q,k}\right)^2\right]$ – середнє значення дисперсії;

вихідні дані:

Q – кількість класів об’єктів, що підлягають розпізнаванню;

q – поточний номер (індекс) конкретного класу об’єктів;

K – кількість інформативних ознак, що використовуються;

k – поточний номер конкретної інформативної ознаки;

L – результат конкретного вимірювання інформативної ознаки (вектор розмірності K з координатами $L_1,...L_k$);

N_q – об’єм вибірки для випадкової величини $L_{q,k}$;

n – поточне значення;

$t = (t_1,t_2,\ldots,t_k)$ – об’єкти, що підлягають класифікації.

Для апробації запропонованого методу територію озера було поділено на ділянки у вигляді сітки з площами 50х50 м. Кожній ділянці були присвоєні середні значення яскравості пікселів в окремому каналі та значення вхідних даних. Для отримання вхідних даних кожному класу об’єктів були визначені інформативні ознаки. Зібрані дані були сформовані у вигляді електронних таблиць, де кожен рядок відповідає результатам вимірювань, а кожен стовпчик – значенням ознак для кожної з 80 досліджуваних ділянок. Дані були переведені у формат .txt для подальшої обробки. Було обчислено значення ймовірностей належності досліджуваного об’єкта до кожного еталонного класу за допомогою формули (4). На основі експертних даних та наземної статистичної інформації були виділені ділянки-еталони, по 5 еталонів для кожного типу якості води (Рис. 6). На основі отриманих даних були створені матриці інформативних ознак для досліджуваних та еталонних ділянок.

Автоматизація роботи методу на основі статистичного критерію значно підвищила ефективність та достовірність розпізнавання та класифікації об’єктів на аерокосмічних знімках.

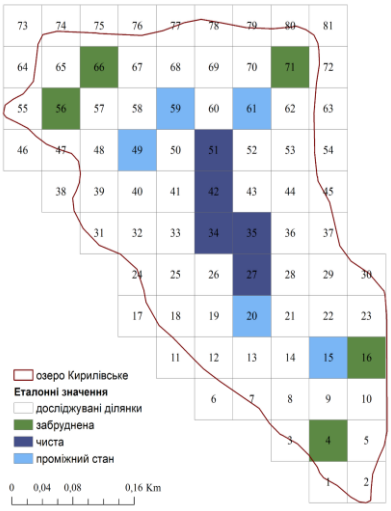


Рис. 6. Приклад вибору референтних ділянок якості води Кирилівського озера. Вибрані типи стандартів для дослідних ділянок: умовно “погана” вода, умовно “добра” вода, умовно “середня” вода

Цей процес реалізовано за допомогою спеціально створеного програмного комплексу, який автоматично розраховує ймовірності належності досліджуваних об’єктів до еталонних класів. Основні етапи і принципи роботи цього комплексу:

1. У програмний комплекс вводяться інформативні ознаки всіх еталонних класів об’єктів. Ці ознаки є апріорними і базуються на експертних даних та наземній статистичній інформації.

2. Програмний комплекс автоматично обчислює ймовірності належності кожного досліджуваного об’єкта до всіх присутніх на знімку об’єктів-еталонів за допомогою раніше згаданої формули (4). Це дає змогу швидко визначати клас об’єкта.

3. Порогове значення ймовірності визначається для кожного досліджуваного об’єкта. Якщо ймовірність належності до певного еталонного класу перевищує це порогове значення, об’єкт класифікується як представник цього класу.

4. Кінцевий клас досліджуваних об’єктів визначається за максимальним значенням імовірності належності до певного об’єкта-еталона.

5. На основі отриманих результатів створюється карта, що відображає стан озера за досліджуваний період. Карта ілюструє зміни екологічного стану озера залежно від температури та інших факторів (Рис. 7).

На прикладі оцінювання стану озера, результати дослідження показали, що екологічний стан озера змінюється залежно від місяця дослідження та температури води. У теплі місяці спостерігається зниження якості водного середовища. Також наочно продемонстровано, що якість води покращується зі збільшенням відстані від берегової лінії та з глибиною озера. Отже, запропонована методика виявилася адекватною для оцінювання екологічного стану водних об’єктів і може бути використана для таких досліджень в майбутньому.

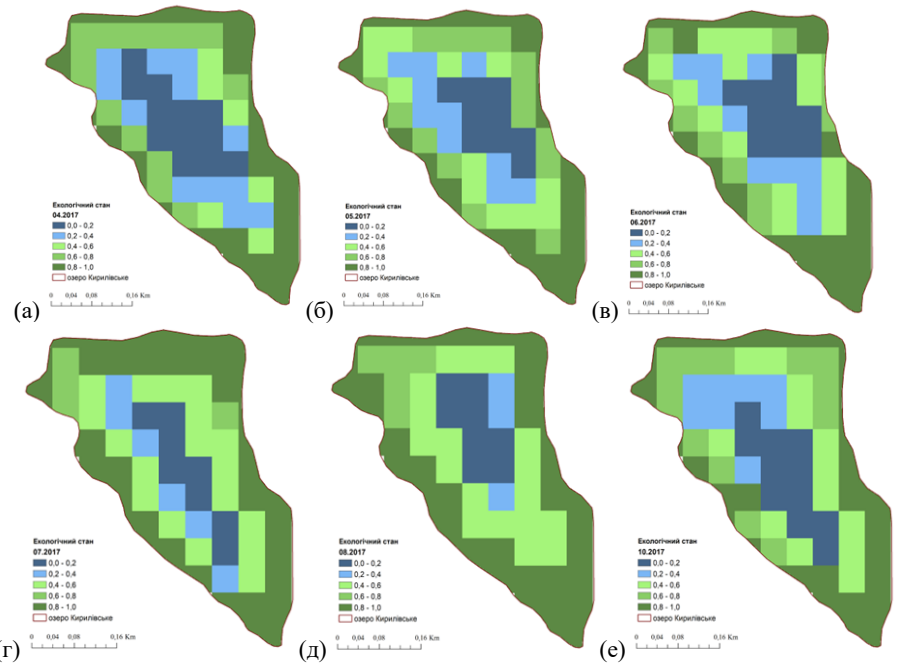


Рис. 7. Карти результатів детального екологічного оцінювання стану водного середовища Кирилівського озера станом на (а) 03.04.2017, (б) 03.05.2017, (в) 05.06.2017, (г) 20.07.2017, (д) 11.08.2017 та (е) 18.10.2017

Висновки щодо методу на основі статистичного критерію: у світлі зростаючої обізнаності про контроль забруднення води та прагнення зберегти високу якість озер, метод, описаний у цьому дослідженні, ймовірно, стане цінним інструментом для оцінювання якості води. Переваги дистанційного зондування для оцінювання якості води в озерах полягають у можливості збору даних з важкодоступних районів, отриманні кількісних і якісних даних, які доповнюють дорогий і тривалий наземний збір даних, а також доступі до архівних даних за період роботи супутників. Метод на основі статистичного критерію дав змогу створити картографічні відображення змін якості водного середовища на основі індексованих зображень індексу озера NDPI, індексу каламутності NDTI, індексу водоростей NDAI та температурних карт реперних ділянок водойми.

Ця методологія забезпечить міські екологічні служби та відповідальних осіб об'єктивною, надійною та оперативною інформацією. Крім того, її можна легко інтегрувати в інформаційні системи підтримки розумного міста. Майбутні дослідження включатимуть уточнення індексів, інтеграцію наземних і дистанційних даних, а також детальний аналіз впливу прилеглих територій на водні об'єкти.

2.2. Використання методу просторово-частотного аналізу для аналізу домінуючих напрямків гирлових потоків дельтових зон Дніпра та Дунаю

Відомо, що під час дешифрування космічних знімків поряд з оптичними спектральними ознаками використовують структурні та текстурні параметри зображень, що дає змогу витягувати більший обсяг інформації. Однією з інформативних ознак структурних характеристик зображення об'єктів є їхній просторово-частотний спектр (ПЧС) (Федоровський О. Д., 2002). Зміні яскравості та координат точок у площині зображення об'єкта в термінах спектрального аналізу відповідає зміна амплітуди та фази за просторовими частотами. Скористаємося для оцінювання водних потоків гирлових областей методологією просторово-частотного аналізу.

Зображенню водного об'єкта, що має певну структуру, відповідає ПЧС, що характеризується сумою просторових складових (гармонік) з відповідними амплітудами і фазовими зсувами між цими складовими. Як ПЧС найчастіше використовується двовимірний спектр Фур'є. Складові ПЧС – $C(n,m)$ обчислюються за методом дискретного двовимірного перетворення Фур'є за виразом (Рабинер Л., 1978):

$$C(n,m)=\frac{1}{A\cdot B}\sum_{x=0}^{A-1}\sum_{y=0}^{B-1}D(x,y)\cdot\exp-\left[(nx/A)+(my/B)\right], \quad (5)$$

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

Для визначення напрямку лінійних елементів зображення використовується залежність нормованої азимутальної спектральної щільності (АСЩ) енергетичного спектра від кутового напрямку Θ. АСЩ обчислюється за формулою (6):

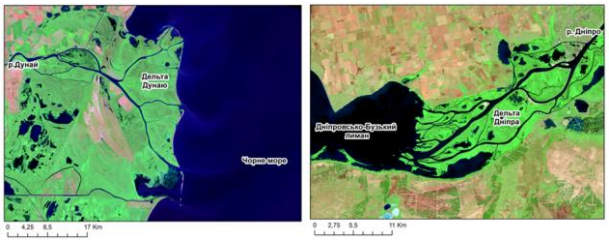
$$S(\Theta)=\int_0^{\infty}\int_{\Theta-\Delta\Theta}^{\Theta+\Delta\Theta}S(\Theta,r)\cdot dr\cdot d\Theta, \quad (6)$$

де $S(\Theta, r)$ – значення енергетичного спектра зображення в точці (Θ, r); $\Theta=\operatorname{arctg}\left(N_y/N_x\right)+\pi/2$ – кут напрямку двовимірної частоти в полярних координатах, зміщений на 90°; N_x, N_y – проєкції

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.

Якщо у вихідному зображенні дельтових областей річок є протяжні структури різного спрямування, то буде спостерігатися розширення ПЧС у напрямках, перпендикулярних найбільшій їх протяжності. В цьому випадку для амплітудного спектра, перетвореного в полярні координати, визначається азимутальна спектральна щільність за напрямками. Кути, що відповідають напрямкам з локальними максимальними значеннями амплітудної складової, вказують домінуючі напрямки протяжних елементів. Це показує можливість виявлення за допомогою двовимірних перетворень Фур'є напрямку розвитку і потужність лінійних елементів на космічних зображеннях гирлових областей річок.

Запропонований підхід був використаний для аналізу домінуючих напрямків гирлових потоків Дунаю та Дніпра (Рис. 8).

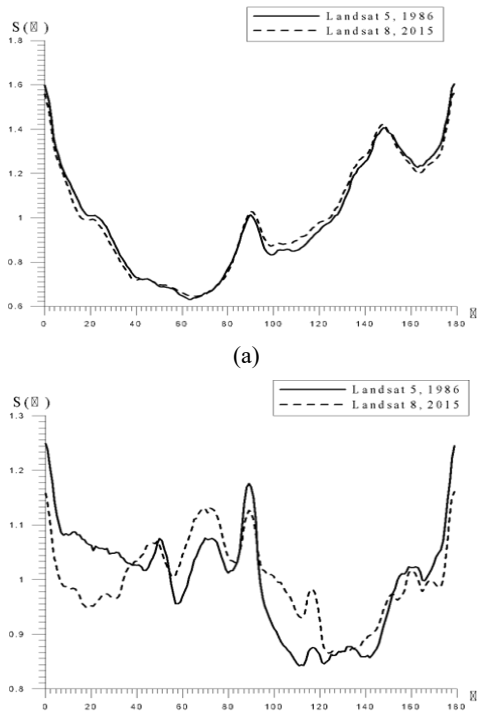


(а) (б)

Рис. 8. Вигляд території дослідження гирлових потоків дельтових зон: (а) – дельта Дніпра на супутниковому знімку Landsat 8; (б) – дельта Дніпра на супутниковому знімку Landsat 9

Дельта Дунаю є прикладом одного з найбільших у світі плавнево-літоральних ландшафтів і при цьому має цілісний набір еколого-ценотичних ознак, що характеризують її як перехідне природне утворення – екотон, типу "річка-море". Як відомо, такі функціональні об'єкти відіграють в біосфері одну з найважливіших ролей, як зони контакту енергомасового взаємообміну і підвищеної концентрації всіх проявів життя, зокрема підвищеного біорізноманіття, посиленої активності еколого-фізіологічних, біопродукційних і всіх інших процесів функціонування екосистем. При цьому, дельта Дунаю, як і інші подібні їй об'єкти, перебуває нині під посиленим антропогенним впливом як на локальному, регіональному, так і на глобальному рівнях. Таке поєднання біосферної ролі цього унікального природного комплексу і його сучасного положення в природно-екосистемно-господарській структурі регіону висуває нагальну потребу у першочерговому вивченні цього комплексу на загальноекологічному рівні з виявленням максимально можливої кількості еколого-ценотичних взаємозв'язків і закономірностей, і вироблення на цій основі системи практичних заходів з підтримки екосистемної стійкості.

На Рис. 9 наведено графік азимутального розподілу ПЧС *S*(Θ), обчислений відповідно до (б).

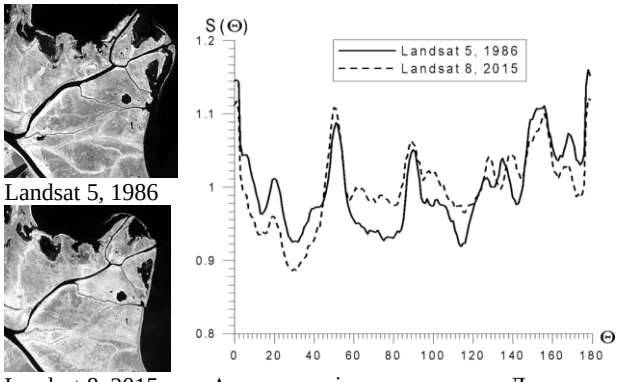


(а)

(б)

Рис. 9. Аналіз домінуючих напрямків гирлових потоків Дніпра (а) та Дунаю (б). Азимутальні спектри Кілійської дельти Дунаю за (1 – 1986, 2 – 2015 рр.)

При зіставленні графіка 9а із зображенням дельти Кілійського рукава Дунаю на космічному знімку можна відзначити, що основним потокам відповідають піки ПЧС під кутами 30°, 65° і 130°–170°, причому енергетично досить насичені, що вказує на переважання нижчих частот. Пік ПЧС у районі 90°–100°, очевидно, відповідає вертикально розташованій на космічному знімку береговій лінії (Рис. 10, 11).



Landsat 5, 1986

Landsat 8, 2015 Азимутальні спектри дельти Дунаю

Рис. 10. Аналіз домінуючих напрямків гирлових потоків Дунаю (фрагмент у верхній частині)

Виявлені зміни в Кілійській дельті Дунаю можна пояснити тим, що у зв'язку зі скороченням за останні 10 років твердого стоку Дунаю через будівництво гребель на річці та її притоках, з перерозподілом стоку води і наносів з Кілійського рукава в Тульчинський і виходом Кілійської дельти на великі глибини, інтенсивність її висунення в море скоротилася (порівняно з початком XX ст.) майже в 10 разів.

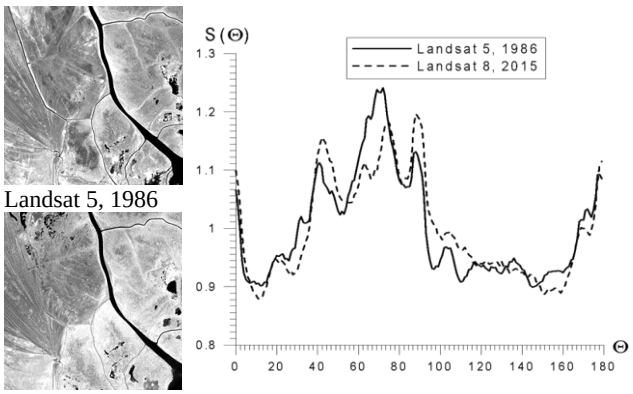


Рис. 11. Аналіз домінуючих напрямків гирлових потоків Дунаю (фрагмент у нижній частині)

Певну роль відіграло і підвищення рівня Чорного моря. Утворення нових рукавів у дельті припинилося, навпаки, спостерігається відмирання багатьох бічних водотоків. При цьому, з двох суміжних рукавів, як правило, активізується більш водоносний і короткий рукав.

Наслідком перерозподілу стоку між рукавами, відмирання одних і активізації інших, є поперечний зсув русла головного рукава в кожному вузлі розгалуження, оскільки в міру відмирання бічного рукава кут його відділення швидко збільшується, а кут продовження головного русла зменшується. Як наслідок, русло головного рукава нижче вузла розгалуження зміщується в бік берега, від якого відходить відмираючий рукав, а вище вузла розгалуження – в протилежну сторону. До викривлення русел призводить і зміщення вниз за течією бічних перекатів, які знаходяться у витоках невеликих рукавів.

Висновок щодо методу просторово частотного аналізу: розглянутий приклад використання індексів варіабельності на фактичних даних АЛК відкриває нові можливості для виявлення загальних тенденцій змін, що відбуваються у водяних екосистемах і може стати основою їхнього комплексного моніторингу на якісно новому рівні. Використання двовимірних просторово-частотних спектрів Фур'є дає змогу значно збільшити обсяг одержуваної інформації з гідрологічних параметрів водних мас, зокрема, характеру домінуючих течій і їх інтенсивності, особливостей перерозподілу водних потоків і принесених ними в гирлові області забруднень.

2.3. Використання методу фрактального аналізу для оцінювання варіабельності складових Кілійського гирла Дунаю

Нижче наведено приклад використання методу мультифрактального аналізу матеріалів космічного знімання для оцінювання варіабельності складових плавнево-літорального ландшафту гирлових областей річок на прикладі Кілійського гирла Дунаю. В дослідженні використовувалися статистичні дані аквально-ландшафтних комплексів (АЛК), які сформувалися в Кілійській частині дельти Дунаю, отримані на основі обробки космічних знімків середнього просторового розрізнення КА Landsat 5, 8 за 1985 та 2015 рік, а саме, літні знімки кінця червня, початку вересня – час максимального розвитку угруповань макрофітів.

Оскільки гирлові області річок мають самоподібну ієрархічну структуру, тобто фрактальну, яка складається з повторюваних на різних структурних рівнях складових природного ландшафту, застосування мультифрактального аналізу для дослідження варіабельності складових дельтових територій є обґрунтованим. Такий підхід дає змогу виявити закономірності та аномалії у просторовій організації ландшафту, що важливо для розуміння процесів формування та еволюції дельт.

Зокрема, мультифрактальний аналіз допомагає оцінити ступінь складності та неоднорідності ландшафтних структур, враховуючи різні масштаби просторової організації. Це актуально для дельтових територій, де взаємодія різних природних процесів, таких як річкова ерозія, осадонакопичення та морські динамічні процеси, призводить до утворення складних і різноманітних ландшафтних форм. А дослідження на базі даних космічного знімання та геоінформаційних систем дають змогу проводити детальний аналіз змін у конфігурації дельтових утворень, оцінювати їх стабільність та прогнозувати можливі зміни в майбутньому (Хижняк А. В., 2017).

Для характеристики відхилення розподілу деякої величини від рівномірного використовуються формула узагальненої ентропії Рені, що заснована на моментах q-го порядку ймовірностей p_i:

$$S_q = \frac{1}{1-q}\log\sum_{i=1}^{N} p_i^q, \tag{7}$$

$$p_i = \frac{N_i}{N},\ \sum_{i=1}^{n} p_i = 1, \tag{8}$$

де N – загальний обсяг вибірки (загальна кількість складових на вибраній площі), N_i – кількість i-го типу складових у вибраній площі N, n – кількість всіх типів складових, число яких залежить від N; p_i – імовірність належності цього типу складової у вибірці до i-го типу, q – ступінь моменту (статистичної суми), яка приймає цілочисельні значення в діапазоні – $q_{\max} < q < q_{\max}$, $q_{\max} > 0$.

Для визначення варіабельності різноманітних ландшафтних складових дельти вводиться узагальнена статистична сума Z_q (моменти q-го порядку ймовірностей p_i), яка дає змогу відрізнити нерівномірні розподілення складових від рівномірних:

$$Z_q(N,q) = \sum_{i=1}^{n} p_i^q \propto N^{\tau(q)}. \tag{9}$$

У виразі (9) показано, що основна умова статистичної самоподібності (мультифракталу) є міра, яка пропорційна розміру вибірки в степені $\tau(q)$. В логарифмічному масштабі можна подати лінійною залежністю:

$$\log\left[Z_q(N,q)\right] = \tau(q)\log N,$$

$$\tau(q) = \frac{\log\left[Z_q(N,q)\right]}{\log N} = \frac{\log\sum_{i=1}^{n} p_i^q}{\log N}, \tag{10}$$

де N – обсяг генеральної вибірки.

Для визначення варіабельності різноманітних складових і оцінення ступеня відхилення їх від рівномірного розподілу за типами скористаємося узагальненими мультифрактальними розмірностями:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1-q}, \text{ при } q \neq 1. \qquad (11)$$

Функція D_q, визначена виразами (10) і (11), показує наскільки неоднорідним є розподіл АЛК за типами і наскільки цей розподіл відрізняється від рівномірного. Функція D_q носить назву *спектра узагальнених розмірностей Реньї мультифракталу*. При $q \to +\infty$ основний внесок у суму відносних значущостей вносять домінуючі типи АЛК, що характеризуються найбільшими значеннями p_i, а при $q \to -\infty$ основний внесок роблять складові суми з малими значеннями p_i, тобто рідкісні типи складових ландшафту або АЛК. На практиці обмежуються розглядом не більше десяти значень цілих чисел q, що і прийнято в цій роботі.

Якщо розподіл складових за типами неоднаковий, то фрактал є неоднорідним, тобто мультифракталом і для цього опису використовують спектр узагальнених фрактальних розмірностей D_q. Значення D_q – інваріантне до розміру вибірки (площі, масштабу).

Існування мультифрактальної структури гирлових областей річок встановлюється перевіркою виконання двох необхідних умов розподілу за типами:

ступенева залежність росту компонентів мультифрактальної міри μ_q від розміру вибірки N;

незростаючий вигляд функції спектра узагальнених розмірностей D_q.

Варіабельність АЛК на основі космічної інформації ДЗЗ за 1985 та 2015 рр. оцінювалась на основі індексів варіабельності узагальнених розмірностей Реньї, як інтегральних оцінок. У розглянутому аспекті індекси дають змогу оцінити динаміку мінливості АЛК. За співвідношенням визначаються розподіл імовірностей p_i статистичної суми Z_q та значень $\tau(q)$ за типами складових за весь досліджуваний період.

Запропонований метод реалізований на прикладі Кілійського гирла Дунаю, і отримані результати відображають таке:

1. Розподіл імовірностей p_i показує, як різні типи ландшафтних комплексів представлені у дельті. Зміни у цих імовірностях між 1985 та 2015 роками можуть вказувати на перетворення у структурі ландшафту, такі як зміна річкових русел, осадонакопичення або ерозійні процеси.

2. Статистична сума Z_q дає змогу кількісно оцінити варіабельність ландшафтних комплексів. Підвищені значення Z_q свідчать про більшу неоднорідність та складність структури ландшафту.

3. Значення $\tau(q)$ від q показує фрактальну природу розподілу ландшафтних комплексів. Нелінійність цієї залежності вказує на мультифрактальну структуру, що є характерною для складних природних систем. Відхилення від лінійної залежності підкреслює значну варіабельність у розподілі складових за типами. На рис. 12 а показано нелінійний характер залежності $\tau(q)$, отриманої при дослідженні розподілу АЛК за типами на прикладі Кілійської дельти Дунаю.

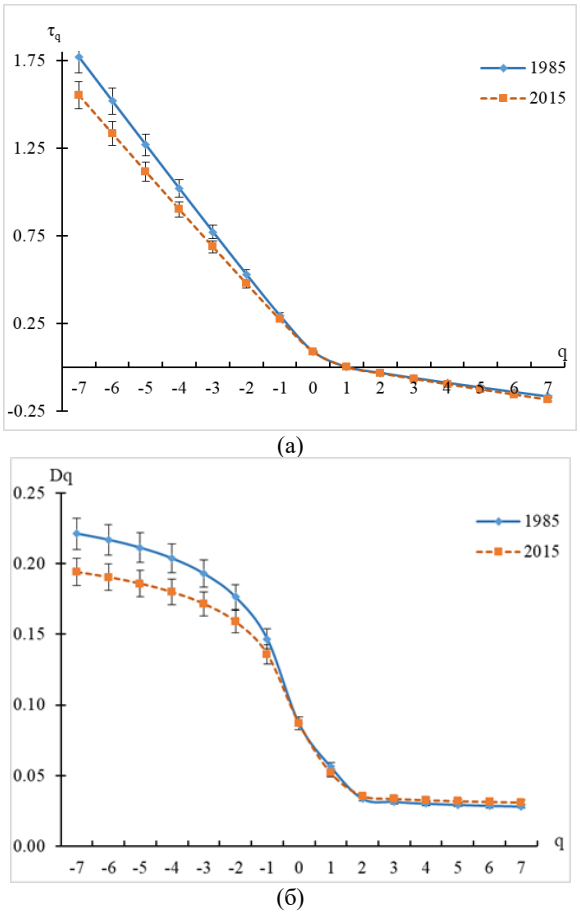


Рис. 12. Оцінка варіабельності за матеріалами дешифрування даних ДЗЗ: (а) – графіки залежності показника степеня τ від q; (б) – графіки функцій D_q, $q \in [-7,7]$

На рис. 12 б наведено результати обчислення динаміки інтегральних оцінок варіабельності АЛК за період 1985–2015 рр. Із розгляду графіків (Рис. 12) можна зробити висновок, що максимальна варіабельність за аналізований період часу проявляється при від'ємних значеннях q індексів D_q. Найбільш чутливими до екологічних процесів є нечисленні типи складових, а саме виділені за матеріалами ДЗЗ угруповання плейстофітів та піщані коси.

Висновок щодо методу фрактального аналізу: ці результати підкреслюють важливість використання мультифрактального аналізу для детального дослідження динаміки ландшафтних змін у дельтових областях. Застосування цього підходу дає змогу краще розуміти процеси, що впливають на еволюцію ландшафту, і може бути корисним для планування заходів щодо збереження та управління природними ресурсами дельти. Таким чином, мультифрактальний аналіз є ефективним інструментом для комплексного дослідження складних природних систем, таких як дельтові області річок, забезпечуючи глибше розуміння їхньої структури та динаміки.

Висновки

Оцінено попит математичних методів аерокосмічного моніторингу для дослідження водних об'єктів.

Наведено приклади використання математичних методів для дослідження водних об'єктів.

Оцінювання затребуваності можна використати для інших напрямів досліджень.

Отримано оцінку попиту методичних засад і засобів методології аерокосмічного геомоніторингу у вирішенні завдань водокористування.

Наведено приклад апробації математичних методів методології аерокосмічного геомоніторингу у вирішенні конкретних тематичних завдань природокористування, а саме результати використання таких методів:

методу на основі статистичного критерію для оцінювання стану урбанізованих водойм;

методу просторово-частотного аналізу для аналізу домінуючих напрямків гирлових потоків дельтових зон Дніпра та Дунаю;

методу фрактального аналізу для оцінювання варіабельності складових плавнево-літорального ландшафту гирлових областей річок на прикладі Кілійського гирла Дунаю.

Наведені приклади використання матеріалів ДЗЗ для оцінювання стану водних екосистем свідчать про те, що космічна інформація дає змогу реєструвати багато процесів і явищ, спостереження яких у наземних умовах або неможливе, або пов'язане зі значними матеріальними витратами.

Література:

Arkhipov, A. I., Glazunov, N. M., Khyzhnyak, A. V. (2018). Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54(1), 94–98. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0010-7.

Fedorovsky, O. D., Khyzhniak, A. V., Tomchenko, O. V. (2021). Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. *Space Sci. & Technol.*, 27(5), 11–18. https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011.

Khyzhniak, A. V., Tomchenko, O. V., Porushkevych, A. Yu. (2017). Application of the remote sensing in environmental management as the interdisciplinary approach,. *Central European Researchers Journal*, 3(1), 34–42.

Даргейко, Л. Ф., Сахацкий, А. И., Федоровский, А. Д. (2008). Оценка влажности почвы по космическим снимкам дистанционного зондирования Земли на основе метода пространственной интерполяции Колмогорова. *Геоінформатика,* 4, 49–51.

Рабинер, Л., Гоулд, Б. (1978). *Теория и применение цифровой обработки сигналов*. Москва: Мир.

Саати, Т. (1993) *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь.

Соколовська, А. В., Томченко, О. В., Порушкевич, А. Ю., Федоровський, О. Д., Якимчук, В. Г. (2015). Методи системного аналізу в дистанційних аерокосмічних дослідженнях екологічної безпеки та природокористування. *Екологічна безпека та природокористування*, 2(18), 95–102.

Томченко, О. В. (2014а). Використання методу багатокритеріальної оптимізації матеріалів ДЗЗ та наземних даних для оцінки екологічного стану Київського водосховища. *Екологічна безпека та природокористування*, 15, 31–39.

Томченко, О. В. (2014б). Використання космічної інформації ДЗЗ та наземних спостережень для комплексної оцінки екосистемних послуг Київського водосховища на основі методу аналізу ієрархій. *Космічна наука і технологія*, 20, 5(90), 41–49. https://doi.org/10.15407/knit2014.05.041.

Томченко, О. В., Соколовська, А. В., Федоровський, О. Д. (2015). Моделювання екологічного стану антропогенних ландшафтів на основі космічного геомоніторингу. *Геоінформатика,* 1(53), 77–84.

Томченко, О. В., Хижняк, А. В., Дьяченко, Т. М., Федоровський, О. Д. (2018). Оцінка варіабельності ландшафтних складових гирлових областей річок (на прикладі Ананькіного кута). *Доповіді національної академії наук України*, 2, 85–92. https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.085.

Федоровский, А. Д., Даргейко, Л. Ф., Дьяченко, Т. Н., Якимчук, В. Г. (2000). К вопросу оценки экологического состояния аквально-наземных ландшафтных комплексов на основе системного подхода. *Доповіді Національної академії наук,* 5, 129–131.

Федоровский, А. Д., Сиренко, Л. А., Суханов, К. Ю., Якимчук, В. Г. (2002). Спектральные и пространственно-частотные информативные признаки дешифрирования водных ландшафтов на аэрокосмических снимках. *Гидробиол. журн.,* 38(1), 87–95.

Федоровський, О. Д., Хижняк, А. В., Томченко, О. В., Зуб, Л. М., Підгородецька, Л. В., Дьяченко, Т. М., Шевченко, А. М., Власова, О. В., Ходоровський, А. Я. (2015). Мультидисциплінарний аналіз аерокосмічної і наземної інформації при оцінці стану водних екосистем на основі методів системного аналізу. *Український журнал дистанційного зондування Землі,* 7, 27–42. http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/61/79.

Федоровський, О. Д., Хижняк, А. В., Дьяченко, Т. М., Якимчук, В. Г., Підгорняк, Д. Л., Суханов, К. Ю., Томченко, О. В. (2017). Космічний моніторинг водних потоків гирлових областей річок (на прикладі Дніпра та Дунаю). *Космічна наука і технологія,* 23(2), 11–16. https://doi.org/10.15407/knit2017.02.011.

Хижняк, А. В., Томченко, О. В., Дьяченко, Т. М., Федоровський, О. Д. (2017). Мультифрактальний аналіз складових плавнево-літорального ландшафту Кілійського гирла Дунаю на основі космічної і наземної інформації. *Екологічна безпека та природокористування*, 3–4(24), 124–132. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2017.2.

Хижняк, А. В., Федоровський, О. Д. (2020). Методичні засоби системного аналізу як складові методології аерокосмічного геомоніторингу розв'язання природоресурсних і екологічних завдань. *Системні дослідження та інформаційні технології*, 2, 27–40. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2020.2.02.

Reference

Arkhipov, A. I., Glazunov, N. M., Khyzhnyak, A. V. (2018). Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54(1), 94–98. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0010-7.

Dargeyko, L. F., Sakhatsky, A. I., Fedorovsky, A. D. (2008). The Evaluation of Soil Moisture by Satellite Data on the Basis of the Kolmogorov Spatial Interpolation Method. *Geoinformatics*, 4, 49–51 (in Ukrainian).

Fedorovsky, A. D., Sirenko, L. A., Sukhanov, K. Yu., Yakimchuk, V. G. (2002). Spectral and spatial-frequency informative features of interpretation of water landscapes

on aerospace photographs *Hydrobiol. J.*, 38(1), 87–95 (in Ukrainian).

Fedorovsky, O. D., Khyzhniak, A. V., Tomchenko, O. V. (2021). Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. *Space Sci. & Technol.*, 27(5), 11–18. https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011.

Fedorovsky, A. D., Dargeyko, L. F., Dyachenko, T. M. (2000). On the issue of assessing the ecological state of aquatic-terrestrial LC based on the system approach. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, 5, 129–131 (in Ukrainian).

Fedorovskyi, O. D., Khyzhniak, A. V., Tomchenko, O. V., Zub, L. M., Pidhorodetska, L. V., Diachenko, T. M., Shevchenko, A. M., Vlasova, O. V., Khodorovskyi, A. Ya., Yakymchuk, V. H. (2015). Multidisciplinary analysis of aerospace and ground information while assessing the staus of water ecosystems based on the methods of system analysis. *Ukrainian journal of remote sensing*, 7, 27–42. http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/61/79 (in Ukrainian).

Fedorovskyi, O. D., Khyzhniak, A. V., Dyachenko, T. M., Yakimchuk, V. G., Pidhorniak, D. L., Sukhanov, K. Yu, Tomchenko, O. V. (2017). Space monitoring of water stream in estuarial areas (by the example of the Dnieper and the Danube), *Space Science and Technology*, 23(2), 11–16. https://doi.org/10.15407/knit2017.02.011.

Khyzhniak, A. V., Fedorovskyi, O. D. (2020). Methodological approaches of system analysis as components of the methodology of aerospace geomonitoring for solving natural resources management and environmental problems. *System research and information technologies*, 2, 27–40. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2020.2.02.

Khyzhniak, A. V., Tomchenko, O. V., Porushkevych, A. Yu. (2017). Application of the remote sensing in environmental management as the interdisciplinary approach,. *Central European Researchers Journal*, 3(1), 34–42.

Khyzhniak, A. V., Tomchenko, O. V., Dyachenko, T. M., Fedorovsky, O. D. (2017). Multifractal analysis of the components flood-littoral landscape of the Danube's Kiliya delta based on space and ground information. *Environmental safety and nature resources*, 3–4(24), 124–132. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2017.2.

Rabiner, L., Gould, B. (1978). *Theory and application of digital signal processing*. Moscow: Mir. (in Russian).

Saati, T. (1993). *Decision Making. The method of hierarchy analysis*. Moscow: Radio and Communication (in Russian).

Sokolovska, A. V., Tomchenko, O. V., Porushkevych, A. Yu., Fedorovsky, O. D., Yakymchuk, V. H. (2015). Methods of system analysis in the remote aerospace researches of the Earth for the ecological security and environmental management. *Environmental safety and nature resources*, 2(18), 95–102.

Tomchenko, O. V. (2014a). Usage of multiobjective optimization of remotely sensed data and in situ measurements for assessing the ecological condition of Kiev reservoir. *Environmental safety and nature resources*, 15, 31–39.

Tomchenko, O. V. (2014). Using remote sensing imagery and ground observations for integrated assessment of the Kyiv reservoir's ecosystem services on the basis of analytical hierarchy process. *Space Science and Technology*, 20, 5(90), 41–49. https://doi.org/10.15407/knit2014.05.041.

Tomchenko, O. V., Khyzhniak, A. V., Dyachenko, T. M., Fedorovsky, O. D. (2018). Assessment of the variability of landscape components of river's mouth areas (by example of the Anankin Lake) *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 85–92. https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.085 (in Ukrainian).

Tomchenko, O. V., Sokolovska, A. V., Fedorovsky, O. D. (2015). Modeling the ecological state of anthropogenic landscapes based on space geomonitoring. *Geoinformatics*, 1(53), 77–84.

MATHEMATICAL METHODS OF AEROSPACE MONITORING, ASSESSMENT OF THEIR DEMAND IN THE STUDY OF NATURAL RESOURCES: PART ONE - WATER BODIES

Oleksandr Fedorovskyi, Anna Khyzhniak, Olha Tomchenko, Kostiantyn Sukhanov

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

The article provides a list of mathematical methods of aerospace monitoring, a method of assessing the demand for thematic tasks of aerospace monitoring, as an example of assessing the demand for mathematical methods in studying water bodies. Examples of the most effective methods for solving the task of researching the state of water resources are given. The use of the analysis method of hierarchies is proposed to assess the demand for methodological principles and tools for solving water use problems based on the methodology of aerospace geomonitoring. The method made it possible to assess the advantages and disadvantages of the considered methodical tools and to obtain a formalized generalized assessment of the level of relative demand for methodical tools for each of them. Based on the obtained results, it was determined that the most effective mathematical methods of aerospace geomonitoring are the method based on a statistical criterion, the method of the spatial-frequency spectrum and fractal analysis. The article provides an example of approbation of the methodological tools of the aerospace geomonitoring methodology for solving specific thematic tasks of water use, namely the result of using the method based on a statistical criterion to assess the state of the urban water environment in the city of Kyiv using the Opechen lake system and Verbne Lake quarry reservoir as an example. It's rare. The considered example of the analysis of the dominant directions of estuarine flows of the delta zones of the Dnipro and the Danube was obtained based on the spatial-frequency spectrum method. The result of the fractal analysis of the assessment of the variability of the components of the fluvial-littoral landscape of the estuarine regions of the rivers is presented using the example of the Kili estuary of the Danube.

Keywords: aerospace geomonitoring, methods of system analysis, water use tasks.

Рукопис статті отримано: 10.09.2024
Надходження остаточної версії: 12.09.2024
Публікація статті: 30.09.2024