

УДК 528.94:004.9:556.55:504.064

DOI <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2026-24-4>Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Холошин І.В.,

кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент,
завідувач кафедри географії та методики її навчання
Криворізький державний педагогічний університет
holoshyn@kdpu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2174-5605

Шерстюк Н.П.,

доктор географічних наук,
професор кафедри географії та методики її навчання
Криворізький державний педагогічний університет
sherstuknp@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1541-5570

Лакомова О.Й.,

кандидат географічних наук,
доцент кафедри географії та методики її навчання
Криворізький державний педагогічний університет
lakomova.k.r@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7798-2263

Барбіна Т.Ю.,

студентка,
Криворізький державний педагогічний університет
barbinatatana8@gmail.com
ORCID: 0009-0007-6151-2842

МОНІТОРИНГ ЕВТРОФІКАЦІЇ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ (НА ПРИКЛАДІ КАРАЧУНОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА)

У статті запропонована методика моніторингу евтрофікації водних об'єктів із використанням геоінформаційних технологій. В основу підходу покладено аналіз супутникових мультиспектральних індексів *NDCI*, *FAI* та *NDTI*, які відображають відповідно концентрацію хлорофілу-а у товщі води, наявність поверхневих скупчень фітопланктону та рівень каламутності. Дослідження виконано на прикладі Карачуновського водосховища. Здійснено просторово-часовий аналіз змін індексів, побудовано картографічні моделі їх розподілу та визначено особливості динаміки у різні стадії розвитку евтрофікації. Встановлено, що індекс *NDCI* характеризує дифузний розвиток фітопланктону у товщі води, тоді як *FAI* відображає формування поверхневих скупчень, які мають чітку просторову локалізацію та приурочені до прибережних і слабопроточних ділянок. Показано, що максимальна узгодженість просторових структур індексів спостерігається у період пікового розвитку евтрофікації, коли формується суцільний поверхневий покрив біомаси. Водночас індекс *NDTI* демонструє відносно стабільний просторовий розподіл, зумовлений гідродинамічними та морфологічними особливостями водойми, і меншою мірою реагує на біологічні процеси. Проведено просторовий кореляційний аналіз, який показав нестабільний зв'язок між *NDCI* та *FAI* із різким посиленням на піку евтрофікації, а також постійний негативний зв'язок між показниками, що характеризують органічну та мінеральну складові каламутності. На основі отриманих результатів обґрунтовано підхід до ідентифікації стадій евтрофікації за поєднанням просторових



характеристик індексів та їх взаємозв'язків. Запропонована методика дозволяє підвищити інформативність дистанційного моніторингу та може бути використана для оцінки екологічного стану водних об'єктів і підтримки прийняття управлінських рішень.

Ключові слова: евтрофікація, супутникові дані, мультиспектральні індекси, геопросторовий аналіз, гідроекологічний моніторинг.

Kholoshyn I., Sherstiuk N., Lakomova O., Barbina T. MONITORING EUTROPHICATION OF WATER BODIES USING GEOINFORMATION TECHNOLOGIES: A CASE STUDY OF THE KARACHUNIVSKE RESERVOIR

This paper proposes a methodology for monitoring eutrophication of water bodies using geoinformation technologies. The approach is based on the analysis of satellite multispectral indices, including NDCI, FAI, and NDTI, which respectively reflect chlorophyll-a concentration in the water column, the presence of surface phytoplankton accumulations, and turbidity levels. The study was conducted using the Karachunivske Reservoir as a case study. A spatiotemporal analysis of index variations was performed, cartographic models of their distribution were developed, and the features of their dynamics at different stages of eutrophication were identified. It was found that the NDCI index characterizes the diffuse development of phytoplankton within the water column, whereas FAI reflects the formation of surface accumulations with clear spatial localization, primarily in coastal and low-flow areas. It is shown that the highest spatial correspondence between the indices occurs during the peak stage of eutrophication, when a continuous surface biomass layer is formed. At the same time, the NDTI index demonstrates a relatively stable spatial pattern determined by hydrodynamic and morphological characteristics of the reservoir and is less sensitive to biological processes. A spatial correlation analysis revealed an unstable relationship between NDCI and FAI, with a sharp increase during peak eutrophication, as well as a stable negative relationship between indices representing organic and mineral components of turbidity. Based on the obtained results, an approach to identifying eutrophication stages through the integration of spatial characteristics and inter-index relationships is substantiated. The proposed methodology enhances the informativeness of remote monitoring and can be applied for assessing the ecological condition of water bodies and supporting environmental management decision-making.

Key words: eutrophication, satellite data, multispectral indices, geospatial analysis, hydroecological monitoring.

Постановка проблеми. Сучасний стан водних об'єктів характеризується зростанням антропогенного навантаження, що проявляється у зміні гідрохімічних, біологічних і гідрологічних параметрів водного середовища. Одним із найбільш поширених і небезпечних процесів є евтрофікація, яка супроводжується надмірним збагаченням води біогенними речовинами, інтенсивним розвитком фітопланктону та погіршенням екологічного стану водойм. Унаслідок цього відбувається «цвітіння» води, зниження прозорості, дефіцит розчиненого кисню, заморні явища, погіршення якості питної води та загальне порушення гідроекосистеми (Вишневський, 2019; Kokolakis et al., 2025).

Особливої актуальності проблема евтрофікації набуває для гідрооб'єктів, які функціонують в умовах значного антропогенного впливу та виконують важливі господарські, рекреаційні й екологічні функції (Янко та ін., 2014). Карачуновське водосховище, як складний гідротехнічний об'єкт, піддається впливу урбанізованих

територій, промислових підприємств і сільськогосподарського використання земель у межах водозбірного басейну. Важливість його вивчення значно зросла внаслідок руйнування російськими військами Каховського водосховища, що спричинило суттєву зміну системи водозабезпечення регіону. У цих умовах Карачуновське водосховище фактично стало основним джерелом водних ресурсів для забезпечення потреб міста Кривий Ріг, що підвищує його стратегічне значення та обумовлює необхідність постійного моніторингу його екологічного стану.

Традиційні методи моніторингу якості води базуються на проведенні польових спостережень і лабораторних аналізів. Незважаючи на високу точність таких підходів, вони мають низку суттєвих обмежень, зокрема локальність отриманих даних, нерегулярність спостережень і значні фінансові витрати. У результаті виникає проблема недостатнього просторового та часового охоплення, що ускладнює виявлення закономірностей розвитку евтрофікаційних процесів.

У цьому контексті особливого значення набуває використання даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій, які дозволяють здійснювати оперативний моніторинг великих акваторій із високою просторовою деталізацією. Супутникові знімки забезпечують можливість отримання регулярної інформації про стан водної поверхні та її спектральні характеристики, що відкриває нові перспективи для аналізу екологічних процесів (Yaqi Zhao et al., 2024; Ruuhulhaq et al., 2025).

Одним із ключових напрямів використання дистанційних даних є застосування спектральних індексів (*NDCI*, *FAI*, *NDTI* тощо), які дозволяють опосередковано оцінювати концентрацію хлорофілу-а, ступінь розвитку фітопланктону та рівень каламутності води (Pahlevan et al., 2020). Разом із тим, застосування окремих індексів, не забезпечує повноцінного уявлення про складні процеси евтрофікації. Кожен із показників відображає лише окремий аспект стану водного середовища, що може призводити до неоднозначності інтерпретації результатів (Глухота, 2023). Зокрема, значення індексів можуть суттєво відрізнятися залежно від оптичних властивостей води, співвідношення органічних і мінеральних компонентів, а також гідродинамічних умов. Тому важливо аналізувати зміни цих показників тільки у комплексі.

Крім того, у сучасних дослідженнях недостатньо уваги приділяється аналізу просторово-часових закономірностей змін індексів та їх кореляційних зв'язків. Більшість робіт зосереджена на оцінці абсолютних значень показників, тоді як взаємодія між ними може містити важливу інформацію щодо стадій розвитку евтрофікації.

Таким чином, виникає наукова проблема, яка полягає у відсутності комплексної методики інтерпретації супутникових індексів, що дозволяє враховувати як їх абсолютні значення, так і взаємозв'язки у просторі та часі. Розв'язання цієї проблеми потребує розробки підходу, який би інтегрував дані дистанційного зондування, геоінформаційного аналізу та статистичних методів.

Огляд попередніх досліджень. Проблема евтрофікації водних об'єктів є однією з ключових у сучасних гідроекологічних дослідженнях, оскільки вона безпосередньо пов'язана з деградацією якості води, зниженням

біорізноманіття та погіршенням умов водокористування. Традиційні підходи до оцінки евтрофікації базуються на гідрохімічних та гідробіологічних методах, які передбачають польові спостереження і лабораторний аналіз (Wetzel, 2001).

У сучасних дослідженнях проблема евтрофікації водних об'єктів розглядається у контексті інтегрованого моніторингу із використанням дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій. За останні роки відбувся суттєвий розвиток методів оцінки якості води на основі супутникових даних, що дозволяє отримувати просторово-узагальнену інформацію з високою часовою частотою (Pahlevan et al., 2020).

Одним із ключових напрямів є вдосконалення спектральних індексів для оцінки концентрації хлорофілу-а. Сучасні дослідження підтверджують ефективність використання індексу *NDCI* для внутрішніх водойм із складними оптичними властивостями (Mishra, 2024). Зокрема, у роботах Moses et al. (2009) показано, що використання червоно-крайових каналів супутників *Sentinel-2* дозволяє суттєво підвищити точність оцінювання біомаси фітопланктону.

Паралельно активно розвиваються методи виявлення поверхневих скупчень водоростей. Індекс *FAI* та його модифікації широко застосовуються для моніторингу цвітіння води як у морських, так і у прісноводних екосистемах (Wang et al., 2022).

Оцінка каламутності та вмісту завислих речовин також залишається актуальним напрямом досліджень. Запропоновано алгоритми оцінки концентрації завислих речовин на основі спектральних характеристик води (Dogliotti et al., 2015). При цьому сучасні підходи акцентують увагу на необхідності врахування регіональних особливостей та типу водойм.

Особливої уваги у новітніх дослідженнях набуває інтеграція різних показників якості води. Доведено, що комплексний аналіз декількох індексів дозволяє більш точно відображати процеси евтрофікації, ніж використання окремих показників. Водночас автори зазначають, що взаємозв'язки між індексами можуть змінюватися залежно від стадії розвитку водних екосистем (Page, 2019).



Сучасні дослідження також спрямовані і на аналіз просторово-часової динаміки евтрофікації. Використання багаточасових супутникових даних дозволяє виявляти сезонні та міжрічні закономірності розвитку фітопланктону (Schaeffer et al., 2018). Зокрема, показано, що пікові значення біомаси пов'язані не лише з концентрацією поживних речовин, але й із гідродинамічними умовами та температурним режимом.

В українських дослідженнях останніх років також спостерігається зростання інтересу до використання ГІС і ДЗЗ для моніторингу водних об'єктів. Так, у роботах (Томченко та ін. 2013; Шевчук та ін. 2014; Глух та ін., 2025) розглядаються можливості використання супутникових даних для оцінки якості води та виявлення зон екологічного ризику. Водночас більшість досліджень зосереджена на аналізі окремих показників і не враховує їх взаємозв'язки.

Незважаючи на значний прогрес, у сучасній науковій літературі залишаються невирішені питання. Зокрема, недостатньо досліджено залежність між спектральними індексами у різні стадії евтрофікації, а також відсутні уніфіковані підходи до їх інтерпретації. Крім того, існує потреба у розробці методик, які поєднують просторовий аналіз із кореляційними взаємозв'язками між показниками.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують ефективність використання геоінформаційних технологій і супутникових даних для моніторингу водних об'єктів, проте потребують подальшого розвитку інтегровані підходи до аналізу евтрофікації. Це обумовлює актуальність розробки нових методик, спрямованих на комплексну інтерпретацію індексів та їх взаємозв'язків.

Постановка завдання. На основі викладеного можна сформулювати завдання дослідження:

1. Розробити та обґрунтувати методику інтерпретації супутникових індексів, яка базується на комплексному аналізі їх значень, просторової структури та кореляційних взаємозв'язків, і оцінити можливості її практичного застосування для моніторингу водних об'єктів.

2. Здійснити розрахунок індексів і просторове моделювання їх розподілу, а також провести просторово-часовий аналіз змін

показників для виявлення закономірностей розвитку евтрофікації на прикладі Карачуновського водосховища.

3. Дослідити взаємозв'язки між індексами шляхом виконання кореляційного аналізу та встановити характер їх зміни залежно від стадій розвитку евтрофікаційних процесів.

Методика дослідження базується на послідовному поєднанні операцій обробки супутникових знімків, розрахунку спектральних індексів, геопросторового аналізу та статистичної інтерпретації отриманих результатів.

У якості вихідних даних були використані мультиспектральні знімки супутника *Sentinel-2* (рівень обробки Level-2A), з просторовою роздільною здатністю 10 м та попередньо виконаною атмосферною корекцією. Джерело – платформа *Copernicus Browse*. Для аналізу залучено спектральні канали *Green* (B3), *Red* (B4), *RedEdge* (B5), *NIR* (B8) та *SWIR* (B11), які є інформативними для оцінки гідроекологічних характеристик водного середовища. Обробка даних здійснювалася із використанням геоінформаційної системи *QGIS* із залученням стандартних інструментів растрового аналізу та модулів обробки даних (Холошин та ін., 2025).

На першому етапі виконано підготовку вихідних даних, яка включала відбір супутникових знімків із мінімальною хмарністю (до 10%), приведення спектральних каналів до єдиної просторової роздільної здатності (10 м) шляхом ресемплінгу. Наступним етапом стало виділення водної поверхні, що є критично важливим для уникнення впливу прилеглих суходільних територій. Для цього було розраховано нормалізований водний індекс *NDWI* за формулою:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR).$$

Отримане растрове зображення піддано пороговій класифікації ($NDWI > 0$), у результаті чого сформовано маску водного дзеркала. З метою подальшого використання у просторовому аналізі маску було векторизовано, що дозволило отримати точний контур водойми та застосувати його як обмежувальний шар при обробці інших показників. Це забезпечило коректність подальших розрахунків і зіставність результатів у часі і просторі.

Основний аналітичний блок методики дослідження передбачав розрахунок спектральних

індексів, що характеризують різні аспекти евтрофікації:

– *NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index)* використовується для оцінки концентрації хлорофілу-а – основного індикатора евтрофікації, Формула визначення: $NDCI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$.

– *FAI (Floating Algae Index)* визначає скупчення водоростей та поверхнєве «цвітіння», Формула визначення:

$$FAI = B8 - (B4 + (B11 - B4) * (842 - 665) / (1610 - 665)).$$

Слід зауважити, оскільки *Sentinel-2 L2A* має значення, масштабовані на 10000, то в даному випадку, це впливає на абсолютні показники індексу. Тому при розрахунку індексу, всі частотні показники були поділені на 10000.

– *NDTI (Normalized Difference Turbidity Index)* використовується для оцінки вмісту завислих речовин у воді – як мінерального, так і біологічного походження. Формула визначення: $NDTI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$.

З метою забезпечення коректності аналізу всі розраховані індекси були обмежені межами водного об'єкта шляхом застосування маски водного дзеркала (інструмент *Clip Raster by Mask Layer* у *QGIS*). Це дозволило виключити вплив наземних ділянок і зосередити аналіз виключно на акваторії.

Подальший етап передбачав класифікацію отриманих індексів із метою виділення рівнів прояву евтрофікації. Для цього використано метод природних інтервалів (*Jenks*), що забезпечує оптимальний поділ значень на 5 класів відповідно до їх статистичного розподілу у просторі об'єкту.

Для просторового співставлення показників індексів растрове зображення було конвертовано у векторне з використанням інструменту *Raster pixels to points* та послідовним додаванням атрибутів шарів у *Шаблоні растрових значень*. На основі вибірки значень обчислено коефіцієнти парної кореляції, що надало можливість оцінити ступінь узгодженості показників індексів.

На завершальному етапі була ведена інтегральна оцінка стану водного об'єкта. Отримані результати представлені у вигляді тематичних карт, які дозволили не лише оцінювати поточний стан водного середовища,

а й запропонувати модель розвитку евтрофікації водосховища.

Викладення основного матеріалу. Аналіз часових змін спектральних індексів *NDCI*, *FAI* та *NDTI* дозволяє комплексно оцінити стан Карачуновського водосховища, оскільки дозволяє розглядати водне середовище як систему, у якій одночасно взаємодіють біологічні (фітопланктон), фізичні (завислі речовини) та поверхнєві процеси (скупчення біомаси). Дослідження їх динаміки у часі дає можливість виявити закономірності розвитку евтрофікаційних процесів, а також встановити послідовність переходів між різними станами водної екосистеми (рис. 1).

Встановлено, що протягом літньо-осіннього періоду стан водосховища змінюється не хаотично, а має чітко виражений фазовий характер. Так на початковому етапі (червень – початок липня 2025 року) досліджуваного періоду спостерігається відносно стабільний стан водного середовища, який можна охарактеризувати як фоновий. Для нього характерні низькі або помірні значення індексу *NDCI* (від -0,2 до 0,43, при середньому показнику 0,02), що свідчить про невисоку концентрацію фітопланктону. При цьому індекс *FAI* наближається до нульових значень (-0,22 ÷ 0,14, середнє: -0,018), що вказує на відсутність або мінімальну кількість поверхневих скупчень водоростей.

Індекс *NDTI* у цей період демонструє відносно стабільні значення (-0,44 ÷ 0,03, середнє: -0,19). Це відображає сталі умови каламутності води. Саме у цей час роль мінеральної зависі є найбільш помітною у формуванні спектрального сигналу.

На наступному етапі (середина та кінець липня, початок серпня 2025 року) відбувається поступове зростання біологічної активності у водному середовищі. Це проявляється у збільшенні середніх значень індексу *NDCI* (дивись рис. 1), а також у підвищенні його максимальних значень (до 0,48). Такі зміни свідчать про активний розвиток фітопланктону у товщі води.

Індекс *FAI* на цьому етапі також демонструє певне зростання, проте воно є менш вираженим і, як правило, проявляється лише у вигляді підвищення максимальних значень (до 0,51). Це означає, що поверхнєві скупчення водоростей



ще не є домінуючим явищем, але починають формуватися локально.

Індекс *NDTI* у цей період або залишається стабільним, або демонструє незначне зниження, що може бути пов'язано зі зміною співвідношення між мінеральною та органічною складовими у воді.

Загалом цей етап можна охарактеризувати як перехідний, коли біологічні процеси починають відігравати більш значущу роль, але ще не домінують у формуванні спектрального сигналу.

Найбільш виражені зміни спостерігаються на стадії пікової евтрофікації. У цей період

(січень, початок вересня 2025 року) відбувається різке зростання значень індексу *NDCI* (від -0,17 до 0,66, при середньому значенні 0,15), що свідчить про значну концентрацію фітопланктону. Одночасно індекс *FAI* демонструє різке збільшення максимальних значень (рис. 2), а також значне зростання варіабельності (стандартного відхилення). Це вказує на формування поверхневих скупчень водоростей, які можуть мати локальний характер, але суттєво впливають на спектральний сигнал.

Індекс *NDTI* у цей період демонструє або зниження значень, або втрату чутливості до

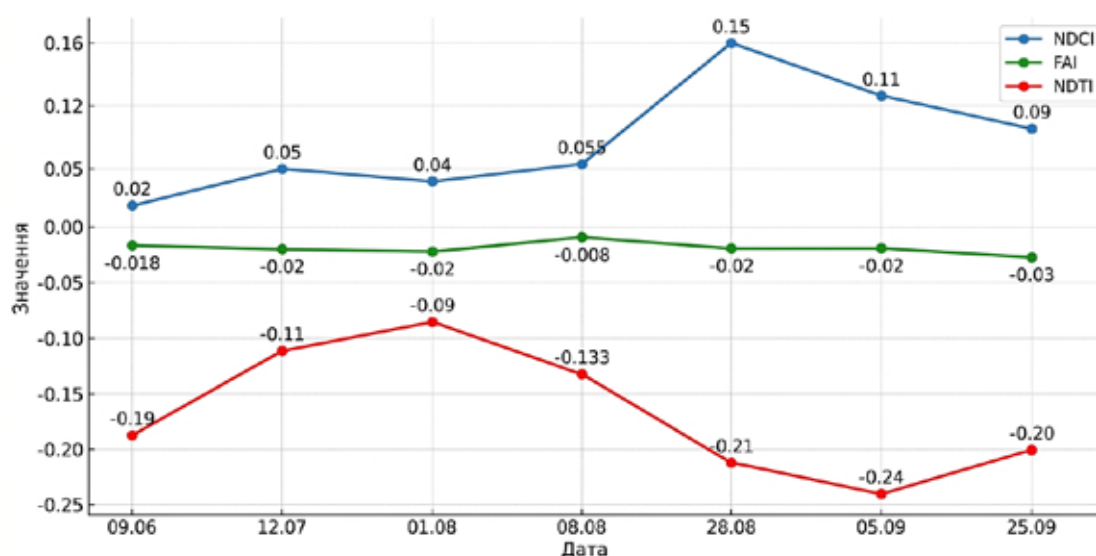


Рис. 1. Зміна середніх показників індексів евтрофікації Карачуновського водосховища у часі (дані 2025 року; розроблено автором)

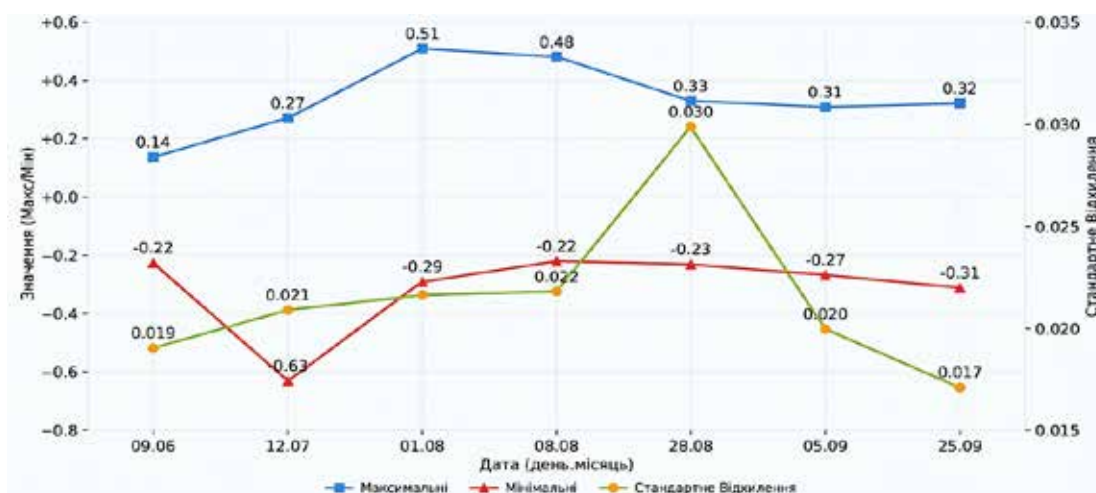


Рис. 2. Зміна показників індексу FAI Карачуновського водосховища у час (дані 2025 року; розроблено автором)

змін у водному середовищі. Важливо підкреслити, що це не обов'язково означає зменшення кількості мінеральної зависі, а скоріше свідчить про зміну домінуючого фактору формування спектрального сигналу. Біологічна складова (фітопланктон) починає переважати, що знижує внесок мінеральної компоненти у загальний сигнал.

З середини вересня фіксується послідовне завершення евтрофікаційних процесів: показники індексів *NDCI* і *FAI* зменшуються фактично до рівня початкового етапу. Збільшення індексу *NDTI* демонструє підвищення ролі мінеральної зависі у спектральному сигналі.

Суттєвим доповненням динаміки часової зміни абсолютних значень показників індексів є розподіл коефіцієнтів парної кореляції між ними. Ці математичні показники свідчать про різний характер взаємозв'язків між індексами. Так низькі значення кореляції між індексами *NDCI* та *FAI* (0,12–0,32) свідчать про те, що у більшості випадків фітопланктон переважно розподілений у товщі води. Індекс *NDCI* відображає концентрацію хлорофілу у водній масі, тоді як *FAI* реагує лише на поверхневі скупчення біомаси (рис. 3).

Зростання кореляції до 0,72 у період пікової евтрофікації інтерпретується як перехід до стадії інтенсивного «цвітіння», коли значна частина фітопланктону концентрується

у приповерхневому шарі. У цей момент обидва індекси починають фіксувати один і той самий процес – масове накопичення водоростей.

Стійкий обернений зв'язок між індексами *NDCI* та *NDTI* (від -0,31 до -0,82) свідчить про різноспрямований вплив органічної (фітопланктон) та мінеральної складових на спектральний сигнал води.

Посилення від'ємної кореляції у період пікової евтрофікації не обов'язково означає фізичне зменшення кількості завислих речовин, а скоріше вказує на зміну домінуючого фактору формування оптичних властивостей води. За високої концентрації фітопланктону його спектральний внесок починає переважати, що призводить до зниження чутливості індексу *NDTI* до мінеральної складової.

Стабільний обернений зв'язок між індексами *FAI* та *NDTI* (від -0,55 до -0,63) свідчить про розділення процесів у вертикальній структурі водної товщі. Індекс *FAI* відображає поверхневі скупчення водоростей, тоді як *NDTI* характеризує каламутність у товщі води.

Від'ємна кореляція може пояснюватися як частковим екрануванням водної товщі поверхневими утвореннями, так і тим, що процеси формування поверхневого «цвітіння» та мінеральної каламутності мають різну природу і динаміку.

Динаміка коефіцієнтів кореляції свідчить про різноспрямований характер взаємодії

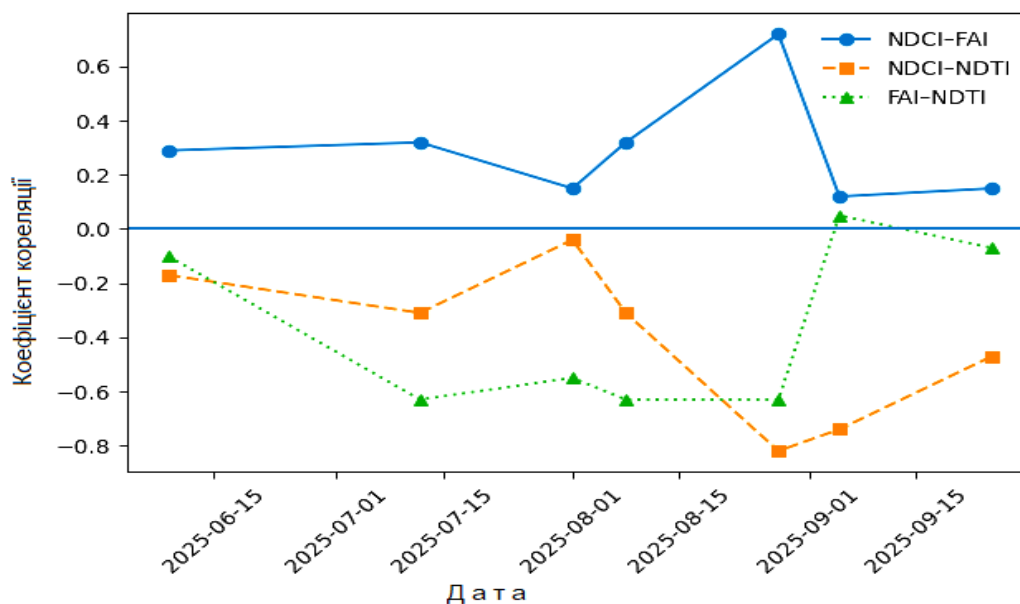


Рис. 3. Зміна показників коефіцієнтів парної кореляції між індексами евтрофікації Карачуновського водосховища у часі (розроблено автором)



між індексами. Найбільш показовим є різке посилення зв'язку між *NDCI* та *FAI* наприкінці серпня, що відповідає піковому розвитку евтрофікації. Одночасно спостерігається максимальне посилення негативного зв'язку між *NDCI* та *NDTI*, що вказує на домінування органічної складової каламутності. Зв'язок між *FAI* та *NDTI* залишається стабільно негативним протягом усього періоду, що підтверджує сталість процесів поверхневого екранування.

Картографічний аналіз розподілу індексів у межах Карачуновського водосховища (рис. 4) демонструє чітко виражену просторово-часову трансформацію структури евтрофікаційних процесів, що проявляється у зміні характеру локалізації та інтенсивності біомаси фітопланктону.

На ранньому етапі дослідження (червень 2025 року) просторовий розподіл індексу *NDCI* характеризується дифузністю та однорідністю, із незначними локальними зонами підвищених значень. Підвищення концентрації хлорофілу мають фрагментарний характер і не формують чітко окреслених осередків.

У той же час індекс *FAI* практично не фіксує значущих поверхневих проявів, що свідчить про відсутність сформованих скупчень фітопланктону у верхньому шарі води. Просторовий малюнок є розмитим, без вираженої приуроченості до конкретних ділянок акваторії. Таким чином, на цьому етапі евтрофікаційні процеси мають переважно підповерхневий характер, а біомаса розподілена у товщі води без концентрації у поверхневому шарі.

У період максимального розвитку евтрофікації (серпень, початок вересня 2025 року) спостерігається суттєва зміна просторової структури показників. Індекс *NDCI* демонструє значне зростання значень на більшій частині акваторії, формуючи майже суцільні зони підвищеної концентрації хлорофілу. Водночас просторовий розподіл стає більш контрастним, із виділенням зон максимального накопичення біомаси.

Індекс *FAI* у цей період відображає інтенсивне формування поверхневих скупчень, які мають чітку просторову локалізацію. Найбільш виражені ділянки зосереджені у прибережних зонах, затоках та ділянках зі зниженою гідродинамікою, а також у частинах акваторії, що піддаються накопиченню біомаси внаслідок

вітрового дрейфу. Характерною особливістю є узгодженість просторових структур *NDCI* та *FAI*, що свідчить про перехід біомаси з товщі води до поверхневого шару та формування явища масового «цвітіння».

У період трансформації та спаду (з середини вересня 2025 року) спостерігається дестабілізація просторової структури евтрофікації. Індекс *NDCI* демонструє поступове зниження загального рівня значень, однак зберігає осередки підвищеної концентрації, що мають мозаїчний характер.

Індекс *FAI* виявляє чітко локалізовані поверхневі скупчення, які вже не утворюють суцільного покриття, а представлені окремими плямами. Ці скупчення переважно концентруються у прибережних ділянках та у зонах акумуляції, обумовлених гідродинамічними процесами. Просторовий розподіл стає більш неоднорідним, що свідчить про фрагментацію біомаси та її перерозподіл у межах акваторії.

Геопросторовий аналіз розподілу індексу *NDTI* у межах Карачуновського водосховища засвідчує відносну стабільність просторової структури каламутності протягом різних періодів розвитку евтрофікації (рис. 5). Можна відзначити підвищену концентрацію завислих мінеральних речовин у прибережних ділянках водосховища, при цьому нижчий рівень мутності зберігається у центральній частині об'єкту дослідження, незалежно від інтенсивності біологічних процесів. Це демонструє особливості розвитку фізико-динамічних процесів водного об'єкта.

На основі отриманих даних була запропонована модель, яка відображає просторово-часову динаміку розвитку евтрофікації Карачуновського водосховища (рис. 6). Модель включає три основні стадії: початкову, пікову та стадію спаду, кожна з яких характеризується специфічною просторовою організацією біомаси та особливостями взаємозв'язку між індексами.

На **початковому етапі** евтрофікації відбувається активізація росту фітопланктону у товщі води, що зумовлено зростанням концентрації біогенних речовин. Індекс *NDCI* демонструє локальні підвищення, які мають дифузний та просторово неоднорідний характер. Індекс *FAI* залишається на низькому рівні або практично відсутній, оскільки поверхневі

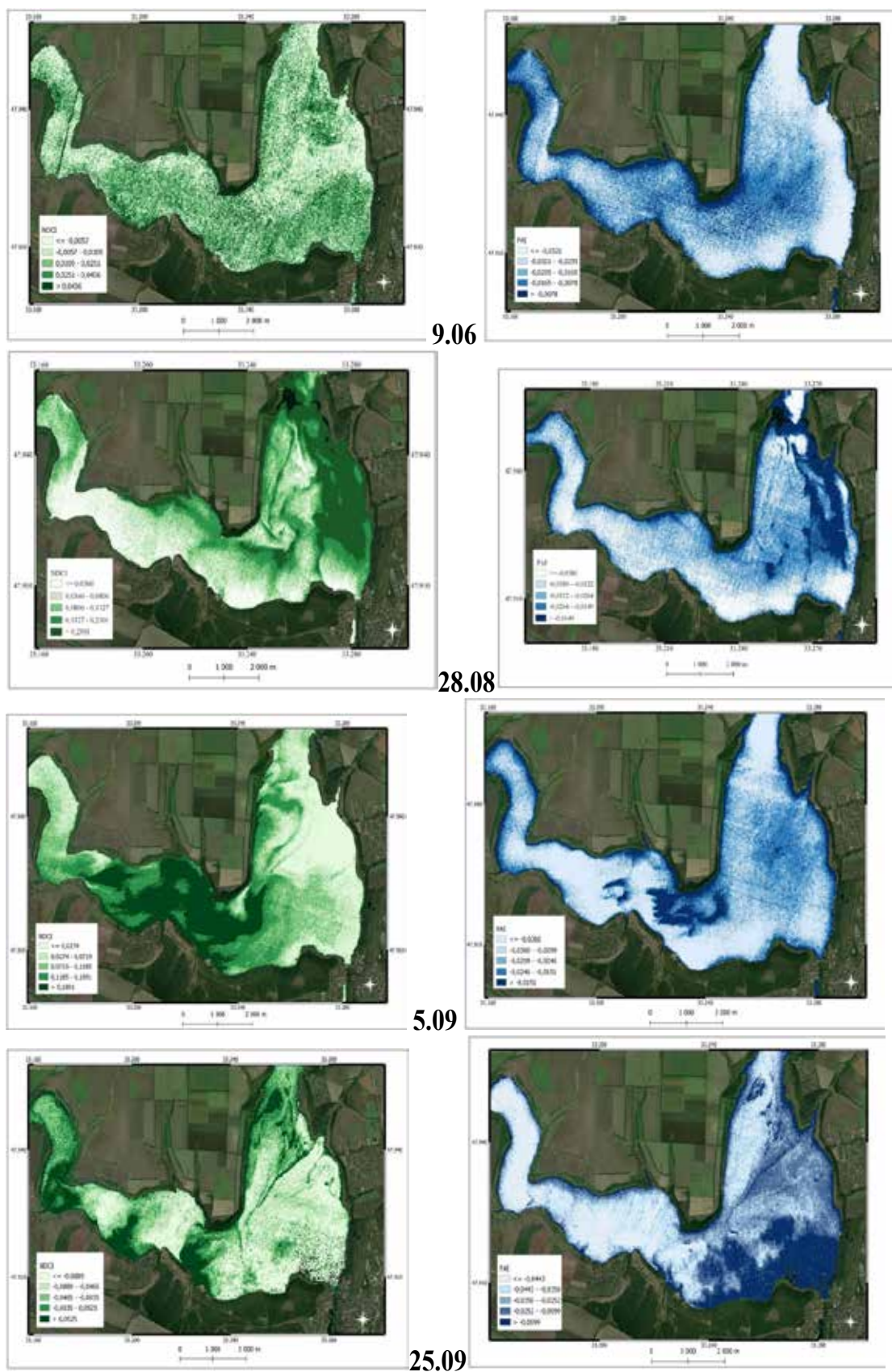


Рис. 4. Просторова зміна розподілу показників індексів NDCI (зліва) та FAI (справа) Карачуновського водосховища у різні періоди розвитку евтрофікації (розроблено автором)

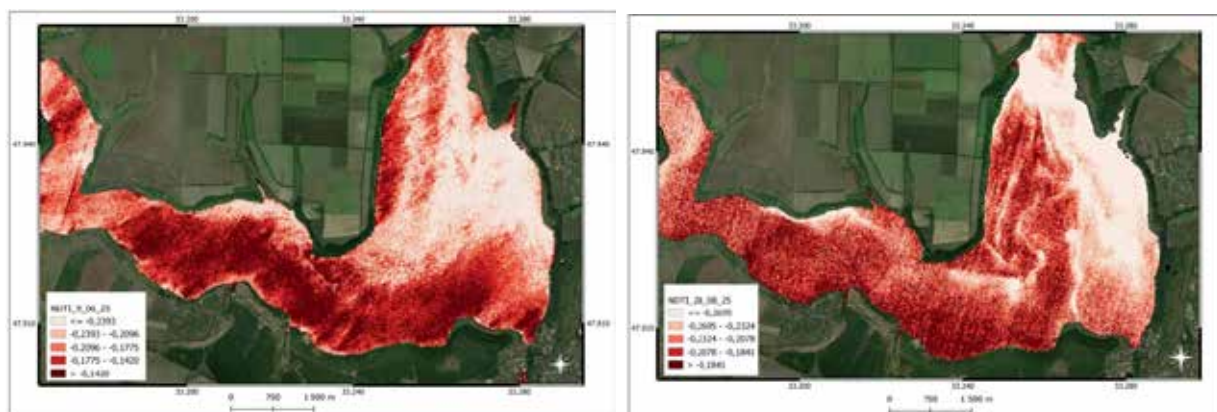


Рис. 5. Просторова зміна розподілу показників індексу NDTI Карачуновського водосховища у різні періоди розвитку евтрофікації (9.06.2025 року – зліва; 28.08.2025 – справа; розроблено автором)

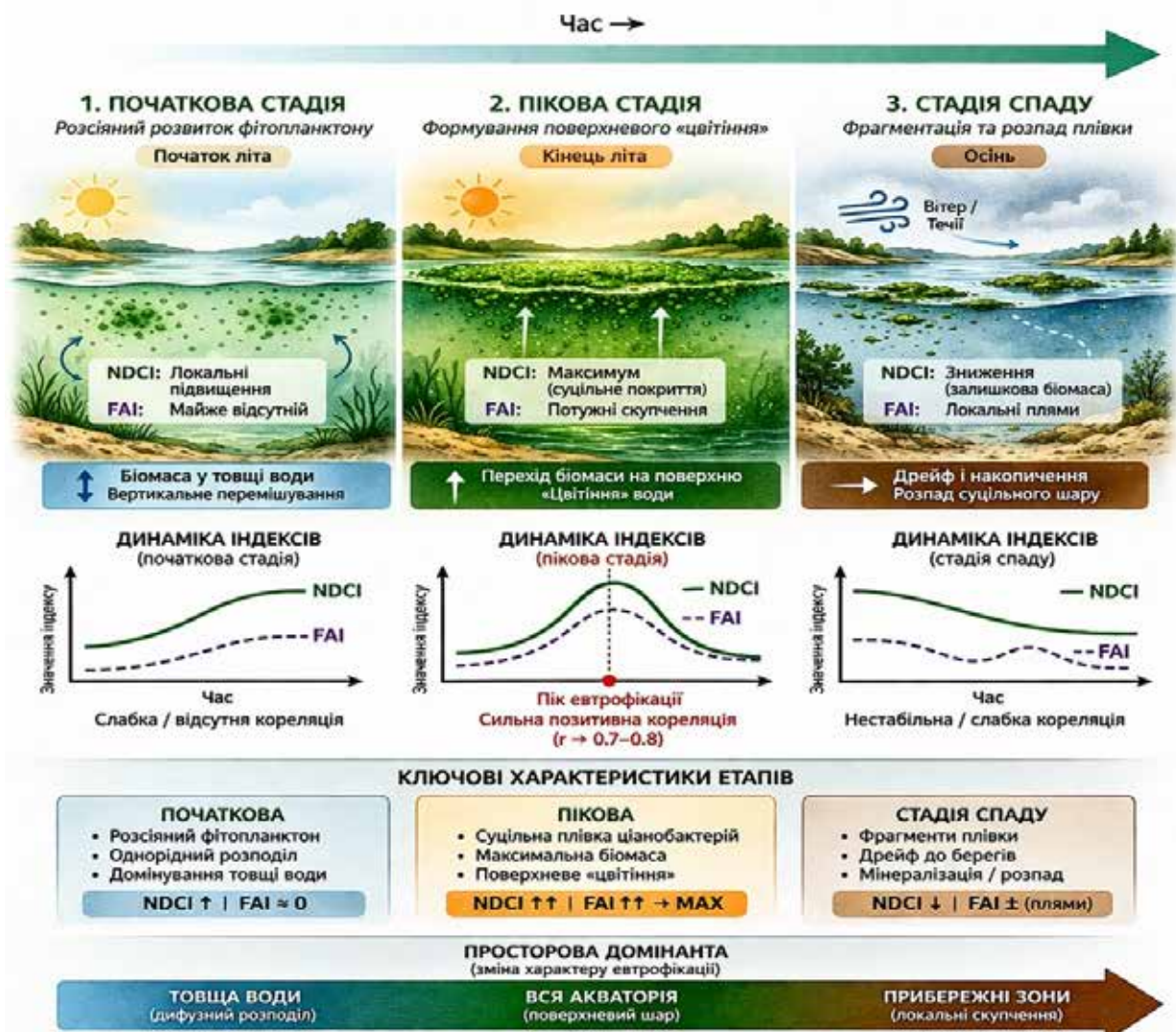


Рис. 6. Модель етапів розвитку евтрофікації Карачуновського водосховища (за даними автора згенеровано графічним модулем ChatGPT)

скупчення ще не сформовані. Просторово процес охоплює всю товщу води, без чіткої локалізації.

Для цієї стадії характерна слабка або відсутня кореляція між *NDCI* та *FAI*, що пояснюється різною чутливістю індексів до вертикального розподілу біомаси.

На стадії **максимального розвитку** евтрофікації відбувається накопичення біомаси та її перехід у поверхневий шар, що призводить до формування інтенсивного «цвітіння» води. Індекс *NDCI* досягає максимальних значень, відображаючи високу концентрацію хлорофілу у водній товщі, а індекс *FAI* різко зростає, фіксуючи потужні поверхневі скупчення у вигляді плівок або «килимів». Просторово спостерігається узгодженість розподілу обох індексів, особливо в прибережних та слабопроточних ділянках.

Ця стадія характеризується сильною позитивною кореляцією між *NDCI* та *FAI*, що свідчить про домінування біологічного фактору та формування єдиного просторового об'єкта – масиву фітопланктону.

На **завершальному** етапі відбувається деструкція біомаси та її перерозподіл у просторі під впливом фізичних та біохімічних процесів. Індекс *NDCI* поступово знижується, що відображає зменшення концентрації хлорофілу, а індекс *FAI* демонструє локальні значення, пов'язані з залишковими поверхневими скупченнями. Просторово формується фрагментована структура, з концентрацією біомаси у прибережних зонах внаслідок вітрового дрейфу та гідродинаміки. На цій стадії спостерігається зниження або нестабільність кореляції між індексами, що свідчить про розшарування процесів у товщі води та на її поверхні.

Висновки. З наведеного вище можна зробити наступні висновки:

1. Часова динаміка індексів *NDCI*, *FAI* та *NDTI* Карачуновського водосховища відображає складну взаємодію біологічних та фізичних процесів у водному середовищі. Розвиток евтрофікації має фазовий характер і супроводжується переходом від підповерхневого розподілу фітопланктону до формування поверхневих скупчень.

2. Індеси *NDCI*, *FAI* та *NDTI* водного середовища відображають різні компоненти водного середовища (об'ємну біомасу, поверхневі

скупчення та мінеральну каламутність відповідно), а їх кореляційні зв'язки дозволяють інтерпретувати не лише рівень евтрофікації, але й структурні особливості водної системи.

3. Просторовий розподіл індексів *NDCI*, *FAI* та *NDTI* є індикатором стадії розвитку евтрофікації, відображаючи не лише інтенсивність процесу, але й характер просторової організації біомаси. Встановлено, що максимальна узгодженість просторових структур спостерігається у період пікового розвитку, тоді як на інших етапах переважає їх диференціація.

4. Побудована модель розвитку евтрофікації водосховища, яка включає: початкову (дифузний розвиток фітопланктону у товщі води), пікову (формування поверхневого «цвітіння» та узгодженість індексів) і стадію спаду (фрагментація та просторове розшарування процесів).

5. Отримані результати підтверджують доцільність і ефективність розробленої методики аналізу стану водних об'єктів, яка може бути використана для моніторингу евтрофікаційних процесів гідрологічних об'єктів.

Подальші дослідження планується спрямувати на виявлення змін у просторово-часових закономірностях розвитку процесів евтрофікації Карачуновського водосховища за останні 20 років.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Вишневський В. І. (2019). Просторово-часова мінливість "цвітіння" води у дніпровських водосховищах. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, № 20, 18–27 [Vyshnevskiy, V. I. (2019). Spatio-temporal variability of water "bloom" in the Dnieper reservoirs. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, (20), 18–27. (In Ukrainian)].
2. Глух О.С., Заяць Я.Р., Симканіч О.І., Мільович М.І., Шварц Р.Р. Молнар-Бабіля Д.І. (2025). Використання даних GOOGLE EARTH ENGINE для моніторингу евтрофікаційних процесів у водосховищах Закарпаття. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту (Сер. Хімія)*, № 2 (54), 120–125. [Hlukh O.S., Zaiats Ya.R., Symkanych O.I., Milovych M.I., Shvarts R.R., Molnar-Babilia D.I. (2025). Use of Google Earth Engine data for monitoring eutrophication processes in the reservoirs of Transcarpathia. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University (Series: Chemistry)*, No. 2 (54), 120–125. (In Ukrainian)]. DOI: 10.24144/2414-0260.2025.2.120-126
3. Глухота В., Шевчук С. (2023). Дослідження процесу цвітіння води в Кам'янському водосховищі з використанням методів ГІС і ДЗЗ. *Вісник Київського національного університету*



імені Тараса Шевченка. Географія. 1/2(86/87), 56–59. [Hlukhota V., Shevchuk S. (2023). Study of water bloom processes in the Kamianske Reservoir using GIS and remote sensing methods. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography, 1/2(86/87), 56–59. (In Ukrainian)]. DOI: 10.17721/1728-2721.2023.87.2.

4. Томченко О. В., Підгородецька Л. В., Федоровський О. Д. (2013). Комплексна оцінка екологічного стану водойм на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (на прикладі оз. Світязь та верхів'я Київського водосховища). *Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*. № 10. 111–117. [Tomchenko O. V., Pidhorodetska L. V., Fedorovskiy O. D. (2013). Comprehensive assessment of the ecological state of water bodies based on Earth remote sensing data (a case study of Lake Svityaz and the upper reaches of the Kyiv Reservoir). *Hydroacoustic Journal (Problems, Methods and Tools for Studying the World Ocean)*. V.10. 111–117. (In Ukrainian)].

5. Холошин І.В., Бондаренко О.В., Ганчук О.В., Мантуленко С.В., Варфоломєєва І.М. (2025). Геопросторовий аналіз у географічних дослідженнях. Прага: Oktan Print, 243 с. [Kholoshyn I. V., Bondarenko O. V., Hanchuk O. V., Mantulenko S. V., Varfolomieieva I. M. (2025). *Geospatial Analysis in Geographic Research*. Prague: Oktan Print, 243 p. (In Ukrainian)]. DOI 10.46489/GAUGD-25-38.

6. Шевчук С. А., Вишневський В. І., Шевченко І. А. (2014). Використання даних ДЗЗ для встановлення екологічного стану дніпровських водосховищ. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії. Центральна геофізична лабораторія*. Вип. 10 (24). 72–78. [Shevchuk S. A., Vyshnevskiy V. I., Shevchenko I. A. (2014). Use of remote sensing data for assessing the ecological state of the Dnipro reservoirs. *Proceedings of the Central Geophysical Observatory. Central Geophysical Laboratory*, Issue 10 (24), 72–78. (In Ukrainian)].

7. Янко Н. В., Станкевич В. В., Коваль Н. М. (2014). Антропогенна евтрофікація Шацьких озер. *Довкілля та здоров'я*. № 3, 51–55. [Yanko N. V., Stankevych V. V., Koval N. M. (2014). Anthropogenic eutrophication of the Shatsk Lakes. *Environment and Health*, No. 3, 51–55. (In Ukrainian)].

8. Dogliotti A.I., Ruddick K., Nechad B., et al. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 156. P. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>

9. Kokolakis S., Kokinou E., Karagiannidou M., Chronaki C. (2025). Remote Sensing of Urban Stream Eutrophication and Its Implications for Public Health. *Global Healthcare Transformation*

in the Era of Artificial Intelligence and Informatics. DOI: 10.3233/SHTI250762/.

10. Mishra K., Choudhary B., Fitzsimmons K.E. (2024). Predicting seasonal water turbidity using remote sensing and GIS. *Frontiers in Environmental Science*. Vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1371759>.

11. Moses, Wesley & Gitelson, Anatoly & Berdnikov, Sergey & Povazhnyi, Vasiliy. (2009). Satellite Estimation of Chlorophyll– a Concentration Using the Red and NIR Bands of MERIS – The Azov Sea Case Study. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE. 6. 845–849. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2026657>.

12. Pahlevan N., Smith B., Schalles J., et al. (2020). Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 *Remote Sensing of Environment*. Vol. 240. doi.org/10.1016/j.rse.2019.111604.

13. Page, B.P.; Olmanson, L.G.; Mishra, D. R., (2019) A harmonized image processing workflow using Sentinel-2/MSI and Landsat-8/OLI for mapping water clarity in optically variable lake systems. *Remote Sens. Environ*, 231, 111284.

14. Ruuhulhaq M. S., Setianingrum, S. (2025). Utilization of Sentinel-2 Imagery for Water Quality Analysis: A Case Study of Saguling Reservoir. *International Journal for Disaster and Development Interface*. 5(2), 83–95. <https://doi.org/10.53824/ijddi.v5i2.71>.

15. Schaeffer B.A., Schaeffer K.G., Keith D., Lunetta R.S., Conmy R., Gould R.W. (2018). Barriers to adopting satellite remote sensing for water quality monitoring *Remote Sensing of Environment*. Vol. 216. P. 618–628.

16. Wang X., Chen Y., Yuan Q., Xing X., Hu B., Gan J., Zheng Y., Liu Y. (2022). Effect of river damming on nutrient transport and transformation and its countermeasures. *Front. Mar. Sci*. 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1078216>.

17. Wetzel R.G. (2001) *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego: Academic Press, 1006 p.

18. Yaqi Zhao, Xianqiang He, Shuping Pan, Yan Bai, Difeng Wang, Teng Li, Fang Gong, Xuan Zhang (2024). Satellite retrievals of water quality for diverse inland waters from Sentinel-2 images: An example from Zhejiang Province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. V. 132. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104048>.

Дата першого надходження статті до видання:
23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті:
29.05.2026