УДК 504.064.3:528.88(262.5)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.22

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА МІНЛИВІСТЬ ОПТИЧНОГО СТАНУ ТИЛІГУЛЬСЬКОГО ТА БЕРЕЗАНСЬКОГО ЛИМАНІВ: ЕКОЛОГІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ 2018–2025 РР.

Магась Н.І. (orcid.org/0000-0002-2579-1465)
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54007, м. Миколаїв
natalya.magas@nuos.edu.ua

Для Тилігульського та Березанського лиманів північно-західного Причорномор'я досліджено просторово-часову мінливість оптичного стану води та стійкість міжлиманних відмінностей. Порівняно синхронні спостереження Sentinel-2 за травень–жовтень 2018–2025 рр., термальні дані Landsat 8/9 і регіональні змінні ERA5-Land. Спектральні показники аналізували за групами, пов'язаними з пігментним сигналом, каламутністю та речовинним складом, а також із рослинністю; для міжлиманних порівнянь застосовано парні різницеві ряди й корекцію множинних перевірок. За атмосферними та водно-балансовими змінними ERA5-Land статистично значущої різниці між лиманами не виявлено (мінімальне q = 0,102). Березанський лиман мав вищі значення пігмент- і речовинно-чутливих оптичних показників у 7–8 роках із 8. Сезонні профілі показали червневий максимум каламутність-проксі та пізніший пігмент-чутливий сигнал: у Тилігульському лимані нормалізований різницевий хлорофільний індекс (Normalized Difference Chlorophyll Index, NDCI) досягав максимуму в серпні, а в Березанському високі значення зберігалися від червня до жовтня. За опорним рівнем, визначеним багаторічною медіаною NDCI Тилігульського лиману, середня тривалість перевищення становила 3,00 місяця на рік у Тилігульському та 5,88 у Березанському; різниця зберігалася за всіх альтернативних порогів (2,75–3,75 місяця). Спільний опорний рівень NDCI (90-й процентиль Тилігульського лиману) перевищували 99,4 % акваторії Березанського та 10,0 % Тилігульського лиману. За власною шкалою кожного лиману частка вищої відносної категорії NDCI зростає від гирла до вершини, а прибережна смуга завширшки 100 м, що займає близько 11 % акваторії, концентрує 32,0 і 40,8 % пікселів цієї категорії. У 2018–2025 рр. значущі міжрічні тренди виявлено для п'яти з дванадцяти оптичних показників Березанського лиману та для жодного – Тилігульського; тенденція до збільшення контрасту в парних різницевих рядах після корекції Benjamini–Hochberg незначуща (q = 0,078). Термальні характеристики лиманів після корекції значуще не різнилися, а відмінність сили залишкового зв'язку NDCI з температурою водної поверхні не підтверджена блоковим bootstrap (p = 0,216). Отже, Березанський лиман характеризується тривалішим і просторово поширенішим підвищеним оптичним сигналом, а вершинні та прибережні мілководні ділянки обох водойм є пріоритетними для натурного моніторингу. *Ключові слова:* Тилігульський лиман; Березанський лиман; оптичний стан; Sentinel-2; сезонна динаміка; просторово-часова мінливість; екологічний моніторинг; дистанційне зондування.

Spatiotemporal Variability of the Optical State of the Tyligul and Berezan Limans: Ecological Interpretation of Satellite Observations, 2018–2025. Magas N.

This study examined the spatiotemporal variability of the optical state of the Tyligul and Berezan Limans in the Northwestern Black Sea region and the persistence of between-liman differences. Synchronous Sentinel-2 observations for May–October 2018–2025 were compared with Landsat 8/9 water-surface thermal data and regional ERA5-Land variables. Spectral metrics were interpreted in pigment-sensitive, turbidity/constituent-related, and vegetation-related groups; paired between-liman difference series were assessed with multiple-testing correction. No statistically significant between-liman difference was detected in the examined ERA5-Land atmospheric and water-balance variables (minimum q = 0.102). Berezan showed higher values of pigment- and constituent-sensitive optical metrics in 7–8 of 8 years. Seasonal profiles showed a June maximum in the turbidity proxy and a later pigment-sensitive signal: the Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) peaked in August in Tyligul, whereas high values persisted from June through October in Berezan. Relative to the long-term median Tyligul NDCI reference, mean annual exceedance duration was 3.00 months in Tyligul and 5.88 months in Berezan, and the difference persisted across all alternative thresholds (2.75–3.75 months). A common NDCI reference level (the 90th percentile of Tyligul) was exceeded over 99.4% of the Berezan and 10.0% of the Tyligul water area. On each liman's own scale, the share of the higher relative NDCI category increased from the mouth to the upper reach, and the 100 m nearshore strip, occupying about 11% of the water area, contained 32.0% and 40.8% of higher-category pixels, respectively. During 2018–2025, five of twelve optical metrics showed significant interannual trends in Berezan and none did so in Tyligul; the tendency towards a widening contrast in paired difference series was not significant after Benjamini–Hochberg correction (q = 0.078). Thermal characteristics did not differ significantly after correction, and a year-block bootstrap did not confirm a difference in the strength of the seasonally adjusted NDCI–water-surface temperature association (p = 0.216). Thus, Berezan was characterized by a longer-lasting and more spatially widespread elevated optical signal, while upper and nearshore shallow-water sectors of both limans are priority areas for field monitoring. *Key words:* Tyligul Liman; Berezan Liman; optical state; Sentinel-2; seasonal dynamics; spatiotemporal variability; ecological monitoring; remote sensing.

© Магась Н.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Прибережні лимани є оптично й гідрологічно складними водними системами, у яких зміни водного балансу, солоності, перемішування, морського водообміну, річкового стоку та біопродукційних процесів відбуваються на близьких просторових і часових масштабах. Супутникові спостереження дають змогу регулярно простежувати таку мінливість у межах усієї акваторії. Водночас у внутрішніх і перехідних водах їх слід інтерпретувати обережно, оскільки на спектральний сигнал одночасно впливають фітопланктон, завислий матеріал, забарвлена розчинена органічна речовина, мілководдя та донне відбиття [1]. Просторово-часова мінливість оптичного стану дає змогу виявляти неоднорідність процесів у межах водойми та ділянки й періоди найбільш виражених змін.

Актуальність дослідження. Для квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я важливим довготривалим чинником є дефіцит прісноводного балансу. За регіональними оцінками, зміни клімату зменшують співвідношення прісного надходження і втрат на випаровування, підвищуючи вразливість водойм до обміління та засолення [2]. Сусідні лимани, однак, можуть по-різному реагувати на подібні регіональні атмосферні умови. Такі відмінності можуть бути пов'язані з конфігурацією морського зв'язку, водністю басейну, часом утримання води та внутрішніми біогеохімічними процесами. Порівняння Тилігульського та Березанського лиманів дає змогу оцінити стійкість відмінностей їхнього оптичного стану й окреслити можливу роль локальних властивостей систем.

Обидва лимани мають значне природоохоронне й господарське значення. Тилігульський лиман є Рамсарським угіддям і входить до Смарагдової мережі; Березанський лиман також включений до Смарагдової мережі [3, 4]. Для обох систем характерне поєднання мілководних, гирлових і прибережних біотопів. Березанський лиман має також рибогосподарське значення [5], що підсилює практичну цінність просторово й сезонно орієнтованого екологічного моніторингу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями

Робота пов'язана із завданнями, визначеними Водною стратегією України на період до 2050 року [6], Планом управління річковим басейном річок Причорномор'я на 2025–2030 роки (далі – ПУРБ) [7], Комплексною програмою охорони довкілля Миколаївської області на 2021–2027 роки [8], регіональною системою моніторингу довкілля Миколаївської області [9] та науково-дослідною роботою «Розробка заходів та засобів раціонального водокористування, зниження антропогенного навантаження на водні екосистеми півдня України» (державний реєстраційний № 0124U001593). Отримані результати можуть бути використані для моніторингового супроводу регіонального ландшафтного парку «Тилігульський» [10], ключових територій регіональної екологічної та Смарагдової мереж [4], а також міжрегіональних заходів зі збереження Тилігульського лиману [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тилігульський і Березанський лимани є природним полігоном для порівняння. Тилігульський лиман має штучний канал зв'язку з Чорним морем; моделювання раніше показувало, що ефективність такого зв'язку суттєво залежить від морфометричних характеристик каналу [12]. Сучасні польові дані засвідчили, що реконструкція каналу 2016–2017 рр. не забезпечила очікуваного посилення двобічного водообміну: фактичний поперечний переріз і глибина каналу виявилися суттєво меншими за проєктні, а гідроекологічні показники не продемонстрували очікуваного поліпшення [13]. Березанський лиман, натомість, поповнюється морськими водами через протоку та річковим стоком. Більшість річок, що впадають у Березанський лиман, є сезонними степовими водотоками, які пересихають улітку [14], а водність р. Березань істотно антропогенно трансформована каскадом ставків і водосховищ [15].

Простежити, як ці відмінності морського водообміну й річкового живлення проявляються в стані водного середовища в межах усієї акваторії та впродовж багатьох сезонів, дають змогу супутникові спектральні показники. Для оптично складних вод одним із найуживаніших серед них є red-edge показник Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI), запропонований для оцінювання хлорофілу-а у каламутних продуктивних водах. Автори алгоритму наголошували, що без локальних натурних даних NDCI доцільніше використовувати для якісної або відносної інтерпретації [16]. Maximum Chlorophyll Index (MCI) [17] та Maximum Peak Height (MPH) [18] характеризують висоту red-edge піку відносно спектральної базової лінії. Floating Algae Index (FAI) створено для виявлення поверхневого матеріалу за відхиленням відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні (near-infrared, NIR) від базової лінії між червоним і короткохвильовим інфрачервоним (shortwave infrared, SWIR) діапазонами [19].

Дослідження середземноморських озер і лагун демонструють як можливості, так і обмеження застосування водно-оптичних алгоритмів у різних типах водойм. За даними Sentinel-2 після локальної калібровки можуть бути отримані прийнятні оцінки концентрації хлорофілу-а (Chl-a), загальної концентрації завислих речовин (Total Suspended Solids, TSS) і забарвленої розчиненої органічної речовини (Colored Dissolved Organic Matter, CDOM) [20]. Для лагун Мар-Менор і Авейру показано, що точність таких оцінок істотно залежить від польової валідації, способу атмосферної корекції та локальних оптичних властивостей води [21, 22]. В оптично мілких водоймах додатковим джерелом невизначеності є донне відбиття, яке може істотно змінювати спек-

тральний сигнал водної поверхні [23]. Для оптично складних лиманних вод доцільним є спільний аналіз кількох спектральних характеристик, що відображають різні складові оптичного стану, без інтерпретації окремого індексу як прямого показника певного екологічного процесу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття

Сусідні лиманні системи за подібних регіональних атмосферних умов можуть істотно відрізнятися за характером змін оптичного стану води. Для Тилігульського та Березанського лиманів недостатньо з'ясовано, наскільки стійкими є ці відмінності, чи охоплюють вони всю акваторію або формуються переважно в окремих функціональних зонах, а також якою мірою їх можна пояснити регіональним атмосферним і термічним фоном та локальними особливостями функціонування кожної водойми. Важливим залишається визначення періодів і ділянок найбільш виражених змін, що мають пріоритетне значення для подальшого екологічного моніторингу.

Метою роботи було охарактеризувати просторово-часову мінливість оптичного стану Тилігульського та Березанського лиманів у 2018–2025 рр., встановити стійкість міжлиманних відмінностей, надати їм екологічну інтерпретацію та перевірити їх узгодженість з атмосферними чинниками й температурним режимом водної поверхні.

Новизна

Наукова новизна полягає у встановленні стійкого й спектрально селективного оптичного контрасту двох сусідніх лиманів за подібних регіональних атмосферних умов. Для Тилігульського та Березанського лиманів синхронно охарактеризовано рівень, сезонну тривалість, просторове охоплення та міжрічну динаміку цього контрасту, виокремлено типи оптичного сигналу за сезонним ходом аналітичних блоків, а також перевірено узгодженість контрасту з атмосферним і термічним фоном.

Методологічне або загальнонаукове значення

Парна схема аналізу різниць і корекція множинних порівнянь дають змогу відокремити стійкі міжлиманні відмінності від тенденцій із невизначеним статистичним статусом, а перевірка за альтернативними опорними рівнями – оцінити стійкість сезонних і просторових висновків до вибору порога.

Викладення основного матеріалу

1. Матеріали та методи

Досліджено Тилігульський і Березанський лимани північно-західного Причорномор'я (рис. 1). Для порівняння оптичного стану за 2018–2025 рр. використовували фіксовані полігони акваторій обох лиманів.

Довідкові характеристики об'єктів (за джерелами [7, 12, 13, 24–26]) та площі аналітичних полігонів наведено в табл. 1. Площа цифрового полігона відрізняється від довідкової площі акваторії, оскільки визначає фіксовану область супутникового аналізу; площі басейнів наведено для основних річок, а не для повних водозборів лиманів.

Оптичний стан за 2018–2025 рр. аналізували за Sentinel-2 (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) у Google Earth Engine. Відбирали сцени з CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE < 40 %, виключали хмари, тіні, сніг/лід і невалідні пікселі за Scene Classification Layer.

Водну поверхню визначали комбінованою маскою MNDWI > 0 [27] та NDVI < 0,20 [28], де MNDWI – модифікований нормалізований різницевий водний індекс (Modified Normalized Difference Water Index), NDVI – нормалізований різницевий вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index). Для основного річного блоку (червень–серпень, далі – JJA) індекси обчислювали на окремих валідних сценах, формували річні медіанні композити й визначали зональні середні в межах фіксованого полігона кожного лиману на масштабі 20 м. Для сезонного аналізу за травень–жовтень будували прямі місячні медіанні композити спектральних каналів (3–17 сцен на місяць для Березанського і 10–52 для Тилігульського лиману), за якими розраховували NDCI, MCI та MPH. Для просторового аналізу з водної маски додатково виключали пікселі з NDVI > 0 або FAI > 0 (далі – вода без рослинного сигналу).

Для аналізу оптичного стану використовували NDCI, MCI, MPH, Normalized Difference Algae Index (NDAI), два спектральні варіанти Normalized Difference Turbidity Index (NDTI), FAI і NDVI. NDCI розраховували за стандартною формулою (B5 − B4)/(B5 + B4) [16], red–green NDTI – як (B4 − B3)/(B4 + B3) [29], NDAI – як (B3 + 2 × B8 − B2 − B4)/(B3 + 2 × B8 + B2 + B4) + 0,5 [30]. Тут B2, B3, B4, B5 і B8 – поверхнева відбивна здатність у відповідних каналах Sentinel-2. Основними пігмент-чутливими показниками були NDCI, MCI і MPH, додатковим – NDAI; варіанти NDTI розглядали як показники, чутливі до каламутності та речовинної складової води, а FAI і NDVI – як контрольні рослинно-чутливі показники. Окремо аналізували фікоціанін-орієнтований проксі, супутникову температуру водної поверхні (Water Surface Temperature, WST) і змінні ERA5-Land.

Опубліковані емпіричні моделі TSS і CDOM застосовували за Sòria-Perpinyà et al. [20], модель каламутності – за Zhan et al. [21], фікоціанін-орієнтований проксі (PC-проксі) – за Potes et al. [31]. Оскільки локальної калібровки за синхронними натурними вимірюваннями не виконували, ці показники використовували лише як відносні спектральні проксі [20–23].

Взаємозв'язки між спектральними показниками оцінювали за коефіцієнтами кореляції Спірмена (ρ) між центрованими в межах кожного лиману річними значеннями (n = 16) та агломеративним групуванням за відстанню 1 − |ρ|. Отримані кореляційні групи використовували для оцінки інформаційної подібності показників.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика об'єктів дослідження та їхнього гідрологічного контексту

Характеристика	Тилігульський лиман	Березанський лиман
Географічне положення	Північно-західне узбережжя Чорного моря; пониззя р. Тилігул	Північно-західне узбережжя Чорного моря; пониззя річок Березань і Сасик
Довжина, км (довідкова)	≈52 [13]	≈26 [24]
Площа акваторії, км²	140,26 – за даними ПУРБ [7]; 146,34 – референсний цифровий полігон цього дослідження	60,0 – за даними ПУРБ [7]; 55,54 – референсний цифровий полігон цього дослідження
Глибина, м	Середня ≈5,4; максимальна ≈22,2; північна частина переважно <4 [13]	Середня ≈3,3; максимальна ≈15 [24, 25]
Геометрія та береги	Витягнута улоговина; мілководна вершина, перехідний центр, глибша південна частина	Дві річкові гілки; місцями високі західні береги, пологіші балково-ярні ділянки
Сполучення з морем	Штучний канал через пересип; фактичний обмін залежить від його стану [12, 13]	Протока [24, 25]; фактичний обсяг морського обміну за 2018–2025 рр. у цій роботі не визначали
Річкове та бічне надходження	р. Тилігул і прямі схилово-балкові водозбори	річки Березань і Сасик та прямі прибережні схилово-балкові водозбори
Площа басейнів основних річок, км²	р. Тилігул – 3369 [7]	р. Березань – 890 [26]; р. Сасик – 551 [25]

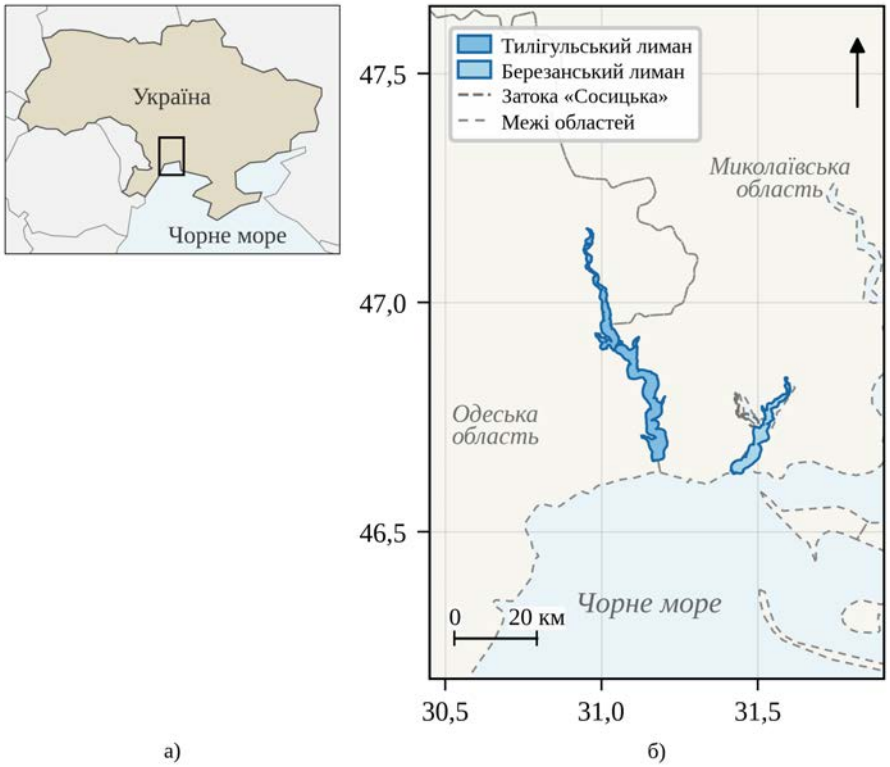

Рис. 1. Район дослідження: а) положення району в межах України (прямокутник); б) Тилігульський і Березанський лимани (штрихпунктиром – затока «Сосицька», не включена до аналітичного полігона Березанського лиману)

Температуру водної поверхні оцінювали за продуктами Landsat 8/9 Collection 2 Level-2 (ST_B10) на масштабі 30 м; WST характеризує лише поверхневий шар, а не всю водну товщу. Водну маску для термальних даних задавали умовою (MNDWI > 0 або NDWI > 0,05), NDVI < 0,35 і BSI < 0,25, де NDWI – нормалізований різницевий водний індекс, BSI – індекс відкритого ґрунту (Bare Soil Index) [32]. Формували річні JJA-значення та місячні зональні значення за травень–жовтень; як показник якості враховували частку валідного покриття.

Регіональний атмосферний і водно-балансовий фон характеризували за ERA5-Land Monthly Aggregated і ERA5-Land Hourly [33], осередненими в 10-км буфері навколо кожного лиману. Аналізували температуру повітря, сонячну радіацію, дефіцит

тиску водяної пари (Vapour Pressure Deficit, VPD), характеристики вітру, опади за кілька сезонних вікон, випаровування, кліматичний водний баланс P − ET (різниця опадів P і випаровування ET) і стік. Розмір комірки ERA5-Land становить близько 11,1 км.

Міжлиманне порівняння парних річних значень виконували двобічним критерієм Вілкоксона; разом із p-значенням наводили медіану парної різниці Березанський − Тилігульський і кількість років з однаковим напрямом ефекту. Відносну міжлиманну різницю обчислювали як 100 × (середнє Б − середнє Т) / |середнє Т|, де Б – Березанський, Т – Тилігульський лиман. Для множинних порівнянь застосовували корекцію Benjamini–Hochberg для контролю частки хибних відкриттів (false discovery rate; далі – BH-FDR, скорочено BH) [34] окремо для сімей оптичних показників (12), змінних форсингу (13), характеристик термічного блоку (8), внутрішньолиманних трендів (12 показників для кожного лиману) і парних різницевих рядів (10); скориговані значення позначено q. NDVI використовували як контроль водної маски, а SWIR-варіант NDTI – як діагностичний показник, оскільки над водою обидва SWIR-канали мають низьке відбивання, а сам індекс інформаційно відокремлений від решти показників ($|\rho| \leq 0{,}12$); ці два показники до родини парних різницевих рядів не включали.

Міжрічні зміни оцінювали коефіцієнтом Kendall τ і нахилом Theil–Sen. Через короткий ряд (n = 8 років) трендові оцінки розглядали як обережний опис, а не як довгострокову кліматичну тенденцію. Додатково порівнювали середні раннього (2018–2020) і пізнього (2023–2025) трирічних інтервалів. Щоб оцінити міжлиманний розрив у природному масштабі мінливості, середню парну різницю ділили на осереднене внутрішньолиманне стандартне відхилення (SD) міжрічних значень. Причинних висновків із кореляцій або часових збігів не робили.

Сезонну тривалість оцінювали за кількістю місяців травня–жовтня, коли зональне значення NDCI перевищувало багаторічну медіану Тилігульського лиману за цей період (0,0114); стійкість висновку перевіряли за альтернативними опорними рівнями. Для просторового аналізу використовували багаторічний JJA-композит і спільні опорні рівні, зокрема 90-й процентиль (P90) NDCI Тилігульського лиману (0,0483). Акваторію кожного лиману поділили вздовж головної осі на десять рівних сегментів від гирла (сегмент 1) до вершини (сегмент 10) і об'єднали їх у три функціональні зони: гирло – сегменти 1–3, центр – 4–7, вершина – 8–10. Прибережною вважали 100-метрову смугу вздовж межі картованої водної поверхні. Описові категорії NDCI визначали за 25-м і 75-м процентилями спільного та окремих для кожного лиману розподілів. Зв'язок місячного NDCI з WST оцінювали коефіцієнтом Спірмена для вихідних значень і для аномалій від багаторічної місячної кліматології кожного лиману; різницю коефіцієнтів між лиманами оцінювали блоковим bootstrap за роками (20 000 повторень, однакові вибрані роки для обох лиманів).

Для кожного показника будували парний різницевий ряд $d(t) = X_Б(t) − X_Т(t)$, де X – річне значення показника, t – рік, і оцінювали його монотонну зміну критерієм Kendall. Синхронізація спостережень за роками зменшує вплив частини спільних регіональних умов, але не усуває відмінностей масок, композитування та берегової геометрії.

2. Результати та обговорення

За результатами кореляційного аналізу виділено чотири інформаційні групи спектральних показників: пігмент- і речовинно-чутливу (NDCI, MCI, MPH, NDAI, каламутність-, TSS-, CDOM- і фікоціанін-орієнтований проксі; $|\rho| = 0{,}66–0{,}96$), рослинно-чутливу (FAI і NDVI; $|\rho| = 0{,}78$), а також окремі групи red–green NDTI та SWIR-варіанта NDTI, який не корелює з рештою показників ($|\rho| \leq 0{,}12$). Отже, більшість пігмент- і речовинно-чутливих показників несуть частково спільну інформацію й не є незалежними підтвердженнями різних процесів. Відокремлення двох варіантів NDTI, навпаки, дає змогу перевірити, чи однаково проявляється міжлиманна різниця в різних спектральних діапазонах. Для викладу показники об'єднано в чотири аналітичні блоки: 1 – пігмент-чутливий сигнал (NDCI, MCI, MPH, NDAI); 2 – каламутність і речовинний склад води (каламутність-, TSS-, CDOM-, PC-проксі, два варіанти NDTI); 3 – плаваюча й вища водна рослинність (FAI, NDVI); 4 – термічно-гідрологічний контекст (WST, змінні ERA5-Land).

Регіональний атмосферний фон двох лиманів загалом був подібним: після BH-корекції статистично значущих міжлиманних відмінностей не виявлено за жодною з тринадцяти змінних форсингу (мінімальне q = 0,102). До корекції значущими були лише невеликі відмінності температури повітря (T: +0,5 %; вища в Березанському лимані у 7 роках із 8), сонячної радіації (SSR: +2,3 %; 8 із 8) та VPD (−2,7 %; нижчий у 7 роках із 8), а показники зволоження й водного балансу – опади за чотири сезонні вікна, випаровування та P − ET – не різнилися навіть до корекції ($p \geq 0{,}11$). Поєднання дещо вищої температури повітря та нижчого VPD у Березанському лимані не дає підстав говорити про стабільно сильніший атмосферний стрес в одній із водойм. Значна відносна різниця стоку (+19 %) зумовлена дуже малими абсолютними значеннями (3,55 і 4,22 мм за травень–серпень) і статистично незначуща (p = 0,742).

На тлі подібного атмосферного фону оптичний стан двох лиманів різнився стійко й істотно. Для семи з восьми показників першої кореляційної групи Березанський лиман перевищував Тилігульський в усі вісім років (q = 0,0104), а середня парна різниця в 1,8–4,0 раза перевищувала осереднене внутрішньолиманне стандартне відхилення міжрічних значень (табл. 2). Отже, розрив між водоймами значно більший за звичайну міжрічну мінливість кожної з них.

Водночас контраст є спектрально селективним. Його стабільно фіксують показники, побудовані на red-edge ділянці спектра (NDCI, MCI, MPH) або на відношенні червоного й синього каналів (CDOM-проксі), тоді як red–green NDTI і NDVI значущої різниці не показують (q = 0,945 і 0,119). Спектральна структура контрасту свідчить, що міжлиманні відмінності найбільш виразно проявляються в діапазонах, чутливих до поглинальних оптично активних компонентів (пігментів і забарвленої розчиненої органічної речовини), тоді як red–green NDTI аналогічного стійкого контрасту не демонструє. FAI та SWIR-варіант NDTI, навпаки, були вищими в Тилігульському лимані в усі роки; тому вищий пігмент- і речовинно-чутливий сигнал Березанського лиману не зумовлений рослинним чи плаваючим матеріалом. Значення q для WST у табл. 2 наведено з термічної родини BH (вісім характеристик термічного блоку); для решти показників таблиці q обчислено в родині дванадцяти оптичних показників.

Виділені групи показників також відрізняються за сезонною динамікою (рис. 2). Речовинний блок має різкий червневий максимум в обох лиманах: медіанна каламутність-проксі зростає з 9,2 у травні до 18,5 у червні в Березанському лимані та з 5,0 до 7,8 у Тилігульському, після чого монотонно спадає; фікоціанін-орієнтована модель повторює цей хід. Пігментний блок поводиться інакше: у Тилігульському лимані NDCI має короткий пізньолітній максимум у серпні (0,0367) і вже у вересні стає від'ємним, тоді як у Березанському значення від червня до жовтня утворюють плато 0,082–0,106. Відповідно міжлиманна різниця зростає від травня (0,022) до жовтня (0,140).

Парний критерій Вілкоксона за вісьмома роками дає перевищення у 8 випадках із 8 для всіх шести місяців травень–жовтень (p = 0,0078 у кожному; q = 0,0078 після BH-корекції в межах родини з шести місяців), а медіана парної різниці монотонно зростає від +0,0214 у травні до +0,1268 у жовтні. Тобто відмінність не зводиться до одного літнього піку і не залежить від вибору місяця для порівняння.

Різний час сезонних максимумів свідчить про зміну домінуючого типу оптичного сигналу протягом теплого сезону. Червневий максимум речовинно-чутливого сигналу припадає на завершення весняного стоку, коли надходження завислого й розчиненого матеріалу з водозбору та вітрове зважування донних відкладів на мілководді можуть діяти одночасно. Пігмент-чутливий сигнал досягає максимуму пізніше – у період найвищої температури води та межені. Більшість степових річок, що впадають у Березанський лиман, мають сезонний характер і пересихають улітку [14], а стік р. Березань істотно трансформований каскадом ставків і водосховищ [15]; отже, від середини літа прісне надходження до лиману мінімальне, і тривале плато пігмент-чутливого сигналу, що формується в умовах літньо-осінньої межені [7], сумісне з переважанням внутрішньоводоймових процесів. У глибшому й об'ємнішому Тилігульському лимані пігментний максимум короткий і вже у вересні змінюється спадом.

За сезонним ходом аналітичних блоків (рис. 2) виокремлено три описові типи оптичного сигналу: речовинно-каламутний (тип I) – підвищені каламутність-, TSS- і CDOM-проксі за помірного пігментного сигналу; пігментний (тип II) – підвищені NDCI, MCI і MPH на тлі зниження каламутність-чутливого сигналу; фоновий (тип III) – відносно низькі значення водних оптичних показників. Типи виокремлено за співвідношенням рівнів і часом максимумів двох блоків; вони відображають різні поєднання оптично активних компонентів, а не послідовні стадії одного процесу. Фікоціанін-орієнтований проксі найбільше узгоджується з речовинним блоком (ρ = 0,89 у Тилігульському та 0,81 у Березанському

Таблиця 2

Парні міжлиманні контрасти за аналітичними блоками, VI–VIII 2018–2025 рр. (n = 8 років)

Блок	Показник	Медіана Б−Т	Б > Т, років	p	q (BH)	Різниця / внутрішнє SD
1. Пігмент-чутливий	NDCI	+0,0610	8/8	0,0078	0,0104	+3,11
1. Пігмент-чутливий	MCI	+0,00666	8/8	0,0078	0,0104	+3,95
1. Пігмент-чутливий	MPH	+0,00642	8/8	0,0078	0,0104	+3,52
1. Пігмент-чутливий	NDAI	+0,0274	8/8	0,0078	0,0104	+1,79
2. Каламутність і речовина	Каламутність-проксі	+5,464	8/8	0,0078	0,0104	+2,98
2. Каламутність і речовина	TSS-проксі	+1,832	8/8	0,0078	0,0104	+1,90
2. Каламутність і речовина	CDOM-проксі	+0,3695	8/8	0,0078	0,0104	+2,81
2. Каламутність і речовина	PC-проксі	+65,45	7/8	0,0156	0,0188	+2,69
2. Каламутність і речовина	NDTI (red–green)	+0,00166	4/8	0,9453	0,9453	−0,26
2. Каламутність і речовина	NDTI (SWIR)	−0,00729	0/8	0,0078	0,0104	−1,01
3. Рослинність і плаваючий матеріал	FAI	−0,00305	0/8	0,0078	0,0104	−3,09
3. Рослинність і плаваючий матеріал	NDVI	−0,0261	3/8	0,1094	0,1193	−1,12
4. Термічно-гідрологічний	WST, °C	+0,092	6/8	0,3125	0,417	+0,17

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

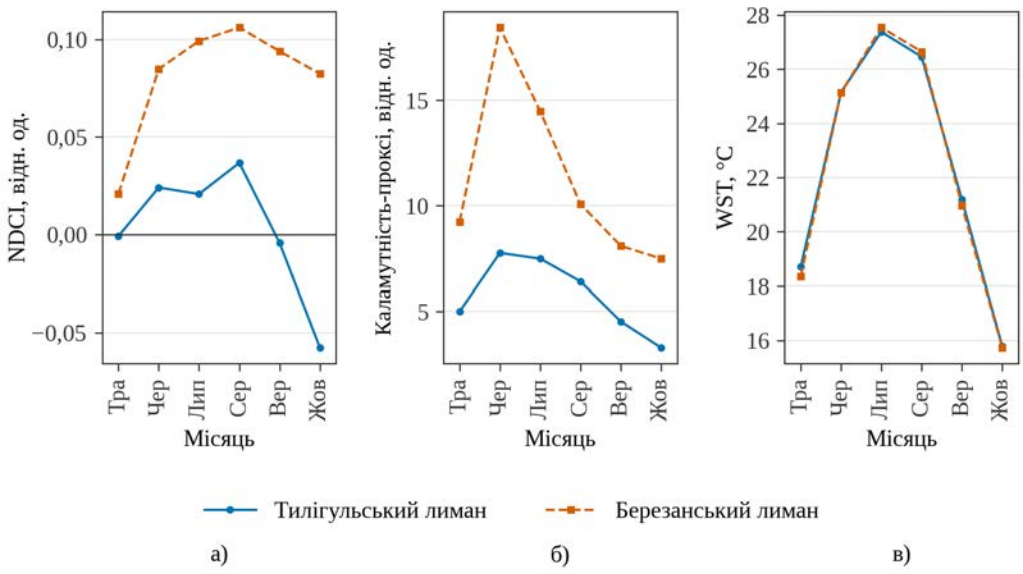

Рис. 2. Сезонний хід аналітичних блоків (медіана за 2018–2025 рр.): а) NDCI; б) каламутність-проксі; в) WST

лимані), тому його розглядали як складову речовинного сигналу, а не як самостійний індикатор ціанобактерій.

Послідовність типів у двох лиманах різна. У Тилігульському лимані вони чітко змінюють один одного: травень і жовтень належать до фонового типу (рис. 2а), червень – до речовинно-каламутного, серпень – до пігментного. У Березанському лимані після червневого речовинного максимуму пігментний тип зберігається до жовтня: літньо-осіннє плато NDCI повністю лежить вище верхньої межі спільних місячних категорій (0,0796), і фоновий стан упродовж літа й осені не встановлюється. Саме тривалість пігментного типу, а не лише його інтенсивність, формує головну сезонну відмінність між водоймами.

Поздовжні профілі (рис. 3) показують односпрямований просторовий градієнт у двох лиманах: NDCI, каламутність-проксі та CDOM-проксі загалом зростають у напрямку вершини. У Березанському лимані це зростання є плавнішим і відбувається на вищому абсолютному рівні, тоді як у Тилігульському найбільш виражене підвищення всіх трьох показників припадає на вершинні сегменти 9–10.

Основна міжлиманна відмінність полягає не стільки у формі поздовжнього градієнта, скільки в абсолютному рівні NDCI. Навіть найнижчі значення NDCI у сегментах Березанського лиману є зіставними з найвищими значеннями, зафіксованими у Тилігульському (без вершинного сегмента 10), тоді як у більшій частині Березанського профілю вони помітно вищі. Карти багаторічних композитів (рис. 4–5) відтворюють спектральну селективність контрасту, встановлену для річних рядів: за NDCI і CDOM-проксі лимани займають різні частини спільної шкали, тоді як діапазони red–green NDTI двох водойм перекриваються.

Вершинний сегмент Тилігульського лиману (сегмент 10 на рис. 3) не включали до інтерпретації відкритої водної маси: рослинний або плаваючий сигнал мають 98,3 % його пікселів (медіанні NDVI = +0,116 і FAI = +0,016). За всіма пікселями NDCI у цьому сегменті (0,118) є найвищим серед сегментів Тилігульського лиману, а каламутність-проксі (24,0) – найвищою серед усіх сегментів обох лиманів; на рис. 3 показано значення за рештою 1,7 % пікселів, які через малу вибірку не інтерпретували.

Форма поздовжнього градієнта в обох лиманах близька: індекс гирлового градієнта, обчислений як різниця медіанного NDCI двох вершинних і двох гирлових сегментів після виключення рослинних пікселів, становить +0,051 у Тилігульському та +0,061 у Березанському лимані. Натомість просторове охоплення підвищеного сигналу різне. За спільним високим референтним рівнем NDCI 0,0483 (90-й процентиль Тилігульського лиману без рослинного сигналу) його перевищують 99,4 % акваторії Березанського лиману і 10,0 % Тилігульського (останнє значення задане конструкцією порога). Об'єднання десяти сегментів у три функціональні зони підтверджує ту саму закономірність у більш узагальненій формі (табл. 3): у Березанському лимані опорний рівень перевищують від 99,1 % площі у гирловій зоні до 100 % у вершинній; у Тилігульському – від 4,8 до 31,7 %.

Просторова картина має безпосереднє екологічне значення. У Тилігульському лимані підвищений сигнал зосереджений у вершинних і локальних прибережних осередках, тоді як гирлова й центральна зони, до яких належить глибша південна улоговина, перевищують опорний рівень лише на невеликій частині площі; у Березанському лимані підвищений сигнал поширюється вздовж усієї поздовжньої осі (табл. 3). Отже,

у Тилігульському лимані змінені оптичні умови є локальним явищем мілководної периферії, а в Березанському – властивістю майже всієї водної маси.

Стійкість цього результату до вибору порога перевірено за шістьма опорними рівнями NDCI (0,0204–0,0868): 75-й, 90-й і 95-й процентилі (P75, P90, P95) Тилігульського лиману, а також медіаною, P75 і P90 спільного розподілу обох лиманів. Частка акваторії понад поріг становила 23,0–100 % у Березанському лимані та 4,8–30,1 % у Тилігульському (для порогів, визначених через розподіл самого Тилігульського лиману, його частки – 25, 10 і 5 % – задані конструкцією), а відношення часток не опускалося нижче 3,3.

Таблиця 3

Характеристики трьох функціональних зон за багаторічним композитом VI–VIII 2018–2025 рр. (вода без рослинного сигналу)

Лиман	Зона	Площа, км²	NDCI, медіана	Каламутність-проксі	CDOM-проксі	Частка понад опорний рівень, %
Тилігульський	Вершина	11,28	+0,0285	6,15	2,235	31,7
Тилігульський	Центр	68,96	+0,0120	5,65	2,061	10,7
Тилігульський	Гирло	56,27	+0,0119	5,76	2,092	4,8
Березанський	Вершина	8,24	+0,1177	15,63	2,676	100,0
Березанський	Центр	24,02	+0,0671	10,63	2,530	99,6
Березанський	Гирло	21,98	+0,0650	10,11	2,378	99,1

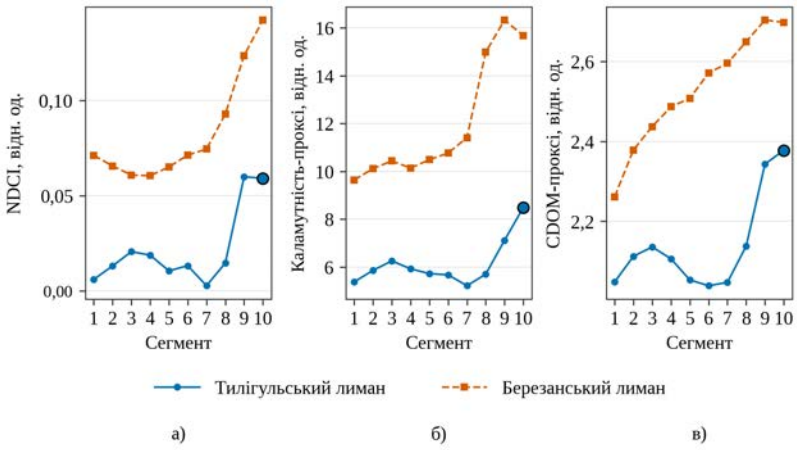

Рис. 3. Поздовжні профілі багаторічних (VI–VIII 2018–2025 рр.) медіанних значень за сегментами (1 – гирло, 10 – вершина), вода без рослинного сигналу: а) NDCI; б) каламутність-проксі; в) CDOM-проксі

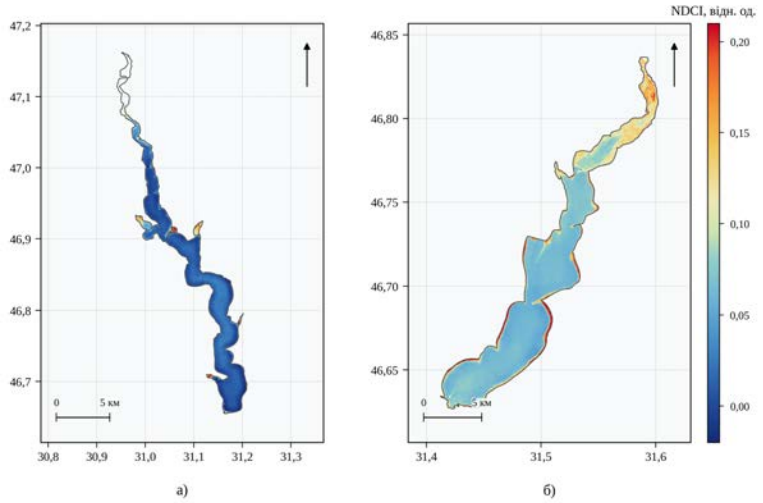

Рис. 4. Багаторічний (VI–VIII 2018–2025 рр.) медіанний композит NDCI, вода без рослинного сигналу: а) Тилігульський лиман; б) Березанський лиман

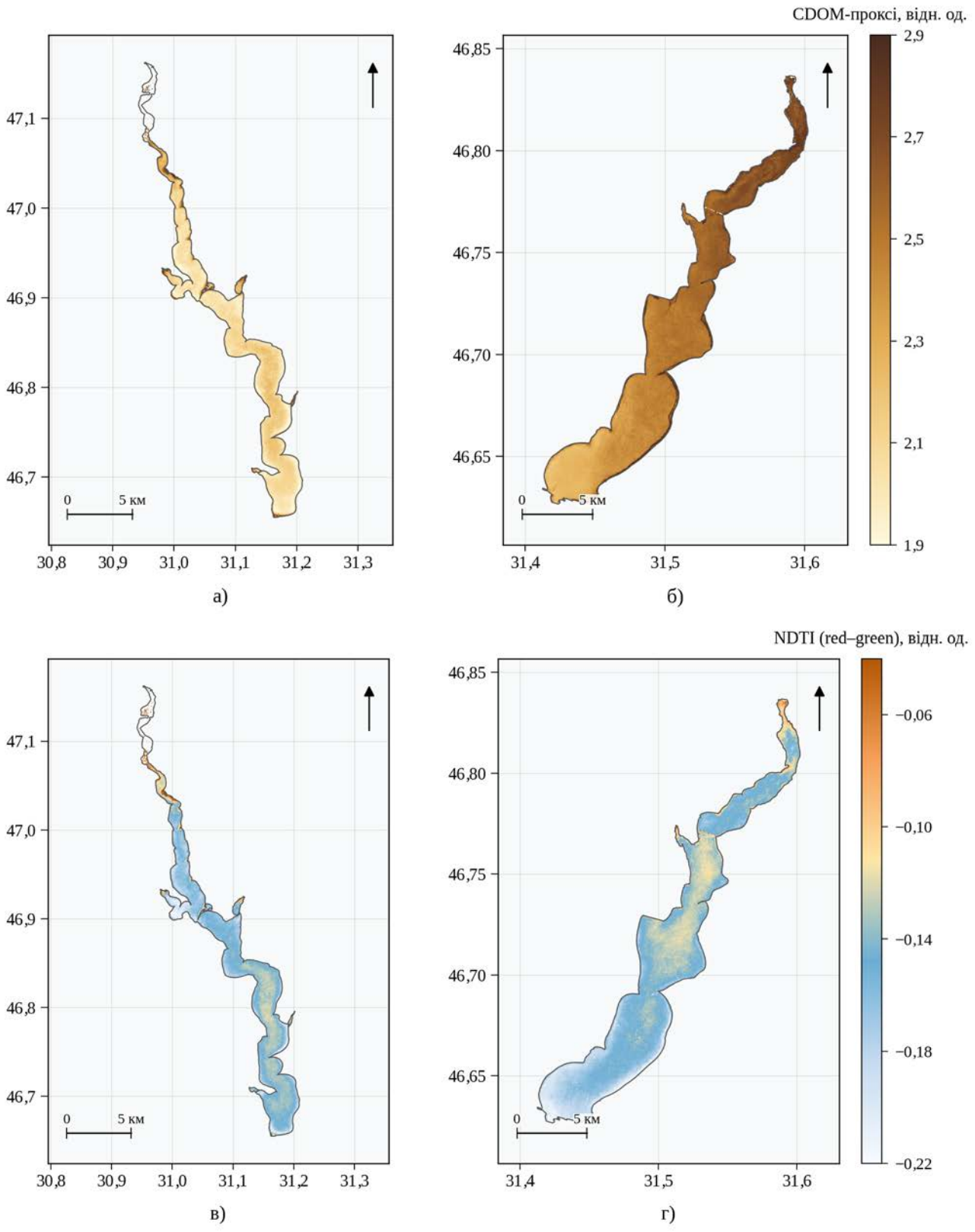

Рис. 5. Багаторічні (VI–VIII 2018–2025 рр.) медіанні композити: а), б) CDOM-проксі; в), г) red–green NDTI (контрольний показник блоку каламутності); а), в) – Тилігульський лиман; б), г) – Березанський лиман

Окремо оцінено тривалість перевищення опорного рівня. За NDCI 0,0114 Березанський лиман перевищував його у середньому 5,88 місяця на рік, Тилігульський – 3,00; для каламутність-проксі відповідні значення становили 5,6 і 3,0 місяця. У Березанському підвищений сигнал зберігався

щонайменше п’ять місяців у всі вісім років, тоді як у Тилігульському тривалість була коротшою й мінливішою (рис. 6). Висновок стійкий до вибору опорного рівня: за чотирма альтернативними порогами – медіаною (0,0300) і P75 (0,0796) спільного розподілу обох лиманів та медіаною (0,0098) і P75 (0,0208) травневих значень – тривалість перевищення в Березанському лимані була більшою на 2,75–3,75 місяця. Отже, у Березанському лимані змінені оптичні умови охоплюють майже весь теплий сезон, а в Тилігульському мають характер сезонного епізоду.

Міжрічну зміну показників оцінено для кожного лиману окремо. У Березанському лимані п’ять із дванадцяти оптичних показників мають значущі додатні монотонні тренди після BH-корекції (табл. 4); найвиразніший встановлено для CDOM-проксі. У Тилігульському лимані значущих трендів не встановлено. Отже, міжрічні зміни Березанського лиману охоплюють не лише пігмент-чутливу частину спектра (рис. 7а).

NDCI демонструє іншу динаміку. Незважаючи на вищий рівень у 2023–2025 рр. порівняно з 2018–2020 рр., значущого монотонного тренду не встановлено ($\tau = 0{,}357$; $p = 0{,}275$): максимум 2023 р. змінився зниженням у 2024–2025 рр. Тому коректно говорити про вищий рівень у пізній частині ряду, а не про безперервне зростання.

Аналіз парних різницевих рядів показав тенденцію до посилення міжліманного контрасту для MCI, CDOM-, каламутність- і PC-проксі ($\tau = +0{,}643$; $p = 0{,}031$ для кожного): для MCI різниця Березанський − Тилігульський зросла приблизно у 2,3 раза між 2018–2020 і 2023–2025 рр. (рис. 7а). Після BH-корекції в родині з десяти різницевих рядів ці тенденції незначущі (мінімальне $q = 0{,}078$); для red–green NDTI та FAI аналогічної тенденції не виявлено, а міжліманна різниця WST у 2023–2025 рр. зменшилася порівняно з 2018–2020 рр. (табл. 4). Отже, міжрічні зміни оптичних характеристик виразніше проявляються в Березанському лимані, однак статистично підтверджено насамперед тренди окремих показників усередині цієї водойми, а не посилення самого міжліманного контрасту.

Середня JJA WST за 2018–2025 рр. становила 26,87 °C у Березанському і 26,51 °C у Тилігульському лимані; парна різниця незначуща ($p=0{,}3125$). У 2023–2025 рр. WST Березанського була нижчою, ніж у 2018–2020 рр., попри вищі значення оптичних показників. Отже, термічні дані не підтримують пояснення стійкого міжліманного оптичного контрасту лише різницею середньої температури поверхні.

Жодна з восьми перевірених характеристик термічного блоку – середня, максимальна, P90 і P95 WST, частки площі з WST ≥ 28 і ≥ 30 °C, тривалість періоду з WST ≥ 25 °C і швидкість весняного прогрівання – не мала значущої міжліманної різниці після BH-корекції (мінімальне $q = 0{,}188$). Тривалість періоду з WST ≥ 25 °C в обох лиманах збігалася (2,62 місяця). Лише весняне прогрівання (травень → липень) було дещо швидшим у Березанському лимані (4,80 проти 4,34 °C/міс; 7 років із 8; $p = 0{,}023$), але після корекції ця відмінність не підтвердилася ($q = 0{,}188$).

За місячними даними травень–жовтень проста кореляція зонального NDCI з WST є значущою в обох лиманах, але різної сили: $\rho = +0{,}74$ ($p < 0{,}0001$) у Тилігульському та $\rho = +0{,}30$ ($p = 0{,}036$) у Березанському. Обидві величини мають виражений спільний сезонний хід, і після переходу до аномалій від місячної кліматології зв’язок різко слабшає: до $\rho = +0{,}29$ у Тилігульському ($p = 0{,}046$; слабкий і граничний) та $\rho = +0{,}12$ у Березанському ($p = 0{,}409$). Отже, значна частина вихідного зв’язку зумовлена

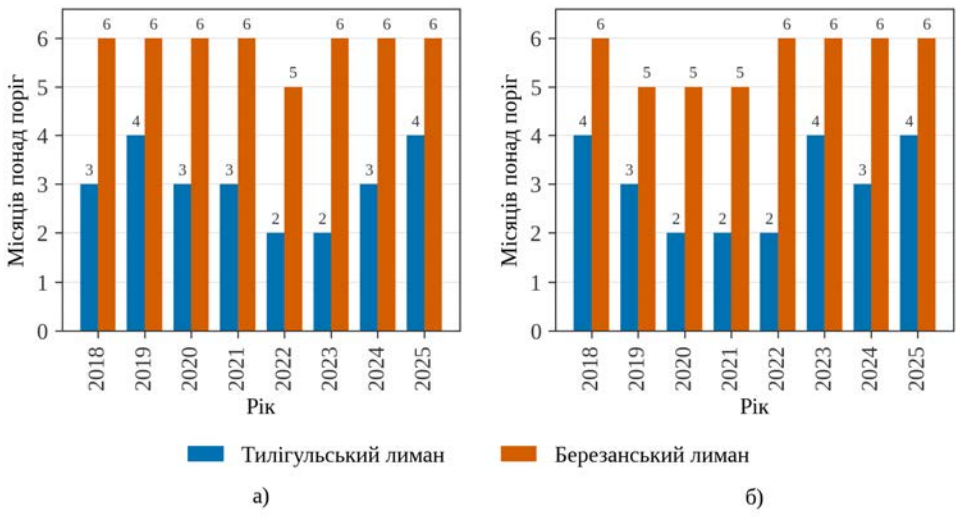

Рис. 6. Кількість місяців травня–жовтня з перевищенням спільного опорного рівня (багаторічної медіани Тилігульського лиману): а) NDCI, опорний рівень 0,0114; б) каламутність-проксі, опорний рівень 5,93

Таблиця 4

Міжрічні зміни вибраних показників у межах кожного лиману, VI–VIII 2018–2025 рр. (BH-корекція в межах 12 оптичних показників кожного лиману)

Блок	Показник	Лиман	2018–2020	2023–2025	Δ	τ	q (BH)
1	NDCI	Березанський	0,0584	0,1103	+0,0519	+0,357	0,367
1	NDCI	Тилігульський	0,0217	0,0298	+0,0081	+0,143	0,905
1	MCI	Березанський	0,00891	0,01388	+0,00497	+0,786	0,033
1	MCI	Тилігульський	0,00506	0,00511	+0,00005	−0,214	0,905
1	MPH	Березанський	0,00694	0,01246	+0,00552	+0,714	0,034
1	MPH	Тилігульський	0,00350	0,00380	+0,00030	−0,071	0,905
2	CDOM-проксі	Березанський	2,378	2,642	+0,264	+0,857	0,021
2	CDOM-проксі	Тилігульський	2,178	2,193	+0,015	−0,143	0,905
2	Каламутність-проксі	Березанський	9,94	14,99	+5,05	+0,714	0,034
2	Каламутність-проксі	Тилігульський	7,15	7,55	+0,40	−0,071	0,905
2	PC-проксі	Березанський	89,7	141,0	+51,3	+0,714	0,034
2	PC-проксі	Тилігульський	56,3	50,1	−6,2	−0,071	0,905
4	WST, °C	Березанський	27,06	26,69	−0,37	−0,500	–
4	WST, °C	Тилігульський	26,47	26,43	−0,04	−0,357	–

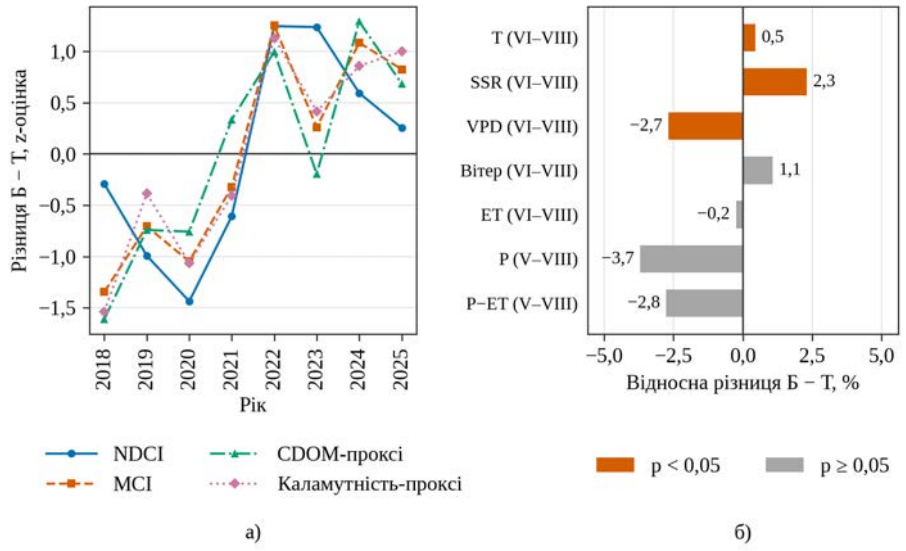

Рис. 7. Міжлиманний контраст у 2018–2025 рр.:
а) стандартизовані парні різниці Березанський − Тилігульський для NDCI, MCI, CDOM- і каламутність-проксі;
б) відносні парні відмінності вибраних змінних ERA5-Land (р – до BH-корекції)

спільним сезонним ходом. Різниця коефіцієнтів між лиманами за блоковим bootstrap становить +0,167 (95 % довірчий інтервал [−0,110; +0,515]) і значущості не досягає (p = 0,216).

Висновок стійкий до виключення 2019 р., коли водна маска термальних даних Тилігульського лиману охоплювала лише 46,2 % полігона: середня парна різниця WST зменшується з +0,359 до +0,131°C і залишається незначущою (p = 0,578).

За спільною площинно-зваженою шкалою пороги NDCI становили 0,0078 і 0,0634. У Березанському лимані нижча категорія відсутня, а вища охоплює 69,2 % акваторії проти 7,4 % у Тилігульському (проміжна – 30,8 і 57,6 %, нижча в Тилігульському – 34,9 %), хоча розподіли частково перекриваються.

Власні для кожного лиману межі категорій характеризують внутрішню просторову організацію, а не абсолютний міжлиманний рівень. В обох водоймах частка вищої категорії збільшується від гирла до вершини й досягає у вершинній зоні 55,4 % у Тилігульському та 86,6 % у Березанському лимані (у гирловій – 19,0 і 11,5 %, у центральній – 24,9 і 16,2 %; рис. 8).

Вища власна категорія NDCI також концентрується вздовж берегової лінії: смуга завширшки 100 м займає 11,0 % акваторії Тилігульського і 11,4 % Березанського лиману, але містить відповідно 32,0 і 40,8 % пікселів вищої категорії, тобто в 2,9 і 3,6 раза більше за частку своєї площі. У Березанському лимані суцільні внутрішні осередки вищої катего-

рії зосереджені у вершинній зоні; у Тилігульському, крім вершинної зони, вища категорія утворює поздовжню смугу вздовж осі акваторії в південній (гирлово-центральній) частині (рис. 8).

Узагальнення результатів дає узгоджену картину. Міжлиманний контраст проявляється одночасно у трьох вимірах – рівні оптичного сигналу, його сезонній тривалості та просторовому охопленні акваторії, – і в усіх трьох Березанський лиман відрізняється від Тилігульського в одному напрямі. Водночас регіональний атмосферний фон і температура поверхні води двох лиманів суттєво не різняться. Отже, пояснення контрасту слід шукати насамперед у властивостях самих лиманних систем, а спектральна структура контрасту показує, що відмінності найвиразніше проявляються в діапазонах, чутливих до поглинальних оптично активних компонентів.

Важливим екологічним контекстом порівняння є навантаження з водозборів. За Планом управління річковим басейном річок Причорномор'я евтрофікація належить до головних водно-екологічних проблем району, сільськогосподарські розподілені джерела формують близько 78 % емісії азоту, а розораність водозборів перевищує 85 %; басейн Тилігулу належить до найбільших за абсолютною емісією азоту через свою площу [7]. Високе навантаження з розораних водозборів, таким чином, характерне для обох лиманів, однак воно трансформується у водоймах різної морфометрії.

Тилігульський лиман удвічі довший за Березанський, а його середня глибина в 1,6 раза більша (≈5,4 проти ≈3,3 м; табл. 1); південна улоговина сягає ≈22,2 м [13]. Більший об'єм води здатний розбавляти речовину, що надходить з водозбору, а в глибшій частині улоговини менша частка водної товщі перебуває під впливом ресуспензії донних відкладів. Це узгоджується з тим, що підвищений сигнал у Тилігульському лимані зосереджений у мілководній (переважно < 4 м [13]) вершинній частині, куди надходить стік р. Тилігул, тоді як у глибшій південній частині акваторії він значно нижчий. Березанський лиман у середньому значно мілкіший, і умови, сприятливі для підвищеного сигналу, поширюються вздовж усієї його осі, що відображає рівномірно високий поздовжній профіль (рис. 3). Зниження сигналу в напрямку гирла в обох лиманах (рис. 3, 5) узгоджується з розбавленням лиманних вод морськими поблизу сполучення з морем.

Показово, що вищий оптичний сигнал має саме Березанський лиман, а не Тилігульський, фактичний водообмін якого з морем після реконструкції каналу виявився обмеженим [13]. Отже, морське сполучення саме по собі не визначає оптичного стану лиману. Сукупність результатів вказує на істотне значення локальних властивостей системи – мілководності, співвідношення об'єму водойми та надходження речовини і внутрішньоводоймової трансформації речовини, зокрема за мінімального прісного надходження влітку [14, 15] і регіонального дефіциту прісноводного балансу [2]. З цим узгоджується те, що значущі додатні тренди пігмент-чутливих (MCI, MPH), речовинно-чутливих і CDOM-проксі встановлено лише для мілководнішого Березанського лиману, де міжрічні зміни оптичного стану проявляються виразніше.

Концентрація вищої категорії NDCI у 100-метровій прибережній смузі (частка її пікселів у 2,9–3,6 раза перевищує частку площі смуги) та у вершинних

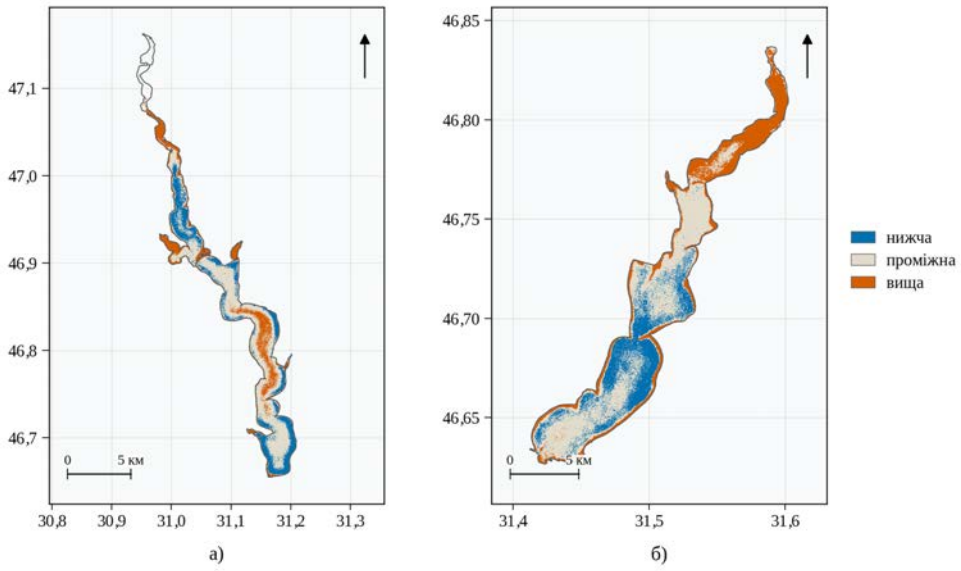

Рис. 8. Відносні категорії NDCI за власним розподілом кожного лиману, багаторічний композит VI–VIII 2018–2025 рр.: а) Тилігульський лиман (межі 0,0043 і 0,0230); б) Березанський лиман (межі 0,0621 і 0,0828)

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

зонах має безпосереднє природоохоронне значення. Саме мілководні прибережні й вершинні ділянки поєднують літоральні біотопи, важливі для природоохоронного статусу обох лиманів [3, 4], і найвиразніші прояви підвищеного оптичного сигналу, тому їх доцільно розглядати як індикаторні ділянки для виявлення змін оптичного стану.

Відсутність статистично значущої різниці регіонального атмосферного форсингу (рис. 7б) доповнює цю картину: дві сусідні акваторії перебувають у подібному регіональному полі температури, опадів, радіації та вітру, але демонструють стійко різний оптичний стан. Різна сила сезонного зв'язку NDCI з WST у двох лиманах відповідає їхньому сезонному ходу: у Тилігульському лимані пігментний максимум збігається з літнім максимумом температури води й спадає разом з нею восени, тоді як у Березанському підвищений NDCI зберігається й у вересні–жовтні, коли вода вже охолоджується. Отже, сезонна динаміка пігмент-чутливого сигналу Березанського лиману не зводиться до термічного циклу й підкреслює значення локальних властивостей функціонування водойми – режиму морського сполучення, зарегульованості приток, часу утримання води, мілководності та внутрішньоводоймової трансформації речовини.

Основні обмеження дослідження пов'язані з інтерпретацією оптичних показників, тривалістю часового ряду та просторовим масштабом допоміжних даних. Для Sentinel-2 Level-2A не застосовували спеціалізованої атмосферної корекції для водних поверхонь, а синхронних натурних вимірювань за 2018–2025 рр. для калібрування оптичних проксі немає, тому супутникові показники не ототожнювали з концентраціями хлорофілу-a, TSS чи CDOM, класами трофності або фактом «цвітіння» води. Високий сигнал у прибережній смузі та вершині Тилігульського лиману може містити внесок рослинності, донного відбиття й сусіднього суходолу, який порогова маска повністю не усуває. Просторовий масштаб ERA5-Land не забезпечує незалежного опису локальних атмосферних умов кожного лиману, тому відсутність статистично значущих відмінностей за цими змінними не означає тотожності локальних умов. Вісім років спостережень дають змогу оцінити стійкість парної міжлиманної різниці, але обмежують висновки щодо довгострокових трендів. Відсутність синхронних гідрометричних і п'єзометричних даних також не дає змоги безпосередньо визначити механізми формування міжлиманного контрасту, зокрема внесок водообміну, стратифікації та перемішування.

Головні висновки

За синхронними спостереженнями 2018–2025 рр. Березанський лиман стійко відрізнявся від Тилігульського вищими значеннями пігмент- і речовинно-чутливих показників: для семи з восьми показників першої кореляційної групи перевага зберігалася в усі вісім років (q = 0,0104). Контраст фіксують red-edge показники та CDOM-проксі, але не red-green NDTI, тобто міжлиманні відмінності найвиразніше проявляються в спектральних діапазонах, чутливих до поглинальних оптично активних компонентів води. За сезонним ходом аналітичних блоків виокремлено речовинно-каламутний, пігментний і фоновий типи оптичного сигналу.

Екологічно важливою є не лише величина міжлиманного контрасту, а його тривалість і просторове охоплення. За основним опорним рівнем підвищений оптичний сигнал у Березанському лимані зберігався в середньому 5,88 місяця на рік проти 3,00 у Тилігульському; різниця становила 2,75–3,75 місяця за всіх альтернативних порогів. Спільний опорний рівень NDCI перевищували 99,4 % акваторії Березанського і 10,0 % Тилігульського лиману. Отже, у Березанському лимані підвищені значення оптичних показників охоплюють більшу частину теплого сезону і майже всю акваторію, що означає триваліший період змінених оптичних умов, потенційно важливий для світлового режиму мілководних біотопів і сезонного функціонування водної екосистеми.

Сезонна динаміка свідчить, що речовинно-каламутний і пігментний сигнали не є проявами одного синхронного процесу. Каламутність-проксі в обох лиманах досягала максимуму в червні, а пігмент-чутливий сигнал проявлявся пізніше. У Тилігульському лимані NDCI мав виражений серпневий максимум зі спадом восени; у Березанському підвищені значення зберігалися до жовтня. Така послідовність указує на сезонну зміну внеску різних оптично активних компонентів і обґрунтовує окремі натурні спостереження на початку літа та в пізньолітньо-осінній період.

Просторова структура оптичного стану в обох водоймах характеризується концентрацією підвищених значень у вершинних і прибережних мілководних ділянках. За власною шкалою кожного лиману частка вищої категорії зростає від гирла до вершини, досягаючи 55,4 % у Тилігульському та 86,6 % у Березанському лимані, а прибережна смуга завширшки 100 м, що займає близько 11 % площі, концентрує відповідно 32,0 і 40,8 % пікселів цієї категорії. За спільним опорним рівнем підвищений сигнал у Тилігульському лимані зосереджений переважно у вершинній зоні, тоді як у Березанському охоплює практично всю акваторію. Вершинні та прибережні ділянки є пріоритетними для подальшого екологічного моніторингу.

Відсутність значущих міжлиманних відмінностей регіонального атмосферного форсингу після BH-корекції (мінімальне q = 0,102) і досліджених характеристик WST показує, що стійкий оптичний контраст не пояснюється лише відмінностями регіональної погоди або температури водної поверхні й має розглядатися в контексті локальних властивостей функціонування лиманних систем.

У Тилігульському лимані значущих монотонних трендів оптичних показників упродовж

2018–2025 рр. не встановлено. У Березанському значущі додатні тренди виявлено для MCI, MPH, каламутність-, CDOM- і фікоціанін-орієнтованого проксі, що свідчить про спрямовані міжрічні зміни окремих компонентів оптичного стану.

Результати дають підстави диференціювати програму польового моніторингу. Для Березанського лиману доцільно охоплювати спостереженнями період від початку літа до осені та всю поздовжню вісь акваторії; для Тилігульського особливу увагу слід приділяти пізньолітньому максимуму, вершинній мілководній частині та локальним прибережним осередкам. У визначених зонах доцільно поєднувати супутникові та натурні спостереження за основними гідрофізичними, гідрохімічними й біологічними показниками.

Перспективи використання результатів дослідження

Перспективним є використання встановлених просторово-часових закономірностей для оптимізації програм екологічного моніторингу Тилігульського та Березанського лиманів, зокрема для вибору ділянок, сезонів і частоти натурних спостережень, а також інформаційного супроводу природоохоронних заходів.

Література

1. Developments in Earth observation for the assessment and monitoring of inland, transitional, coastal and shelf-sea waters / Tyler A. N. et al. Science of the Total Environment. 2016. Vol. 572. P. 1307–1321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.020.
2. Тучковенко Ю. С., Хохлов В. М., Лобода Н. С. Вплив змін клімату на водний баланс квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Український гідрометеорологічний журнал. 2022. № 29. С. 32–47. DOI: https://doi.org/10.31481/uhmj.29.2022.03.
3. Про заходи щодо охорони водно-болотних угідь, які мають міжнародне значення : постанова Кабінету Міністрів України від 23 листоп. 1995 р. № 935. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/935-95-%D0%BF (дата звернення: 02.10.2026).
4. Екологічна мережа. Управління екології та природних ресурсів Миколаївської обласної державної адміністрації : веб-сайт. URL: https://ecolog.mk.gov.ua/ua/pzf/econet/ (дата звернення: 24.09.2026).
5. Про затвердження лімітів спеціального використання водних біоресурсів загальнодержавного значення у Чорному морі із затоками, причорноморських лиманах, річці Дунай, пониззі річки Дністер (з озерами, рукавом Турунчук) та Дністровському лимані для здійснення промислового рибальства та дослідного вилову на 2026 рік : наказ М-ва економіки, довкілля та сільського господарства України від 10 жовт. 2025 р. № 703. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1516-25 (дата звернення: 26.09.2026).
6. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 груд. 2022 р. № 1134-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80 (дата звернення: 26.09.2026).
7. План управління річковим басейном річок Причорномор'я на 2025–2030 роки : затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 1 листоп. 2024 р. № 1079-р. URL: https://davr.gov.ua/fls18/PURBPrychornomorya7_ukr.pdf (дата звернення: 21.09.2026).
8. Комплексна програма охорони довкілля Миколаївської області на 2021–2027 роки : затв. рішенням Миколаївської обласної ради від 23 груд. 2020 р. № 16. URL: https://www.mk-oblrada.gov.ua/UserFiles/decreeProject/161711060160632649 72b7a.pdf (дата звернення: 26.09.2026).
9. Регіональний центр моніторингу довкілля: загальна інформація. Управління екології та природних ресурсів Миколаївської обласної державної адміністрації : веб-сайт. URL: https://ecolog.mk.gov.ua/ua/standovk/cent/ (дата звернення: 26.09.2026).
10. Регіональний ландшафтний парк «Тилігульський». Управління екології та природних ресурсів Миколаївської обласної державної адміністрації : веб-сайт. URL: https://ecolog.mk.gov.ua/ua/RLP/tyligulskyi/ (дата звернення: 26.09.2026).
11. Протокол онлайн-засідання басейнової ради річок Причорномор'я від 3 черв. 2025 р. № 2. Державне агентство водних ресурсів України : веб-сайт. URL: https://davr.gov.ua/protokol-onlajnzasidannya-basejnovoi-radi-richok-prichornomorya-vid-03062025--2 (дата звернення: 26.09.2026).
12. Tuchkovenko Y., Tuchkovenko O., Khokhlov V. Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. EUREKA: Physics and Engineering. 2019. № 5. P. 37–46. DOI: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00979.
13. Зміни показників гідроекологічного стану Тилігульського лиману після реконструкції з'єднуючого з морем каналу / Тучковенко Ю. С. та ін. Український гідрометеорологічний журнал. 2026. № 36. С. 89–108. DOI: https://doi.org/10.32782/uhj.36.2026.07.
14. Decline of unique Pontocaspian biodiversity in the Black Sea Basin: A review / Gogaladze A. et al. Ecology and Evolution. 2021. Vol. 11, № 19. P. 12923–12947. DOI: https://doi.org/10.1002/ece3.8022.
15. Наконечна Ю. О. Сучасні морфологічні та гідроекологічні характеристики р. Березань. Агроекологічний журнал. 2022. № 4. С. 16–26. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273245.
16. Mishra S., Mishra D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 117. P. 394–406. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016.
17. Detection of intense plankton blooms using the 709 nm band of the MERIS imaging spectrometer / Gower J., King S., Borstad G., Brown L. International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26, № 9. P. 2005–2012. DOI: https://doi.org/10.1080/01431160500075857.
18. Matthews M. W., Bernard S., Robertson L. An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 124. P. 637–652. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.032.

19. 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: https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012.
20. Validation of Water Quality Monitoring Algorithms for Sentinel-2 and Sentinel-3 in Mediterranean Inland Waters with In Situ Reflectance Data / Sòria-Perpinyà X. et al. Water. 2021. Vol. 13, № 5. Art. 686. DOI: https://doi.org/10.3390/w13050686.
21. Mar Menor lagoon (SE Spain) chlorophyll-a and turbidity estimation with Sentinel-2 / Zhan Y. et al. Limnetica. 2022. Vol. 41, № 2. P. 305–323. DOI: https://doi.org/10.23818/limn.41.18.
22. Assessing the Reliability of Sentinel-2 for Turbidity Estimation in a Shallow Coastal Lagoon / Castro A., Pereira H., Dias J. M., Lopes C. L. Remote Sensing. 2026. Vol. 18, № 13. Art. 2176. DOI: https://doi.org/10.3390/rs18132176.
23. Towards Reliable High-Resolution Satellite Products for the Monitoring of Chlorophyll-a and Suspended Particulate Matter in Optically Shallow Coastal Lagoons / Martin S. et al. Remote Sensing. 2025. Vol. 17, № 20. Art. 3430. DOI: https://doi.org/10.3390/rs17203430.
24. Яцик А. В. Березанський лиман. Енциклопедія Сучасної України / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. ; НАН України, НТШ. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2003. Т. 2. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19870621.
25. Поствоєнний розвиток природно-заповідного фонду Миколаївщини / Скоробогатов В. М. та ін. Миколаїв ; Київ ; Чернівці : Друк Арт, 2023. 224 с. (Conservation Biology in Ukraine ; вип. 33). URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/pzf-mykola_2023_compressed.pdf (дата звернення: 30.09.2026).
26. Слюсар О. І. Березань. Енциклопедія Сучасної України / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. ; НАН України, НТШ. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2003. Т. 2. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19870598.
27. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, № 14. P. 3025–3033. DOI: https://doi.org/10.1080/01431160600589179.
28. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / Rouse J. W. Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington : NASA, 1974. Vol. 1, Sect. A. P. 309–317. (NASA SP-351). URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614 (дата звернення: 02.10.2026).
29. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal / Lacaux J.-P. et al. Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 106, № 1. P. 66–74. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012.
30. Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V. Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. Space Science and Technology. 2021. Vol. 27, № 5. P. 11–18. DOI: https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011.
31. Use of Sentinel 2 – MSI for water quality monitoring at Alqueva reservoir, Portugal / Potes M. et al. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2018. Vol. 380. P. 73–79. DOI: https://doi.org/10.5194/piahs-380-73-2018.
32. Rikimaru A., Roy P. S., Miyatake S. Tropical forest cover density mapping. Tropical Ecology. 2002. Vol. 43, № 1. P. 39–47.
33. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / Muñoz-Sabater J. et al. Earth System Science Data. 2021. Vol. 13, № 9. P. 4349–4383. DOI: https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021.
34. Benjamini Y., Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological). 1995. Vol. 57, № 1. P. 289–300. DOI: https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x.

Дата першого надходження статті до видання: 05.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026