

ДИСТАНЦІЙНА ОЦІНКА ТРОФІЧНОГО СТАНУ Р. ПІВДЕННИЙ БУГ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІТОПЛАНКТОНУ ТА ВИЩОЇ ВОДНОЇ РОСЛИННОСТІ ЯК ІНДИКАТОРІВ АЗОТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Латуша Д.Р., Максименко М.П., Шевченко В.О., Кватернюк С.М.

¹Вінницький національний технічний університет
вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця
dima.latusha27@gmail.com

Стаття присвячена розробці та впровадженню методології дистанційного моніторингу трофічного стану річки Південний Буг, що важливо для забезпечення екологічної безпеки України. В умовах інтенсивного антропогенного тиску, аграрного забруднення та кліматичних змін екосистема річки зазнає деградації через системну евтрофікацію. Особливої гостроти проблема набула в умовах війни, коли Південний Буг став критичним джерелом питного водопостачання для цілих регіонів. В основі дослідження лежить використання багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2 (MSI) та хмарної платформи Google Earth Engine (GEE). Розроблено алгоритм автоматизованої обробки знімків, що включає маскування хмарності, ізоляцію водного дзеркала за допомогою індексу NDWI та розрахунок серії біооптичних індикаторів. Для оцінки короткострокового азотного навантаження використано індекс хлорофілу NDCI, а для аналізу тривалої евтрофікації – комплекс вегетаційних індексів макрофітів. Також застосовано модель індексу трофічного стану (TSI) Карлсона на основі спектральної комбінації ND34. Аналіз літньо-осінніх періодів 2019–2025 рр. виявив значну просторову гетерогенність забруднення. Дистанційно ідентифіковано локальні зони підвищеного екологічного ризику (так звані «гарячі точки»), зокрема в акваторії Сабарівського водосховища (м. Вінниця), де супутникові дані підтвердили наслідки екстремальних скидів азоту амонійного (до 14,35 мг/дм³) та явищ гострої гіпоксії. Зафіксовано сукцесію фітоценозів: деградацію зануреної рослинності та її заміщення поверхневими ціанобактеріальними матами. Встановлено, що через зменшення стоку річка втрачає «ефект розведення», що провокує гіперевтрофікацію навіть за стабільних обсягів викидів. Запропонований підхід дозволяє оперативно виявляти несанкціоновані скиди та дифузне аграрне забруднення. Результати дослідження є необхідні для прийняття обґрунтованих управлінських рішень для досягнення «доброго» екологічного стану масиви поверхневих вод, що є головною екологічною ціллю Плану управління річковим басейном Південного Бугу. *Ключові слова:* дистанційне зондування, евтрофікація, азотне навантаження, фітопланктон, макрофіти, екологічний моніторинг.

Remote assessment of the trophic state of the Southern Bug River using phytoplankton and higher aquatic vegetation as indicators of nitrogen load. Latusha D., Maksymenko M., Shevchenko V., Kvaterniuk S.

This paper focuses on the development and implementation of a remote monitoring methodology for the trophic state of the Southern Bug River, which is crucial for ensuring Ukraine's ecological security. Under intense anthropogenic pressure, agricultural pollution, and climate change, the river's ecosystem is undergoing severe degradation driven by systemic eutrophication. This issue has become particularly acute amidst the ongoing war, as the Southern Bug has emerged as a critical drinking water source for entire regions. The study relies on multispectral satellite data from the Sentinel-2 (MSI) mission, processed within the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. An automated image processing algorithm was developed, encompassing cloud masking, water body isolation using the Normalized Difference Water Index (NDWI), and the computation of a series of bio-optical indicators. The Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) was employed to assess short-term nitrogen loading, while a suite of macrophyte vegetation indices – namely NDAVI, SAVI, and FAI – was utilized to analyze long-term eutrophication. Additionally, Carlson's Trophic State Index (TSI) model was applied based on the ND34 spectral combination. Spatiotemporal analysis of the summer-autumn periods from 2019 to 2025 revealed significant spatial heterogeneity in pollution levels. Local ecological risk "hotspots" were remotely identified, particularly within the Sabariv Reservoir (Vinnytsia), where satellite data corroborated the impacts of extreme ammonium nitrogen discharges (up to 14.35 mg/dm³) and occurrences of severe hypoxia. Furthermore, phytocenosis succession was observed, characterized by the degradation of submerged vegetation and its subsequent replacement by surface cyanobacterial mats. The findings indicate that due to reduced river discharge, the waterbody is losing its "dilution effect," thereby triggering hypereutrophication even when pollutant discharge volumes remain stable. The proposed approach enables the rapid detection of unauthorized wastewater discharges and diffuse agricultural pollution. The study's results are essential for making evidence-based management decisions aimed at achieving "good" ecological status for surface water bodies, which constitutes the primary environmental objective of the Southern Bug River Basin Management Plan. *Key words:* remote sensing, eutrophication, nitrogen load, phytoplankton, macrophytes, environmental monitoring.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Річка Південний Буг – єдина велика водна артерія, басейн якої повністю розташований у межах України, що робить її стратегічним об'єк-

том національної водної безпеки. Проте внаслідок безпрецедентного антропогенного втручання гідрологічний режим річки зазнав докорінної трансформації: русло перетворено на каскад штучних



водосховищ, що призвело до уповільнення водообміну та втрати здатності екосистеми до самоочищення.

Головним рушієм екологічної деградації Південного Бугу є системна евтрофікація, спричинена надмірним надходженням азоту та фосфору з дифузних сільськогосподарських джерел та комунальних стоків. Надмірне надходження азоту ініціює ряд негативних біологічних реакцій, стимулюючи гіперпродукцію фітопланктону та надмірне заростання русла вищою водною рослинністю. Відмирання цієї органіки провокує критичне зниження рівня розчиненого кисню та заморні явища, що становить пряму загрозу для гідробіонтів та санітарно-епідеміологічної безпеки населення.

Ситуація критично загострилася в умовах глобальних кліматичних змін та наслідків військових дій. Внаслідок загального зменшення річкового стоку у літньо-осінній період екосистема Південного Бугу втрачає «ефект розведення». Питома концентрація нітратів та амонію у воді стрімко зростає, що створює ефект експоненційної гіперевтрофікації навіть за незмінних обсягів викидів.

Традиційні методи гідрохімічного моніторингу *in situ* забезпечують високу аналітичну точність, проте є ресурсомісткими, логістично складними і не здатні відобразити високу просторово-часову гетерогенність розподілу забруднювачів на значних акваторіях і вздовж усього русла. З огляду на це, технології супутникового дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стали рентабельною та безальтернативною основою для безперервного моніторингу трофічного статусу внутрішніх водойм.

Попри наявність ґрунтовних праць із гідрохімії річки, комплексні дослідження її трофічного стану із застосуванням сучасних супутникових індексів (NDCI, FAI) та хмарних платформ залишаються фрагментарними. Це зумовлює гостру необхідність розробки інтегрованої методології дистанційного моніторингу, яка дозволить об'єктивно оцінювати трофічний стан річки та локалізувати джерела забруднення.

Мета роботи полягає у розробці методології дистанційної оцінки трофічного стану та рівня азотного навантаження на екосистему річки Південний Буг на основі супутникових даних Sentinel-2, використовуючи спектральні характеристики фітопланктону та вищої водної рослинності як біооптичних індикаторів.

Для досягнення мети дослідження використано такі методи: аналіз багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2 (MSI) із використанням каналів «червоного краю»; автоматизована обробка масивів зображень та просторово-часовий геоінформаційний аналіз у хмарному

середовищі Google Earth Engine; алгоритмічна попередня обробка (препроцесинг) супутникових даних, що включає піксельно-точне маскуванню хмарності за допомогою шару класифікації сцени (SCL), медіанне усереднення для вилучення оптичних артефактів та просторову ізоляцію водного дзеркала за допомогою нормалізованого різницевого водного індексу (NDWI); атмосферна корекція із застосуванням спеціалізованого процесора ACOLITE; біооптичне індексування для кількісної оцінки біомаси фітопланктону за допомогою нормалізованого різницевого індексу хлорофілу (NDCI); дистанційна ідентифікація вищої водної рослинності із застосуванням комплексу спеціалізованих вегетаційних індексів, таких як нормалізований різницевий індекс водної рослинності (NDAVI); моделювання трофічного індексу (TSI) Карлсона; просторовий аналіз для локалізації зон екологічного ризику, пов'язаних із точковими та дифузними джерелами забруднення.

Виклад основного матеріалу. Антропогенна евтрофікація, зумовлена надмірним надходженням біогенних елементів (насамперед азоту та фосфору) з аграрних угідь та комунальних стоків, є однією з найбільш критичних загроз для прісноводних екосистем у глобальному масштабі [1]. Надлишок нутрієнтів у поєднанні з підвищенням температури поверхневих вод провокує гіпертрофічний розвиток фітопланктону, зокрема шкідливе цвітіння ціанобактерій, та надмірне розростання макрофітів [2]. Ці процеси призводять до деградації якості води, формування гіпоксичних умов та заморів гідробіонтів [1, 3]. Внутрішні водойми та річки належать до оптично складних вод. Їх спектральні властивості формуються нелінійною взаємодією фітопланктону, загальної завислої речовини та забарвленої розчиненої органічної речовини [4]. Історично використання супутників із низькою просторовою роздільною здатністю (наприклад, Sentinel-3 OLCI з пікселем 300 м) обмежувало моніторинг лише великими озерами, залишаючи малі водойми та річкові русла поза увагою через так званий ефект суміжних пікселів [5]. Запуск місії Sentinel-2 (MSI) вирішив цю проблему, забезпечивши просторову роздільну здатність 10–20 метрів та наявність спектральних каналів у зоні «червоного краю» (Red-Edge), що є критично важливими для кількісної оцінки хлорофілу в забруднених водах [1].

Фітопланктон реагує на надходження азоту надзвичайно швидко, формуючи "цвітіння" протягом кількох днів після змиву добрив [6]. Хлорофіл а (Chl-a) традиційно використовується як кількісний маркер біомаси водоростей [7]. Сучасні дослідження доводять наявність стійких кореляцій між супутниковими індексами хлорофілу та концентрацією загального азоту у воді, що дозволяє використовувати їх як індикатори забруднення

нітрогенвмісними сполуками [1, 8]. Для оцінки біомаси в оптично складних водах найчастіше застосовується нормалізований різницевий індекс хлорофілу (NDCI), який використовує канал "червоного краю" (705 нм) для фіксації піку розсіювання клітинами та червоний канал (665 нм) для фіксації поглинання хлорофілом. Використання NDCI мінімізує вплив залишкових атмосферних ефектів та неорганічних домішок [1]. Також високу ефективність демонструють емпіричні відношення каналів (наприклад, комбінації зеленого, червоного та ближнього інфрачервоного), які добре корелюють із рівнем азоту [9].

На відміну від мікрowodоростей, макрофіти є інтегральним індикатором, що відображає довгостроковий рівень забруднення [10]. Надлишкове азотне навантаження кардинально порушує характеристики макрофітів та баланс екосистеми: зниження прозорості води через цвітіння фітопланктону призводить до деградації занурених рослин та їх заміщення вільноплаваючими видами, які витягують нутрієнти з товщі води [11, 12]. Для дистанційної ідентифікації макрофітів розроблено специфічні алгоритми. Ґрунтозахисний вегетаційний індекс (SAVI) мінімізує вплив яскравості дна на мілководних ділянках, тоді як нормалізований різницевий індекс водної рослинності (NDAVI) використовує синій канал для кращого проникнення у товщу води при фіксації занурених рослин [13]. Для виявлення щільних поверхневих скупчень водоростей та плаваючих макрофітів, які сигналізують про екстремальне азотне збагачення, ефективно застосовується індекс плаваючих водоростей (FAI) [13, 14].

Для обробки масивів супутникових даних та реалізації біооптичних моделей використано хмарну платформу Google Earth Engine (GEE), що дозволяє здійснювати обчислення без необхідності локального завантаження петабайтів знімків [15]. Процес попередньої обробки (препроцесингу) є критичним етапом, оскільки відбивальна здатність водної поверхні є надзвичайно низькою і чутливою до атмосферних та просторових перешкод [15, 16].

Як базовий набір даних в алгоритмі використано колекцію COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, яка містить багатоспектральні знімки Sentinel-2 рівня обробки Level-2A [17]. Ці дані являють собою відбивальну здатність на рівні земної поверхні, яка вже пройшла попередню атмосферну корекцію за допомогою стандартного процесора Sen2Cor [17]. Для подальшого аналізу алгоритм залишає виключно "чисті" пікселі: рослинність, відкритий ґрунт та воду. Для вилучення впливу короточасних артефактів на поверхні річки, таких як вітрове хвилювання або сонячні відблиски, використовується медіанне усереднення [18].

Останнім етапом препроцесингу є просторова ізоляція водного дзеркала Південного Бугу від прилеглих урбанізованих територій та берегових лісів [19]. Для цього застосовується нормалізований різницевий водний індекс (NDWI). Його фізичний зміст базується на високому відбиванні світла водою у зеленому діапазоні (Band 3, 560 нм) та майже повному його поглинанні у ближньому інфрачервоному діапазоні (Band 8, 842 нм) [19]. Формула індексу NDWI має такий вигляд:

$$NDWI = \frac{Band3 - Band8}{Band3 + Band8} \quad (1)$$

У алгоритмі створюється бінарна маска акваторії із застосуванням жорсткого порогу $NDWI > 0,05$. Використання значення 0,05 дозволяє надійно відсікти перехідні зони, вилучаючи з розрахунків вологі берегові ґрунти та мілководні мулисті ділянки.

У результаті застосування цього конвеєра обробки формується ізольований масив "чистих" водних пікселів річки Південний Буг, який слугує надійною базою для подальшого розрахунку біооптичних індексів фітопланктону (NDCI) та макрофітів (NDAVI, FAI) [13]. Приклад виділення зон масового цвітіння водоростей у акваторії Сабарівського водосховища та розрахунку біооптичних індексів з використанням GEE наведено на рис. 1.

Води річки Південний Буг класифікуються як оптично складні води, де інтенсивне поглинання світла забарвленою розчиною органічною речовиною та розсіювання неорганічними зависями у синьому і зеленому діапазонах знижує ефективність традиційних алгоритмів [4]. Алгоритм NDCI обчислюється як нормалізоване відношення між сигнальним каналом B5 (705 нм), що фіксує інтенсивний пік клітинного розсіювання та флуоресценції фітопланктону, та референсним каналом B4 (665 нм), який відповідає зоні максимального поглинання світла хлорофілом а [1]:

$$NDCI = \frac{Band5 - Band4}{Band5 + Band4} \quad (2)$$

Аналіз був зосереджений на літньо-осінньому меженому періоді (червень – вересень), оскільки саме за умов високих температур та зниження швидкості водообміну наслідки азотного збагачення проявляються найбільш екстремально [20].

Просторовий аналіз просторового розподілу NDCI дозволяє здійснювати екологічний моніторинг з роздільною здатністю до 20 метрів [1]. Позитивні та стрімко зростаючі показники NDCI безпосередньо корелюють з експоненціальним зростанням біомаси фітопланктону та вказують на високу ймовірність формування токсичних ціанобактеріальних матів [17].

Динаміка NDCI у Південному Бузі слугує маркером походження забруднення (рис. 2). Локалізовані "гарячі точки" з аномально високими значеннями

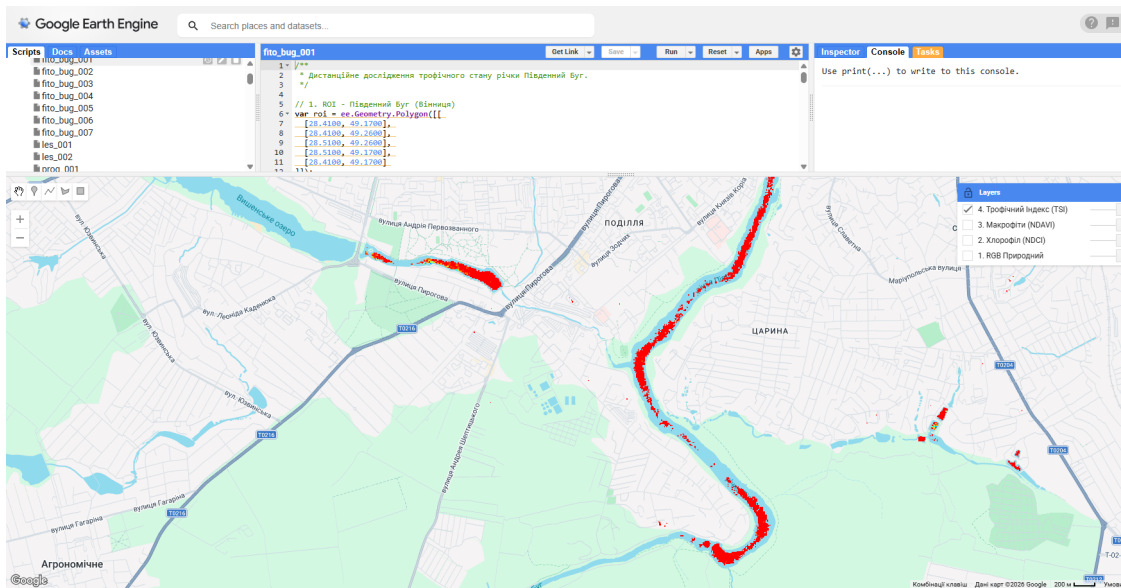


Рис. 1. Виділення зон масового цвітіння водоростей у акваторії Сабарівського водосховища

NDCI, зафіксовані безпосередньо нижче за течією від промислових об'єктів або міських очисних споруд, є прямими індикаторами точкових скидів неочищених стічних вод [21]. Натомість, масштабні зони інтенсивного "цвітіння", що просторово збігаються з великими сільськогосподарськими масивами у середній течії річки, відображають наслідки масивного поверхневого змиву нітратів (дифузне азотне забруднення) [22].

Це дозволяє не лише кількісно оцінювати ступінь гіперевтрофікації, але й об'єктивно локалізувати первинні джерела та шляхи міграції азотного навантаження в масштабах усього річкового басейну, що є необхідним для формування превентивних стратегій водного менеджменту [22].

Вища водна рослинність (макрофіти) демонструє довгострокові, інтегральні відповіді екосистеми на зміну трофічного статусу та накопичення біогенних елементів у донних відкладеннях [23].

При надлишковому азотному навантаженні на екосистему Південного Бугу відбувається кардинальне порушення балансу фітоценозів: екстремальне "цвітіння" води різко знижує її прозорість, що призводить до деградації та загибелі укорієних занурених макрофітів через нестачу світла. Звільнену екологічну нішу займають вільноплаваючі макрофіти та поверхневі ціанобактеріальні мати, здатні витягувати нутрієнти безпосередньо з товщі води [24].

Дистанційна ідентифікація макрофітів у річкових умовах ускладнюється тим, що водне середовище суттєво поглинає та розсіює сигнал у ближньому інфрачервоному (NIR) діапазоні спектра [25]. З метою прецизійного картування вищої водної рослинності в оптично складних водах річки Південний Буг на основі багатоспектральних даних Sentinel-2 було застосовано комплекс спеціалізованих вегетаційних індексів. Зокрема, для

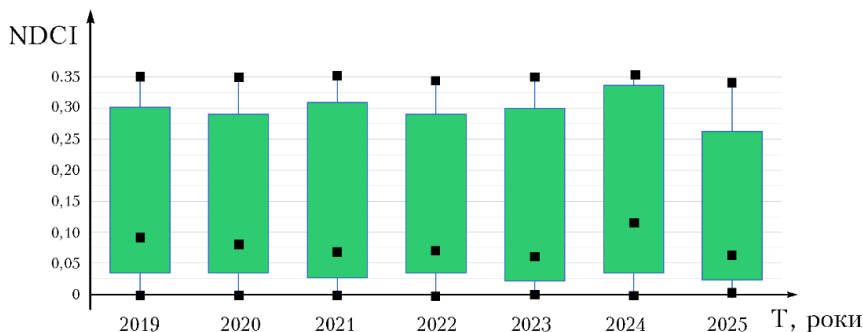


Рис. 2. Діаграма розмаху для нормалізованого різницевого індексу хлорофілу у літній період

ідентифікації та просторового картування занурених макрофітів (підводних луків) застосовано нормалізований різницевий індекс водної рослинності (NDAVI). На відміну від класичних індексів наземної рослинності, в алгоритмі NDAVI червоний спектральний канал, який характеризується високим коефіцієнтом загасання у воді, замінено на синій канал (Band 2 місії Sentinel-2, центральна довжина хвилі 490 нм) [17]:

$$NDAVI = \frac{Band8 - Band2}{Band8 + Band2} \quad (3)$$

де $Band8$ – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (842 нм),

$Band2$ – відбиття у синьому діапазоні (490 нм).

На мілководних річкових ділянках Південного Бугу дно або густі мінеральні зависі можуть проглядатися крізь товщу води і спотворювати корисний сигнал рослинності, через що традиційний індекс NDVI часто дає нестабільні результати [26, 27]. Індекс SAVI мінімізує вплив "яскравості дна" (субстрату) завдяки введенню емпіричного поправочного коефіцієнта:

$$SAVI = \frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4 + L} \times (1 + L), \quad (4)$$

де $Band4$ – відбиття у червоному діапазоні (665 нм),

L – коригувальний коефіцієнт яскравості фону (у даному дослідженні $L = 0,428$, що є оптимальним для мілководних умов) [26, 27].

Індекс плаваючих водоростей (FAI) використовується для детектування таких проявів евтрофікації, як щільні поверхневі скупчення плаваючих макрофітів (наприклад, ряски) та ціанобактеріальних матів [14]. Він базується на відніманні сигналу базової лінії (NIR') від сигналу у смузі 8 ближнього інфрачервоного діапазону [14]:

$$FAI = Band8_{NIR} - NIR' \quad (5)$$

де сигнал базової лінії розраховується як:

$$NIR' = Band4_{Red} + (Band11_{SWIR} - Band4_{Red}) \times \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{Red}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{Red}} \quad (6)$$

де $\lambda_{Red4} = 664,6$ нм, $\lambda_{NIR8} = 832,8$ нм, $\lambda_{SWIR11} = 1613,7$ нм – центральні довжини хвиль для відповідних каналів Sentinel-2: Band 4, Band 8 та Band 11.

Просторове картування та аналіз цих індексів у GEE дозволяє створити автоматизовані карти сукцесії фітоценозів [14]. Зони русла Південного Бугу, що характеризуються високими значеннями FAI та одночасною зменшенням показників NDAVI і SAVI, є ділянками із найбільш критичним, довгостроковим забрудненням нітрогенвмісними сполуками.

Комплексна оцінка екологічного здоров'я та якості води Південного Бугу вимагає переходу від аналізу окремих параметрів до використання інтегральних показників. Традиційний у гідроекології є індекс трофічного стану (Trophic State Index – TSI) за Карлсоном, який в умовах інтенсивного азотного та фосфорного навантаження відображає ступінь евтрофікації водойми. Для оцінки TSI у середовищі GEE використано спектральний індекс ND34 [28] зелений спектральний канал (Band 3, 560 нм) відображає локальний мінімум поглинання світла хлорофілом та високе розсіювання у товщі води, тоді як червоний канал (Band 4, 665 нм) відповідає зоні максимального поглинання фотосинтетичним пігментом:

$$ND34 = \frac{Band3 - Band4}{Band3 + Band4} \quad (7)$$

де $Band3$ та $Band4$ – значення відбивальної здатності у зеленому та червоному каналах супутника Sentinel-2.

Сучасні дослідження демонструють сильну лінійну кореляцію ($R^2 = 0,86$) між значеннями індексу ND34 та показниками індексу TSI, отриманими на основі вимірювань прозорості [28]:

$$TSI = S \cdot ND34 + I \quad (8)$$

Для прісноводних систем встановлені такі емпіричні коефіцієнти – $S = -819,4$, а $I = 245,5$. Хоча ці коефіцієнти можуть потребувати локального калібрування для окремих ділянок Південного Бугу,

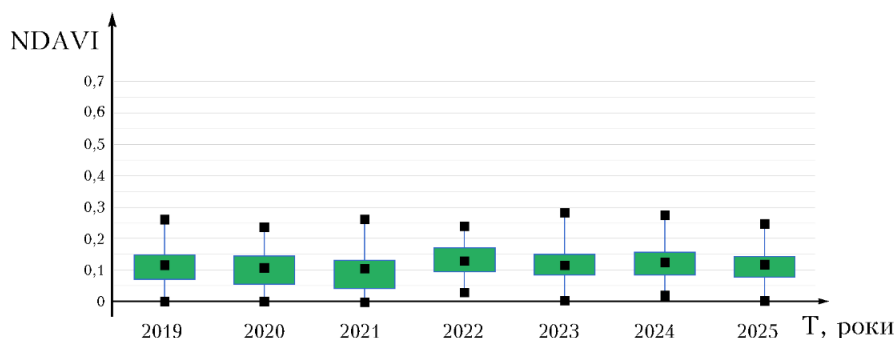


Рис. 3. Діаграма розмаху для нормалізованого різницевого індексу водної рослинності у літній період

загальний підхід дозволяє отримувати точні просторові карти класифікації якості води з похибкою менше 17%.

На основі розрахованих дистанційно значень TSI здійснюється піксельна класифікація акваторії за наступною екологічною шкалою [28]:

– TSI < 40 (оліготрофний стан). Прозорість за диском Секкі понад 4,0 м. Чиста вода з низьким азотним навантаженням.

– TSI 41-50 (мезотрофний стан). Прозорість 2,0 – 3,9 м. Помірне збагачення біогенними елементами, проміжна стадія екосистеми.

– TSI 51-60 (евтрофний стан). Прозорість 1,0 – 1,9 м. Високий вміст сполук азоту та фосфору (N/P), що супроводжується частими "цвітіннями" фітопланктону та початком деградації екосистеми.

– TSI > 60 (гіперевтрофний стан). Прозорість менше 0,9 м. Стан критичного азотного забруднення, який характеризується суцільним розвитком ціанобактерій та макрофітів, жорсткою гіпоксією і максимальним екологічним ризиком.

Таким чином, використання комбінації зеленого і червоного спектральних каналів (ND34) трансформує багатоспектральні супутникові дані у зручний інструмент екологічного управління, дозволяючи автоматизовано ідентифікувати найбільш забруднені зони річкового басейну.

Перехід від традиційного точкового моніторингу до просторового супутникового аналізу дозволяє з високою точністю (до 10 метрів) ідентифікувати локальні зони екологічного ризику – "гарячі точки" в акваторії Південного Бугу [18]. Локалізація таких зон за допомогою дистанційного зондування дає змогу розмежувати вплив точкових та дифузних джерел забруднення. Точкові джерела забруднення формуються переважно за рахунок скидів недостатньо очищених комунально-побутових та промислових стічних вод великих міст, що розташовані на берегах річки [29]. Критичним прикладом такої "гарячої точки" є Сабарівське водосховище в межах водозбору м. Вінниця. Натурні вимірювання зафіксували екстремальну концентрацію азоту амонійного ($14,35 \text{ мг/дм}^3$) безпосередньо у місці скиду зворотних вод КП «Вінницяоблводоканал», що спровокувало кисневе голодування (гіпоксію) та падіння рівня розчиненого кисню до критичних $1,82\text{--}2,92 \text{ мгО/дм}^3$ нижче за течією [21]. Супутникові карти індексу хлорофілу (NDCI) дозволяють візуалізувати різкий просторовий градієнт NDCI безпосередньо нижче точок скиду очисних споруд чи промислових об'єктів є беззаперечним дистанційним індикатором точкового забруднення неочищеними стічними водами [22].

Дифузне забруднення пов'язане з поверхневим зливом залишків мінеральних та органічних добрив з інтенсивно оброблюваних агроландшафтів басейну Південного Бугу [29]. На супут-

никових знімках такі "гарячі точки" проявляються як масштабні зони інтенсивного "цвітіння", які просторово прилягають до великих сільськогосподарських масивів. Це свідчить про високі рівні поверхневого зливу нітратів після опадів [30].

Отримана за допомогою біооптичних індексів (NDCI для фітопланктону та NDAVI, FAI для макрофітів) доказова база є фундаментальною основою для ухвалення ефективних рішень у сфері управління водними ресурсами:

– просторова ідентифікація "гарячих точок" у режимі, наближеному до реального часу, дозволяє екологічним інспекціям і Державному агентству водних ресурсів превентивно виявляти локації дифузних скидів та приховані несанкціоновані стоки стічних вод, оптимізуючи маршрути відбору натурних проб [22].

– супутникові карти (індекси NDAVI та FAI) чітко ідентифікують зони надмірного розростання плаваючих та занурених макрофітів, які виступають потужними накопичувачами азоту. Кероване механічне вилучення цієї рослинності до початку її осіннього відмирання є прямим інженерним способом вилучення накопиченого азоту з екосистеми, що запобігає вторинному забрудненню та покращує трофічний статус річки [29].

– супутникові дані критично необхідні для просторового планування та подальшого моніторингу ефективності штучних водно-болотних угідь. Вони виконують роль природних біофільтрів для перехоплення азотовмісних сполук перед їх потраплянням в основне русло Південного Бугу [22].

В умовах прогресуючого зменшення річкового стоку через кліматичні зміни та ризиків, зумовлених військовими діями, автоматизований супутниковий моніторинг "гарячих точок" стає безальтернативним інструментом антикризового управління для гарантування національної водної безпеки.

Опрацювання багатоспектральних супутникових зображень Sentinel-2 (MSI) за допомогою розробленого автоматизованого алгоритму в GEE дозволило реконструювати просторово-часову динаміку трофічного стану Південного Бугу (рис. 5). Аналіз був зосереджений на літньо-осінньому періоді (червень – вересень) 2019–2025 років, оскільки саме в умовах межені та високих температур вплив азотного навантаження проявляється найгостріше.

Аналіз графіків нормалізованого різницевого індексу хлорофілу (NDCI) виявив значну просторову гетерогенність розподілу біомаси мікродоростей, що корелює з антропогенними впливами [22]. Найвищі стабільні значення NDCI були зафіксовані на ділянках річки з уповільненим водообміном, зокрема в акваторії Сабарівського водосховища поблизу м. Вінниця. Отримані супутникові дані повністю підтверджуються резуль-

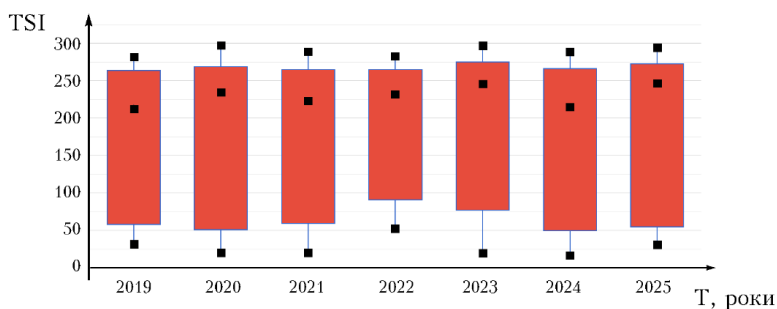


Рис. 4. Діаграма розмаху для трофічного індексу Карлсона у літній період

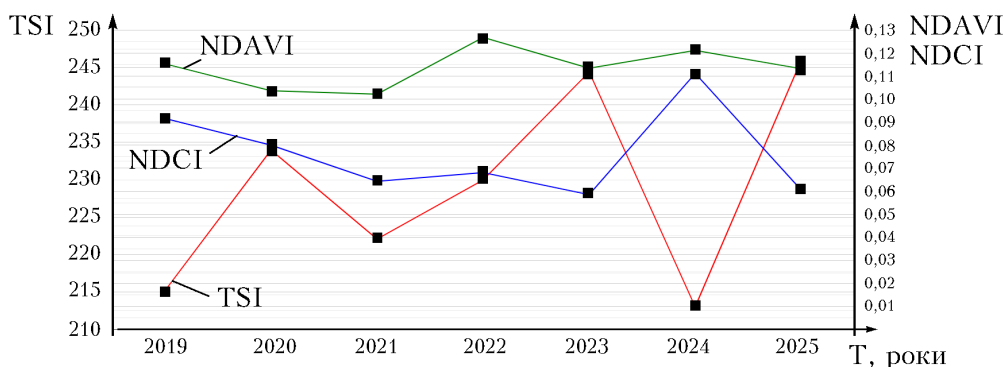


Рис. 5. Порівняння медіанних трендів для трофічного індексу Карлсона (TSI), нормалізованого різницевого індексу хлорофілу (NDCI) та нормалізованого різницевого індексу водної рослинності (NDAVI) у літній період

татами натурного моніторингу. Експоненційне зростання індексу NDCI просторово збігається із зонами екстремального скиду азотовмісних сполук. Так, у травні 2024 року безпосередньо у місці скиду зворотних вод комунальних очисних споруд у Вінниці було зафіксовано концентрацію азоту амонійного – 14,35 мг/дм³, що багатократно перевищує норматив [21]. Біологічна асиміляція такого масиву нутрієнтів фітопланктоном та подальший киснеємний процес бактеріальної нітрифікації призвели до жорсткої гіпоксії: рівень розчиненого кисню нижче за течією впав до критичних 1,82–2,92 мгО/дм³. Таким чином, різкі просторові градієнти NDCI успішно виступили дистанційним маркером точкового азотного забруднення та індикатором зон гострого екологічного ризику (заморних явищ).

Висновки. Впровадження багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2 (MSI) в архітектуру хмарних обчислень GEE довело свою високу ефективність для великомасштабного екологічного моніторингу зарегульованих річкових систем. На відміну від традиційного точкового відбору проб, просторова роздільна здатність 10–20 метрів дозволяє здійснювати піксель-

но-точну ідентифікацію зон екологічного ризику на всій протяжності річкового русла. Розрахунок нормалізованого різницевого індексу хлорофілу (NDCI) з використанням спектральних каналів «червоного краю» підтвердив статус мікроростерей як високочутливого біомаркера гострого забруднення. Просторовий розподіл NDCI дозволив чітко просторово локалізувати "гарячі точки" експоненційного росту біомаси, які безпосередньо корелюють з точковими комунальними скидами та зонами дифузного аграрного стоку. Розроблена дистанційна методологія є фундаментальною основою для ухвалення рішень у сфері управління водними ресурсами. Подальші дослідження мають бути спрямовані на перехід від емпіричних спектральних формул до впровадження алгоритмів машинного навчання та мультисенсорного злиття даних, що дозволить прогнозувати трофічні кризи та гарантувати національну водну безпеку в умовах техногенного та військового навантаження.

Перспективи використання результатів дослідження. Розроблена методологія слугує фундаментальною базою для ухвалення ефективних управлінських рішень у сфері водного менеджменту, оскільки дозволяє об'єктивно

локалізувати первинні джерела та шляхи міграції азотного навантаження. Крім того, просторова ідентифікація надмірного розростання рослинності необхідна для раціонального планування

керованого механічного вилучення макрофітів, а також для проектування та моніторингу штучних водно-болотних угідь як природних біофільтрів.

Література

1. Salls W., Schaeffer B., Pahlevan N., Coffe M., Seegers B., Werdell P., Ferriby H., Stumpf R., Binding C., Keith D. Expanding the Application of Sentinel-2 Chlorophyll Monitoring across United States Lakes. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, № 11. P. 1977. DOI: 10.3390/rs16111977.
2. Shakhman I., Bystriantseva A. Water Quality Assessment of the Surface Water of the Southern Bug River Basin by Complex Indices. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, № 1. P. 195–205. DOI: 10.12911/22998993/128858.
3. Belous Ye. P., Barinova S. S., Klochenko P. D. Phytoplankton of the upper Section of the South Bug River as Indicator of its Ecological Status. *Hydrobiological Journal*. 2013. Vol. 49, № 1. P. 39–50. DOI: 10.1615/Hydrobiol.v49.i1.50.
4. Anspër-Toomsalu A., Uusõue M., Kangro K., Hieronymi M., Alikas K. Suitability of different in-water algorithms for eutrophic and absorbing waters applied to Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI data. *Frontiers in Remote Sensing*. 2024. Vol. 5. P. 1423332. DOI: 10.3389/frsen.2024.1423332.
5. Lopez Barreto B. N., Hestir E. L., Lee C. M., Beutel M. W. Satellite Remote Sensing: A Tool to Support Harmful Algal Bloom Monitoring and Recreational Health Advisories in a California Reservoir. *GeoHealth*. 2024. Vol. 8, № 2. P. e2023GH000941. DOI: 10.1029/2023GH000941.
6. He H., Chen K., Du Y., Li K., Liu Z., Jeppesen E., Søndergaard M. Increased Nitrogen Loading Boosts Summer Phytoplankton Growth by Alterations in Resource and Zooplankton Control: A Mesocosm Study. *Frontiers in Environmental Science*. 2021. Vol. 9. P. 772314. DOI: 10.3389/fenvs.2021.772314.
7. Ogashawara I., Kiel C., Jechow A., Kohnert K., Ruhtz T., Grossart H.-P., Hölker F., Nejtgaard J. C., Berger S. A., Wollrab S. The Use of Sentinel-2 for Chlorophyll-a Spatial Dynamics Assessment: A Comparative Study on Different Lakes in Northern Germany. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, № 8. P. 1542. DOI: 10.3390/rs13081542.
8. Rakasach C., Chaichana R., Phonmat P., Klongvessa P., Moukomla S., Chanthorn W. Integrating Satellite Remote Sensing and Field Measurements for Assessing Nitrogen and Phosphorus Dynamics in Tropical Freshwater Ecosystems of Thailand. *Environments*. 2026. Vol. 13, № 1. P. 57. DOI: 10.3390/environments13010057.
9. Aranha T. R. B. T., Martinez J.-M., Souza E. P., Barros M. U. G., Martins E. S. P. R. Remote Analysis of the Chlorophyll-a Concentration Using Sentinel-2 MSI Images in a Semiarid Environment in Northeastern Brazil. *Water*. 2022. Vol. 14, № 3. P. 451. DOI: 10.3390/w14030451.
10. Bytyçi P., Shala-Abazi A., Zhushi-Etemi F., Bonifazi G., Hyseni-Spahi M., Fetoshi O., Çadraku H., Feka F., Millaku F. The Macrophyte Indices for Rivers to Assess the Ecological Conditions in the Klina River in the Republic of Kosovo. *Plants*. 2022. Vol. 11, № 11. P. 1469. DOI: 10.3390/plants11111469.
11. Soriano-González J., Urrego E. P., Sòria-Perpinyà X., Angelats E., Alcaraz C., Delegido J., Ruíz-Verdú A., Tenjo C., Vicente E., Moreno J. Towards the Combination of C2RCC Processors for Improving Water Quality Retrieval in Inland and Coastal Areas. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 5. P. 1124. DOI: 10.3390/rs14051124.
12. Xin Y., Luo J., Zhai J., Wang K., Xu Y., Qin H., Chen C., You B., Cao Q. An Automatic Algorithm for Mapping Algal Blooms and Aquatic Vegetation Using Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 MSI Data. *Land*. 2025. Vol. 14, № 3. P. 592. DOI: 10.3390/land14030592.
13. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, № 10. P. 2118–2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012.
14. Thamaga K. H., Dube T. Remote sensing of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review on applications and challenges. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2018. Vol. 10. P. 36–46. DOI: 10.1016/j.rsase.2018.02.005.
15. Wang L., Xu M., Liu Y., Liu H., Beck R., Reif M., Emery E., Young J., Wu Q. Mapping Freshwater Chlorophyll-a Concentrations at a Regional Scale Integrating Multi-Sensor Satellite Observations with Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 20. P. 3278. DOI: 10.3390/rs12203278.
16. Wolters T., Detenbeck N. E., Rego S., Freeman M. Evaluation of Atmospheric Preprocessing Methods and Chlorophyll Algorithms for Sentinel-2 Imagery in Coastal Waters. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17, № 20. P. 3503. DOI: 10.3390/rs17203503.
17. Akbarnejad Nesheli S., Quackenbush L. J., McCaffrey L. Estimating Chlorophyll-a and Phycocyanin Concentrations in Inland Temperate Lakes across New York State Using Sentinel-2 Images: Application of Google Earth Engine for Efficient Satellite Image Processing. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, № 18. P. 3504. DOI: 10.3390/rs16183504.
18. Kwong I. H. Y., Wong F. K. K., Fung T. Automatic Mapping and Monitoring of Marine Water Quality Parameters in Hong Kong Using Sentinel-2 Image Time-Series and Google Earth Engine Cloud Computing. *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. P. 871470. DOI: 10.3389/fmars.2022.871470.
19. Karakus P. Detection of Water Surface Using Canny and Otsu Threshold Methods with Machine Learning Algorithms on Google Earth Engine: A Case Study of Lake Van. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 6. P. 2903. DOI: 10.3390/app15062903.
20. He H., Zhang L., Ning X., Mao Z., Jeppesen E. Nitrogen loading increases both algal and non-algal turbidity in subtropical shallow mesocosms: Implication for nutrient management. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*. 2023. № 424. P. 23. DOI: 10.1051/kmae/2023019.
21. Результати чергового спостереження якості поверхневої води річки Південний Буг. Державна екологічна інспекція у Вінницькій області. Офіційний веб-портал. URL: https://www.vin.gov.ua/images/doc/vin/ODA/ogoloshenia/Zvit_SEO.pdf (дата звернення: 05.01.2026).

22. Kvaterniuk S., Mandebura S., Latusha D., Maksymenko M., Mykhalchuk O. Prevention of contamination of the Southern Bug River with nitrogen compounds using constructed wetlands. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16. № 1. P. 89-97. DOI: 10.63341/esbur/1.2025.89.
23. Khanna S., Hestir E. L., Bellvert J., Boyer J. D., Shapiro K. D., Ustin S. L. A new index for detection of submerged aquatic plants under variable quality water: an extension of the soil-line concept. *GIScience & Remote Sensing*. 2024. Vol. 61, № 1. P. 2399386. DOI: 10.1080/15481603.2024.2399386.
24. Ade C., Khanna S., Lay M., Ustin S. L., Hestir E. L. Genus-Level Mapping of Invasive Floating Aquatic Vegetation Using Sentinel-2 Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 13. P. 3013. DOI: 10.3390/rs14133013.
25. Rodríguez-Garlito E. C., Paz-Gallardo A., Plaza A. Mapping Invasive Aquatic Plants in Sentinel-2 Images Using Convolutional Neural Networks Trained With Spectral Indices. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2023. Vol. 16. P. 2889–2899. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3257142.
26. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). Sentinelhub. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/savi/> (дата звернення: 05.01.2026).
27. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25, № 3. P. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
28. Sherjah P. Y., Sajikumar N., Nowshaja P. T. Quality monitoring of inland water bodies using Google Earth Engine. *Journal of Hydroinformatics*. 2023. Vol. 25, № 2. P. 432–450. DOI: 10.2166/hydro.2023.137.
29. Kvaterniuk S.M., Petruk V.G., Frolov V.F., Onyschuk V.E., Wojcik W., Pawlowski L., Smailova S., Kalizhanova A. Restoration Of The Southern Bug River Ecosystem By Removing The Biomass Of Higher Water Plants. *International Journal of Conservation Science*. 2021. Vol. 12. Special Issue 1. P. 755-764.
30. Asres B. W., Kebedew M. G., Nerae M. D., Tsegaye S., Zimale F. A. Remote sensing-based estimation of Chlorophyll-a concentrations in a water hyacinth-infested tropical headwaters lake: a study of Lake Tana, Ethiopia. *Frontiers in Water*. 2025. Vol. 7. P. 1600222. DOI: 10.3389/frwa.2025.1600222.

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026