



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.246>

УДК 504.4.054:528.88(477.028)

Порівняння різночасових і різнометодичних оцінок екологічного стану водного середовища (на прикладі річки Прип'ять за 1999 та 2022 рр.)

О. Д. Федоровський, О. В. Томченко*, А. В. Хижняк, А. Д. Бондаренко

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

У статті на прикладі річки Прип'ять розглядаються методичні особливості та умови порівняння різночасових і різнометодичних (отриманих різними методами) оцінок екологічного стану водного середовища. Так, з порівняння сучасного екологічного стану (за 2022 р.) річки Прип'ять, визначеного методом статистичного критерію (СК), з екостаном річки у 1999 р., визначеним методом водно-рослинних ландшафтних комплексів (ВРЛК), пропонується сформувати віртуальні еталони методом СК на основі ділянок-еталонів попередніх оцінок екостану річки (1999 р.). Порівняння екологічного стану річки Прип'ять у 2022 та 1999 рр. засвідчило значні зміни у структурі якості води у 2022 р. порівняно з 1999 р., а саме: зменшення брудних ділянок та збільшення помірно забруднених та чистих. Проведене дослідження підтверджує правомірність запропонованого способу порівняння різночасових і різнометодичних оцінок екостану водою.

Ключові слова: екологічний стан водоюми, водно-рослинні ландшафтні комплекси, статистичний критерій.

© О. Д. Федоровський, О. В. Томченко, А. В. Хижняк, А. Д. Бондаренко. 2023

Вступ

Водне середовище є важливим компонентом природи, і його стан має велике значення для збереження екологічної рівноваги та забезпечення життя різних організмів. Однак, стан водних екосистем може зазнавати змін через різні фактори, включаючи забруднення, зміни клімату та антропогенний вплив. У наукових дослідженнях про стан водного середовища використовуються різні методи та підходи. Оцінювати стан водних екосистем можна як в один момент часу, так і в різні його періоди, а також за допомогою різнометодичного підходу. Дослідники використовують різні методики, включаючи біологічні, хімічні та фізичні показники для визначення якості води та її впливу на екосистеми. Різнометодичні оцінки стану водних середовищ мають важливе значення. Вони враховують різні аспекти, такі як гідрохімічні, гідробіологічні та гідрофізичні параметри.

Супутникове зондування дає змогу отримувати дані про температуру поверхні води, концентрацію планктону, вміст органічних та неорганічних речовин у воді, а також інші параметри, які можуть свідчити про забруднення або зміни в екосистемі. Ці дані можна використати для порівняння стану водного середовища в різні періоди часу.

Одним із способів порівняння різночасових оцінок стану водного середовища є аналіз довгострокових даних. Довгострокові спостереження дають змогу виявити тенденції та зміни якості води

протягом десятиліть або навіть століть. Це, своєю чергою, дає змогу оцінити вплив довготривалих процесів, таких, як зміни клімату або зростання забруднення, на водні екосистеми.

Вільний доступ до космічних знімків дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) широкого спектрального діапазону і високої якості, створення нових ефективних методів обробки космічної інформації, а також дефіцит корабельного і наземного забезпечення, стимулює попит на космічні методи ДЗЗ. Водночас, урахування існування безлічі методів оцінювання екологічного стану водних об'єктів, стає актуальним розробка відповідних методичних засобів порівняння різночасових і різнометодичних оцінок стану водного середовища для наступного дослідження динаміки його розвитку (Лялько В. І., 1997).

Мета цієї роботи – обґрунтувати запропонований спосіб порівняння різночасових і різнометодичних оцінок екологічного стану водоюми, на прикладі порівняння результатів оцінювання сучасного стану річки Прип'ять, отриманих методом СК, зі станом річки, визначеним у 1999 р. методом ВРЛК (Федоровський А. Д., 1996).

У статті розглянемо на прикладі річки Прип'ять методичні особливості та умови порівняння різночасових оцінок екологічного стану водного середовища на основі космічної інформації ДЗЗ методом СК у 2022 р. і на основі космічної та наземної інформації методом ВРЛК у 1999 р.

*E-mail: olhatomch@gmail.com

Матеріали та методи дослідження

У період з 1999 по 2022 рр. у ЦАКДЗ ІГН НАН України була виконана науково-дослідна робота “Розробка наукових основ і методів дистанційних досліджень гідрокологічних процесів для розв’язання водоохоронних і водогосподарських завдань з використанням аерокосмічної інформації та системного підходу”. У процесі роботи було досліджено санітарно-екологічний стан річки Прип’ять (Рис. 1) на основі космічного гідромоніторингу і наземних спостережень методом ВРЛК (Лялько В. І., 2002), саме ці матеріали і були використані в нашому дослідженні як вхідні ретроспективні дані екостану р. Прип’ять у 1999 році.



Рис.1. Фрагмент зображення гирлової зони річки Прип’ять на космічному знімку Океан-О за 03.10.1999 р.

Водно-рослинним ландшафтним комплексом називається конкретна ділянка водного об’єкта, на якому зростає група декількох рослинних асоціацій, зовсім незалежних один від одного, і які мають різну структуру та видовий склад (Федоровський А. Д., 1996). ВРЛК служать універсальними індикаторами екологічного стану водних об’єктів. Найбільш чутливою ланкою водних екосистем є вища водна рослинність та її ландшафтні комплекси чи біотопи.

Важливість ролі ВРЛК у формуванні і діагностиці якості води потребує проведення систематичного контролю за їх розвитком. Кожна ділянка ВРЛК складається з характерного для неї набору асоціацій, перелік яких при існуючій просторовій розрізненості космічної апаратури ДЗЗ визначається з наземної та підсупутникової (авіа) інформації. Так, наприклад, зарості рогози й очерету зображуються на знімку у вигляді плям різного розміру і відрізняються інтенсивністю забарвлення контуру. За конфігурацією контуру розпізнаються очерет озерний і сусак зонтичний. Рослинність, що плаває, відрізняється світлим, майже білим кольором контурів, і їхня конфігурація змінюється залежно від складу заростей. Занурена рослинність на знімках виглядає як зернисті розмиті плями сірого кольору, що поступаються за інтенсивністю повітряно-водній рослинності (Федоровський А. Д., 1996).

Еталонні ділянки описуються у вигляді набору записів, кожен з яких включає: географічну назву, гідрологічні характеристики ділянки, перелік асоціацій і займані ними площі. Для визначення належності того чи іншого елемента зображення до конкретного водно-рослинного ландшафтного

комплексу ефективним є застосування математичного апарату нечіткої логіки. У ЦАКДЗ був розроблений алгоритм і складена програма, що дає змогу із заданим ступенем імовірності віднести досліджувану ділянку до визначеного типу ВРЛК на основі структурно-функціональних взаємозв’язків біотичних (характеристики рослинних угруповань) і абіотичних (гідрохімічні показники) елементів акваторіального ландшафту.

Дослідження ретроспективного екостану р. Прип’ять у 1999 році на основі розпізнавання космічного знімка Океан-О за 1999 рік було здійснено за допомогою математичних **методів нечіткої (модальної) логіки**, що дає змогу одночасно враховувати безліч невіддільних властивостей досліджуваного об’єкта, які знаходяться у визначених причинно-наслідкових і функціонально цільових відносинах між собою. Проблема полягає в тому, що у природних умовах гирлових областей річок є багато комбінацій видового складу рослинності, які під впливом зовнішніх факторів безупинно змінюють свою конфігурацію, склад і обумовлюють плавний і безупинний перехід одного типу ландшафту в інший, відповідний новим умовам. При такому підході поняття чіткої належності замінюється поняттям розмитої належності. Наприклад, ділянка може належати одночасно до декількох типів ландшафту, але з різними ступенями належності. Використання такого методу повною мірою відповідає геоботанічним уявленням про безперервність гідрологічних характеристик і видового складу рослинного покриву, що обумовлює плавний перехід одного типу до іншого. Саме тому інструментом алгоритму визначення типів ВРЛК гирла р. Прип’ять у 1999 році було обрано метод нечіткої логіки (Федоровський А. Д., 1996). Зазначені обставини потребують застосування такого експрес-методу, який при класифікації досліджуваних ділянок давав би змогу враховувати не тільки плавний і безупинний перехід одного типу ВРЛК в інший, а й проводити біоіндикацію змін середовища. При традиційному підході до класифікації рослинних ділянок приймається бінарне рішення, наприклад, $m = 1$ – у випадку належності ділянки до конкретного ВРЛК чи $m = 0$ – неналежності. Теорія нечітких множин замінює строгу належність досліджуваної ділянки до будь-якого ВРЛК на безупинну функцію належності до кожного ВРЛК (Федоровський А. Д., 1996, Звенигородський Е. Л., 1994).

У результаті обчислень досліджувані ділянки були віднесені до 12 типів ВРЛК. За розподілом останніх у гирловій зоні річки було дано якісну оцінку хімічного складу води. За останньою за існуючою методикою (Оцінка якості поверхневих вод суші і естуаріїв України КНД 211.1.4.010-94) були виділені ділянки з різною якістю води: гранично-чиста (1 клас); чиста (2 клас); слабо забруднена (3 клас); помірно забруднена (4 клас); брудна (5 клас) (Рис. 2).

Нині у ЦАКДЗ для оцінювання екологічного стану водних об’єктів на основі космічної інформації

ДЗЗ, зокрема і наведеного у статті сучасного екостану Прип'яті у 2022 році, розроблений і використовується **метод статистичного критерію** з віртуальними еталонами (Архипов А. И., 2018).

Метод на основі статистичного критерію з віртуальними еталонами є одним з підходів до оцінювання екологічного стану водойми. Цей метод використовує статистичні критерії для порівняння спостережуваних значень показників якості води з віртуальними еталонами, що використовуються як базові або нормативні значення. У разі дослідження акваторії з різними ділянками якості води одночасно, коли за еталони прийнято декілька об'єктів різного класу з різним набором значень інформативних ознак, кожний досліджуваний об'єкт класифікується шляхом обчислення значення ймовірності його належності до кожного присутнього на аерокосмічному знімку об'єкта-еталона, а належність до конкретного класу визначається за максимальним значенням ймовірності його належності до конкретного об'єкта-еталона відповідного класу, що передбачає апріорне введення інформативних ознак всіх еталонів і автоматичне обчислення значень ймовірності належності кожного досліджуваного об'єкта до присутніх об'єктів-еталонів.

Основна ідея полягає у створенні віртуального еталона на основі статистичних даних про якість води з різних джерел, включаючи дані з моніторингових станцій, референтних ділянок або досліджень. Цей віртуальний еталон може відображати "типовий" стан водойми з погляду показників якості води. Обрана технологія "Віртуальних еталонів" використовується для отримання більшої можливостей у формуванні параметрів еталонів і підвищення точності проведення вимірювань (Красовский Г. Я., 1989). Така технологія використовується для дешифрування космічних знімків та більш обґрунтованого формування еталонів завдяки вибору різних рівнів і параметрів навантаження, відповідно до інформативних ознак досліджуваних об'єктів.

Далі порівнюються спостережувані значення показників якості води з віртуальним еталонами. Автори запропонували використовувати метод СК для визначення статистично значущих різниць між спостережуваними значеннями та віртуальним еталонами.

Методичні основи статистичного критерію з віртуальними еталонами, що реалізує запропонований спосіб, мають вигляд: значення спектральної яскравості $\bar{\xi}_q = (\xi_{q1}, \dots, \xi_{q1t})$ конкретної ділянки досліджуваної території під номером q змінюються від ділянки до ділянки випадково, приймаючи значення в колі своїх середніх значень. Відповідно до цього, вектор $\bar{\xi}_q$ будемо вважати випадковим, координати якого є випадковими нормально розподіленими величинами.

Відповідність вказаних розподілів нормальному встановлюється за вибірковими значеннями за допомогою, наприклад, χ^2 критерію Пірсона або критерію Колмогорова, або 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 – об'єм вибірки для визначення невідомих параметрів випадкової величини, $\xi_{q,k}$, а $\xi_{q,k,n}$ – її вибіркові значення.

Функція $P_{q,k}(t_k)$, яка є густиною 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 багатовимірна густина $P_q(\bar{t})$ розподілу вектора $\bar{\xi}_q$ визначається як добуток

$$P_q(\bar{t}) = P_q(t_1, \dots, t_k) = P_{q1}(t_1) \times \dots \times P_{qk}(t_k) =$$

$$= \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{K}{2}} \prod_{k=1}^K e^{-\frac{(t_k - D_{q,k})^2}{2\sigma_{q,k}^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_{q,k}}.$$

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, відповідає номеру q .

Мета дослідження полягає в тому, щоби вказати критерій, який дасть змогу з високим ступенем упевненості визначити номер q за заданим значенням вектора \bar{X} . При цьому має бути достеменно відомо, що ділянка, яка досліджується, відповідає за номерами $1, \dots, Q$.

Це означає, що із сукупності конкуруючих гіпотез H_q в кількості Q потрібно обрати ту, яка найбільше відповідає набору \bar{X} .

Остаточо отримуємо критерій у вигляді (Федоровский А. Д., 1999):

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

Вхідні дані

Екостан гирлової області р. Прип'ять оцінювався на основі космічних знімків 1999–2022 рр. (Океан-О за 03.10.1999 р., Landsat-5 за 03.10.1999 р. та Landsat-9 за 10.10.2022 р.). Для обробки та інтерпретації даних дистанційного зондування були використані програмний пакет ERDAS IMAGINE (Leuca Geosystem Inc.) та ArcGis. Вхідними ознаками були дані спектральних каналів, а також значення нормалізованого вегетаційного (NDVI) та водного (NWI) індексів. Як дешифрувальні ознаки використано спектральні яскравості, що відображають поверхні виділених класів.

Ідентифікація явищ, процесів, предметів усіх об'єктів, що можуть бути описані кінцевим набором деяких ознак чи властивостей, що характеризують об'єкт, є основною задачею розпізнавання образів.

Практичне використання матеріалів аерокосмічного знімання полягає в ідентифікації об'єктів і перетворенні інформації знімка в параметри стану досліджуваних об'єктів. Класифікаційні функції дають змогу приймати рішення про властивості досліджуваних об'єктів на основі аналізу даних знімка, а саме – ознак, що залежать від цих властивостей.

Нормалізований різницевий водний індекс NDWI (Normalized Difference Water Index) використовується для визначення об'єктів відкритих водних просторів та їх виділення на космічному знімку на тлі ґрунту та рослинності (Томченко О. В., 2016).

Індекс NDWI ефективно визначає вміст вологи, він розраховується з використанням комбінації GREEN-NIR (видимий зелений та ближній інфрачервоний), що дає змогу виявляти незначні зміни вмісту води у водоймах.

Використовуючи переваги спектральних діапазонів NIR (ближній інфрачервоний) та GREEN (видимий зелений), NDWI може посилити присутність водних об'єктів на супутниковому знімку.

$$NDWI = \frac{I_G - I_{NIR}}{I_G + I_{NIR}}$$

де I_{NIR} – 760–900 нм, відбивальна інфрачервона область спектра; I_G – 530–590 нм, видима зелена область спектра.

Вибір цих довжин хвиль заснований на максимальних значеннях відбивальних характеристик водних об'єктів у зеленому спектрі довжин хвиль та мінімальних – у ближньому інфрачервоному спектрі, де рослинність та ґрунт мають максимальні значення. В результаті цих розрахунків водні об'єкти мають позитивні значення, тоді як ґрунт та наземна рослинність мають нульові чи негативні значення.

Нормалізований Диференційований Вегетаційний Індекс або просто Вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – простий кількісний показник кількості фотосинтетичної активної біомаси (зеленої маси рослинності) який застосовують для кількісного оцінювання рослинного покриву.

Здорова рослинність має дуже характерну криву спектрального відбиття, яку ми можемо використовувати для обчислення різниці між двома діапазонами – видимим червоним та ближнім інфрачервоним.

$$NDVI = \frac{I_{NIR} - I_R}{I_{NIR} + I_R}$$

де I_{NIR} – 760–900 нм, відбивальна інфрачервона область спектра; I_R – 630–690 нм, видима червона область спектра.

Діапазон можливих значень індексу – від –1 до 1. Значення індексу менше 0 зазвичай притаманні водним поверхням. Відомо, що для зеленої рослинності значення індексу NDVI коливається в діапазоні від 0,2 до 0,8 – залежно від густоти рослинного покриву.

Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних (незалежних від інших чинників) ділянках спектральної кривої відображення судинних рослин. У видимій області спектра (0,4–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній області (0,7–1,0 мкм) знаходиться область максимального відображення клітинних структур листа (Федоровський А. Д., 1996). Тобто, висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, з густою рослинністю) веде до меншого відображення у видимій області спектра і більшого – в інфрачервоній. Відношення цих показників один до одного дає змогу чітко відділяти та аналізувати рослинні від інших природних об'єктів. Використання ж не простого відношення, а нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відображень збільшує точність вимірювання, дає змогу зменшити вплив таких явищ, як відмінності в освітленості знімка, хмарності, серпанку, поглинання радіації атмосферою та ін.

Для даних Landsat 5:

$$NDVI = (\text{Band 2} - \text{Band 4}) / (\text{Band 2} + \text{Band 4})$$

$$NDWI = (\text{Band 4} - \text{Band 3}) / (\text{Band 4} + \text{Band 3})$$

Для даних Landsat 8:

$$NDVI = (\text{Band 3} - \text{Band 5}) / (\text{Band 3} + \text{Band 5})$$

$$NDWI = (\text{Band 5} - \text{Band 4}) / (\text{Band 5} + \text{Band 4})$$

У Табл. 1 (фрагмент) наведено вихідні дані для проведення дослідження.

Таблиця 1. Вихідні дані для дослідження методичних засад технології порівняння різночасових оцінок екологічного стану водних об'єктів

№ ділянки	1999 рік				2022 рік			
	5 канал (SWIR 2 1,55–1,75) макс.	7 канал (SWIR 3 2,08–2,35) макс.	Вег. інд. NDVI макс.	Вод. інд. NDWI макс.	6 канал (SWIR 2 1,57–1,65) макс.	7 канал (SWIR 3 2,11–2,29) макс.	Вег. інд. NDVI макс.	Вод. інд. NDWI макс.
1	0,50	0,36	0,45	0,29	0,62	0,60	0,33	0,11
2	0,47	0,29	0,45	0,25	0,66	0,61	0,35	0,11
3	0,53	0,37	0,51	0,27	0,58	0,51	0,34	0,11
4	0,51	0,33	0,51	0,27	0,65	0,54	0,34	0,10
5	0,85	0,80	0,44	0,27	0,67	0,65	0,32	0,08
7	0,56	0,40	0,49	0,22	0,70	0,66	0,34	0,09
8	0,51	0,38	0,46	0,21	0,66	0,62	0,35	0,09
15	0,48	0,35	0,48	0,33	0,63	0,59	0,34	0,11
16	0,47	0,32	0,45	0,25	0,60	0,56	0,34	0,08
17	0,50	0,30	0,48	0,25	0,61	0,54	0,36	0,11

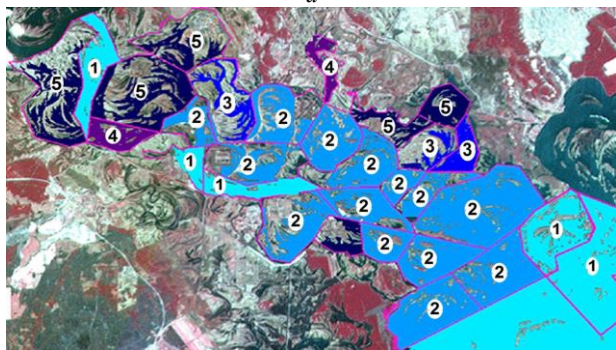
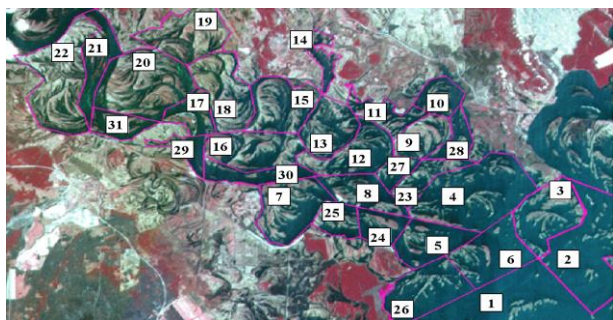


Рис. 2. Синтезований космічний знімок з накладеними ділянками водної рослинності (1–31), виділеними в ході дешифрування (а).

Карта якості води річки Прип'ять 1999 р. методом ВРЛК (б):
1 – гранично-чиста, 2 – чиста, 3 – слабо забруднена,
4 – помірно забруднена, 5 – брудна

Викладення основного матеріалу досліджень та результатів обрахунків

Територія дослідження спочатку була розбита на комірки. При виборі сітки з розміром комірки площею на місцевості в 1 км² у зоні річки Прип'ять розміщується 78 ділянок, які при 9-бальній системі класифікації відповідають: 12 ділянок чистої води (0 балів), 41 ділянка слабо забрудненої (3 бали), 16 ділянок помірно забрудненої (6 балів) і 9 ділянок брудної води (9 балів), Табл. 2, 3.

Алгоритм для проведення подальшого дослідження екостану водних об'єктів таких (Федоровський А. Д., 1999, Хижняк А. В., 2021).

1. Переведення 5-класної оцінки екостану ділянок річки Прип'ять 1999 р. на сучасну 9-бальну оцінку і ділянки в 1 км² (Табл. 2 і 3).

2. Формування ділянок-еталонів для оцінювання екологічного стану річки Прип'ять у 2022 р. методом СК.

3. Оцінювання екологічного стану річки Прип'ять у 2022 р. методом СК з віртуальними еталонами, Табл. 2, Рис. 3 і 4.

4. Порівняння оцінки екологічного стану річки Прип'ять 2022 р., отриманої методом СК зі станом річки 1999 р., отриманої методом ВРЛК, Табл. 3.

5. Перевірка правомірності порівняння оцінок екологічного стану річки Прип'ять 2022 р., виконаних методом СК, з результатами оцінок 1999 р., виконаних методом ВРЛК.

Як методичні особливості та умови способу порівняння сучасного екологічного стану водного середовища з його попереднім станом пропонується

як еталони сучасного оцінювання використовувати відповідні ділянки попередніх років. Так, на прикладі річки Прип'ять при сучасному оцінюванні 2022 р. це ділянки-еталони 1999 р. з навантаженням у балах і відповідними інформативними спектральними ознаками цих ділянок у 2022 р.

Таблиця 2. Ділянки-еталони 1999 р.

№ з/п	Бали	№№ ділянок									
		1	15	46	60	61	62	84	97	98	112
1	0	1	15	46	60	61	62	84	97	98	112
2	3	34	35	36	47	48	49	50	51	65	66
3	6	8	18	29	30	33	39	40	43	52	53
4	9	2	3	16	17	23	24	25	37	38	

Результати оцінювання екостану річки Прип'ять у 2022 р. методом СК і у 1999 р. методом ВРЛК наведені в Табл. 3, стовпці 3 і 5 (фрагмент) та на Рис. 3 і 4.

Фрагмент Табл. 3 ілюструє приклади розрахунків у стовпцях: 1-му – №№ ділянок; 2-му – оцінювання екостану за 5-бальною системою; 3-му – переведення на 9-бальну систему оцінювання (0, 3, 6, 9); 4-му – оцінювання екостану 1999 р. (Landsat-5) у 2022 р. методом СК за запропонованою методикою; 5-му – оцінювання екостану 2022 р. (Landsat-8) методом СК за запропонованою методикою.

Таблиця 3. Результати оцінювання екостану річки Прип'ять 2022 р. методом СК і 1999 р. – методом ВРЛК

Ділянки №№	1999 ВРЛК клас (1–5)	1999 ВРЛК бали (0–9)	1999/2022 кор СК Бали (0–9)	2022 кор СК Бали (0–9)
1	1	0	3	3
2	4	6	6	6
3	5	9	9	6
4	3	6	6	6
5	3	6	6	3
7	4	9	9	6
8	4	9	9	6
15	1	0	0	3
16	4	6	6	6
17	5	9	9	6

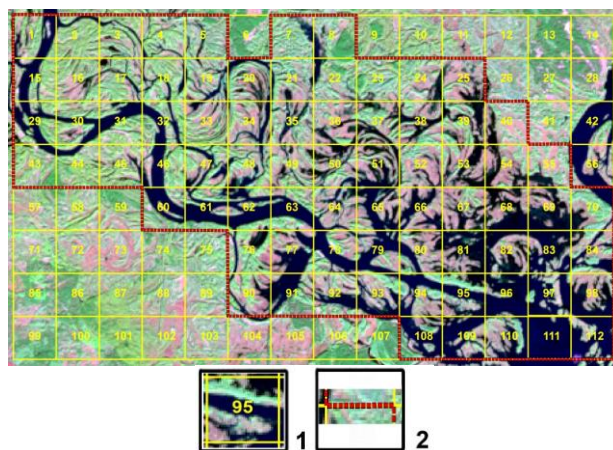


Рис. 3. Фрагмент зображення гирлової зони річки Прип'ять на КЗ Landsat 9, 2022 р.
Умовні позначення: 1 – номери комірок (1x1 км на місцевості) сітки, 2 – межа області досліджень

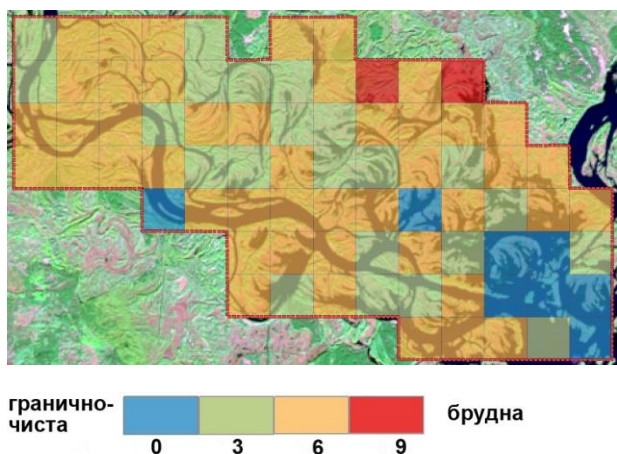


Рис. 4. Карта якості (бали) води річки Прип'ять 2022 р. (метод СК, Landsat 9)

Для оцінювання санітарно-екологічного стану річки Прип'ять у 2022 р. методом статистичного критерію як інформативні ознаки використовувалися спектральні яскравості 6 і 7 каналів супутника Landsat 9 і спектральні індекси: вегетаційний та водний (Табл. 1, стовпці 6–9).

Результати порівняння оцінок екостану річки Прип'ять за 2022 і 1999 рр. наведено в Табл. 4.

Таблиця 4. Оцінка стану ділянок в балах 1999 р. ВРЛК і 2022 р. СК (кількість)

Рік	Метод	0 балів	3 бали	6 балів	9 балів
1999	ВРЛК	12	41	16	9
1999/2022	СК	10	43	17	8
2022	СК	15	23	37	3

Правомірність пропонованого способу порівняння різночасових оцінок екостану водойм перевірялась на прикладі річки Прип'ять шляхом порівняння результату 1999 р. з його оцінкою в 2022 р. методом СК. При кореляції не менше 0,8, що цілком прийнятно при практичних оцінках техногенного або антропогенного навантаження, підтримується легітимність пропонованої методики (Федоровський А. Д., 2020).

Таке дослідження було нами виконано. На основі космічної інформації супутника Landsat 5: за 1999 р. було оцінено екологічний стан річки Прип'ять за 1999 р. методом СК. Результат поданий у Табл. 3 (стовпець 4). Коефіцієнт кореляції порівняння (стовпці 3 і 4 Табл. 2) дорівнює 0,83, що підтримує правомірність пропонованого методу.

Висновки

Обґрунтовано на основі космічної інформації ДЗЗ методичні особливості та умови технології порівняння сучасного екологічного стану водного середовища з попередньою оцінкою його стану іншим методом. Як експеримент, як віртуальні еталони методу СК використовуються ділянки-еталони водного середовища порівнювальних років.

Порівняння екологічного стану річки Прип'ять 2022 і 1999 рр. показало значні зміни у структурі якості води у 2022 р. порівняно з 1999 р., а саме: зменшення 9-бальних ділянок (брудна вода),

збільшення 0-бальних (чиста вода) і 6-бальних (помірно забруднена), Табл. 3.

Спеціальним дослідженням підтверджується правомірність пропонованого способу порівняння різночасових оцінок екологічного стану водних об'єктів. Порівняння оцінок екостану річки Прип'ять 1999 р. методами ВРЛК і СК отримало коефіцієнт кореляції 0,83, що прийнятно для практичних оцінок і підтверджує легітимність способу.

У результаті дешифрування космічних знімків установлені найбільш інформативні спектральні діапазони для дистанційного вивчення стану водного середовища: Landsat 5, канали 5 і 7, Landsat 9, канали 6 і 7; NDVI та NDWI – вегетаційний і водний індекси, тах.

Отримані результати можуть бути використані в роботі систем екологічного моніторингу, забезпечити оперативність прийняття управлінських рішень в галузі охорони водних ресурсів.

Проте, порівнюючи різночасові і різнометодичні оцінки стану водного середовища, важливо враховувати деякі фактори. Передусім, методи та підходи до оцінювання можуть змінюватися з часом, що може впливати на результати порівняння. Крім того, потрібно враховувати контекст та особливості конкретної водної екосистеми, оскільки кожна екосистема може мати свої унікальні характеристики та фактори, які впливають на її стан.

Узагальнюючі порівняння різночасових і різнометодичних оцінок стану водного середовища є важливим кроком для розуміння довготривалих змін у водних екосистемах. Це допомагає встановити тенденції змін та ідентифікувати потенційні проблеми, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення з охорони та відновлення водних ресурсів.

Література

- Архипов, А. И., Глазунов, Н. М., Хижняк, А. В. (2018). Эвристический критерий распознавания класса по спектральным яркостям. *Кибернетика и системный анализ*, 54(1), 105–110.
- Звенигородський, Е. Л., Клоков, В. М., Ларюшкін, Є. П. (1994). Адаптація методу дендрограми для комп'ютерної обробки аерофотознімків вищої водної рослинності. *Вісник ВПІ*, 2, 39–43.
- Красовский, Г. Я., Бузников, А. А., Ведешин, Л. А. (1989). Картографирование пятнистости озер и водохранилищ по материалам космических съемок в целях информационного обеспечения принятия водоохраных решений. *Исследования Земли из космоса*, 4, 53–58.
- Лялько, В. І, Федоровський, О. Д. та ін. (1997). Дистанційне зондування Землі у вирішенні водогосподарських і водоохоронних завдань. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 58, 144–147.
- Лялько, В. І., Попов, М. О., Федоровський, О. Д., Перерва, В. М. (2002). Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (короткий історичний нарис). *Космічна наука і технологія*, 8(2/3), 6–28.
- Томченко, О. В., Хижняк, А. В. (2016). Вегетаційні індекси, як інструмент оцінки і моніторингу стану земельних ресурсів. *Новітні технології*, 1, 13–15.
- Федоровський, А. Д., Сиренко, Л. А., Ходоровський, А. Я., Рябоконенко, А. Д. (1999). Использование космической информации для контроля состояния водных объектов

- Чернобыльской зоны. *Гидробиологический журнал*, 35(4), 3–11.
- Федоровський, А. Д., Сиренко, Л. А., Суханов, К. Ю., Якимчук, В. Г., Іванова, І. Ю. (1996). Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации. *Космічна наука і технологія*, 2(5–6), 103–106.
- Федоровський, О. Д., Хижняк, А. В., Томченко, О. В., Підгородецька, Л. В., Порушкевич, А. Ю. (2020). Спосіб оцінки екологічного стану внутрішніх водойм на основі космічного геомоніторингу та статистичного критерію з віртуальними еталонам. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 27, 18–25. <https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/27>.
- Хижняк, А. В., Федоровський, О. Д., Порушкевич, А. Ю., Єфіменко, Т. А. (2021). Концепція формування методології аерокосмічного геомоніторингу для вирішення завдань природокористування. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8(4), 4–11. <https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/31>.
- References
- Arkhipov, A. I., Glazunov, N. M., Khyzhniak, A. V. (2018). Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54(1), 105–110 (in Russian).
- Fedorovsky, A. D., Sirenko, L. A., Khodorovsky, A. Y., Ryabokonenko, A. D. (1999). Use of space information to monitor the condition of water bodies in the Chernobyl zone. *Hydrobiological Journal*, 35(4), 3–11 (in Russian).
- Fedorovsky, O. D., Khizhnyak, A. V., Podgorodetskaya, L. V., Tomchenko, O. V., Porushkevich, A. Y. (2020). Methods for evaluating the ecological condition of freshwater objects based on space geomonitoring and statistical criteria (rationale and testing). *Ukrainian journal of remote sensing*, 27, 18–25. <https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/27> (in Ukrainian).
- Fedorovskiy, O. D., Sirenko, L. A., Zvenigorodskii, E. L., Ivanova, I. Yu., Sukhanov, K. Yu., Yakimchuk, V. G. (1996). Assessing the ecological state of water bodies with the use of information from space apparatuses. *Space Science and Technology*, 2(5–6), 103–106 (in Russian).
- Khyzhniak, A. V., Fedorovskiy, O. D., Porushkevych, A. Y., Yefimenko, T. A. (2021). The concept formation of the aerospace geomonitoring methodology of the decision of problems in natural resource. *Ukrainian journal of remote sensing*, 8(4), 4–11. <https://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/31> (in Ukrainian).
- Krasovsky, G. Y., Buznikov, A. A., Vedeshin, L. A. (1989). Mapping of lakes and reservoirs spotting based on space imagery materials for information support of water protection decision making. *Investigations of Earth from Space*, 4, 53–58 (in Russian).
- Lyalko, V. I., Fedorovsky, O. D. et al. (1997). Remote sensing of the Earth in solving water management and water protection problems. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 58, 144–147 (in Ukrainian).
- Lyalko, V. I., Fedorovskiy, O. D., Pererva, V. M., Popov, M. O. (2002). Center for Aerospace Investigations of the Earth with the Institute of Geological Sciences, NAS Ukraine (brief history). *Space Science and Technology*, 8(2/3), 6–28 (in Ukrainian).
- Tomchenko, O. V., Khyzhnyak, A. V. (2016). Vegetation indices as a tool for assessing and monitoring the state of land resources. *Новітні технології*, 1, 13–15 (in Ukrainian).
- Zvenigorodskii, E. L., Klokov, V. M., Larjushkin, E. P. (1994). Adaptation of dendrogram for computer processing of aerial overgrowth higher aquatic vegetation. *Visnyk VPI*, 2, 39–43 (in Ukrainian).

COMPARISON OF MULTI-TEMPORAL AND MULTI-METHODICAL AQUATIC ENVIRONMENTAL ASSESSMENTS (ON THE EXAMPLE OF THE PRIPYAT RIVER FOR 1999 AND 2022)

O. D. Fedorovsky, O. V. Tomchenko, A. V. Khyzhniak, A. D. Bondarenko

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 uses the example of the Pripjat River to examine the methodological features and conditions for comparing multi-temporal and multi-methodological (obtained by different methods) assessments of the ecological state of the aquatic environment. Thus, when comparing the current ecological state (for 2022) of the Pripjat River, obtained by the statistical criterion (SC) method with the ecological state of the river in 1999, obtained by the method of aquatic plant groups (APG), it is proposed to form virtual standards of the SC method on the basis of reference sites of previous assessments of the ecological state of the river (1999). A comparison of the ecological state of the Pripjat River in 2022 and 1999 showed significant changes in the structure of water quality in 2022 compared to 1999, namely a decrease in dirty areas and an increase in moderately polluted and clean areas. The study confirms the validity of the proposed method of comparing multi-temporal and multi-methodological aquatic environmental assessments.

Keywords: ecological state of the reservoir, aquatic plant groups, statistical criterion.

*Рукопис статті отримано 20.06.2023
Надходження остаточної версії: 08.09.2023
Публікація статті: 29.09.2023*