

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.11>

УДК 004.4'24

Моніторинг стану водних поверхонь за допомогою інтегрованого середовища Google Earth Engine та Google Colab

Олійник Вадим Миколайович¹⁾

Аспірант каф. Інформаційних систем

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5527-7750>; 5774806@as.op.edu.ua. Scopus Author ID: 59390493400

Смик Сергій Юрійович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-1826>; smyk@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56996011100

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Моніторинг стану водних екосистем є одним із ключових завдань сучасної екології та управління природними ресурсами. Одним із найбільш інформативних індикаторів якості води виступає концентрація хлорофілу-а, яка відображає рівень фітопланктону та прямо пов'язана з явищем евтрофікації. Традиційні методи відбору проб та лабораторного аналізу є точними, проте мають обмеження у масштабності та оперативності. У цьому контексті дистанційне зондування Землі та хмарні інформаційні системи відкривають нові можливості для регулярного моніторингу біологічної продуктивності водойм. У роботі проведено попередню обробку зображень, включно з маскуванням хмарності (QA60) та виділенням водних поверхонь за індексом NDWI. Для оцінки рівня фітопланктону застосовано спектральний індекс хлорофілу-а, що враховує відношення відбиття у червоному та червоному крайовому діапазонах. Для зменшення впливу шуму побудовано медіанні композити, які дозволили виявити загальні просторові патерни, а різницеві карти забезпечили оцінку динаміки змін між обраними інтервалами. Додатково використано порогову сегментацію для виділення ділянок із підвищеним рівнем хлорофілу-а та кількісної оцінки площ цвітіння. Результати підтвердили ефективність використаної методики для виявлення як локальних джерел надходження поживних речовин, так і масштабних осередків літнього цвітіння. Отримані картографічні матеріали чітко відобразили сезонні коливання рівня фітопланктону та просторову структуру цвітіння. Водночас встановлено обмеження індексного підходу, пов'язані з впливом атмосферних умов та різних типів фітопланктону. Перспективним напрямом подальших досліджень є застосування методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж, які здатні інтегрувати багатоспектральні та гіперспектральні дані, підвищуючи точність виявлення та прогнозування цвітіння води. Це відкриває шлях до створення інтелектуальних систем екологічного моніторингу у режимі реального часу.

Ключові слова: хлорофіл-а; дистанційне зондування; Sentinel-2; Google Earth Engine; Google Colab; NDWI; порогова сегментація; евтрофікація; моніторинг водних екосистем; нейронні мережі

Актуальність. Моніторинг стану водних екосистем є одним із ключових завдань сучасної екології та управління природними ресурсами. Одним із найбільш інформативних індикаторів якості води є концентрація хлорофілу-а, яка відображає рівень фітопланктону у водоймах [1]. Зростання концентрації хлорофілу-а пов'язане з явищем евтрофікації та цвітінням води, що призводить до деградації екосистем, зниження біорізноманіття та ризиків для здоров'я населення. Традиційні методи вимірювання (хімічний аналіз проб води) є точними, проте вони не дозволяють охопити великі території та оперативно відслідковувати просторово-часові зміни. У цьому контексті дистанційне зондування Землі та хмарні інформаційні системи відкривають нові можливості для автоматизованого, масштабного та регулярного моніторингу хлорофілу-а.

Метою роботи є дослідження та аналіз ефективності методики визначення рівню хлорофілу-а у водних поверхнях за допомогою супутникових знімків Sentinel-2 та хмарних інформаційних систем. Для досягнення цієї мети було використано інтегроване середовище Google Earth Engine та Google Colab, що дозволило поєднати обробку даних у хмарі з можливістю гнучкого програмування й візуалізації результатів.

У рамках дослідження виконано попередню обробку супутникових зображень, побудовано композити для різних періодів, розраховано індекс хлорофілу-а та проведено аналіз просторово-часових відмінностей рівня фітопланктону.

Супутниковий моніторинг хлорофілу-а базується на вимірюванні сонячного світла, відбитого від поверхні води у різних спектральних діапазонах [2]. У даній роботі для оцінки рівня хлорофілу-а було використано супутникові дані місії Sentinel-2 [3], які забезпечують

багатоспектральні знімки з просторовою роздільною здатністю 10–20 метрів та періодичністю знімання близько п'яти днів. Sentinel-2 є оптимальним джерелом даних для моніторингу водних об'єктів завдяки високій спектральній роздільності, зокрема наявності вузьких каналів у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах, чутливих до вмісту хлорофілу-а та інших пігментів фітопланктону. Об'єктом дослідження обрано акваторію Гданської затоки, яка характеризується високою продуктивністю, значним антропогенним навантаженням і сезонною динамікою біологічних процесів. Саме ця акваторія є зручною для апробації алгоритмів, оскільки тут фіксуються як періоди низької, так і високої концентрації фітопланктону.

Аналітичні розрахунки виконувались у середовищі Google Earth Engine (GEE) [4], яке надає доступ до повних архівів супутникових даних та дозволяє виконувати обчислення безпосередньо у хмарі, а також у середовищі Google Colab, що забезпечує можливість створення кастомних алгоритмів, візуалізацій та інтеграції з бібліотеками Python. Поєднання цих інструментів дає змогу працювати з великими обсягами даних без потреби у потужних локальних обчислювальних ресурсах, що є однією з ключових переваг використання хмарних інформаційних систем у сфері екологічного моніторингу.

На початковому етапі здійснено фільтрацію за датами та географічними межами регіону дослідження, а також видалення знімків із високим рівнем хмарності. Для коректності аналізу було застосовано маскування хмар та серпанку з використанням каналу QA60, який містить інформацію про пікселі, забруднені атмосферними артефактами.

Для виділення водної поверхні застосовано нормалізований водний індекс (*NDWI*) [5], який визначається за формулою (1):

$$NDWI = \frac{B3 + B8}{B3 - B8}, \quad (1)$$

де *B3* – канал відбиття у зеленому діапазоні, а *B8* – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні.

Значення *NDWI* більше 0 використовувалися для маскування територій суходолу, залишаючи лише водні поверхні.

Для оцінки концентрації фітопланктону застосовано спектральний індекс хлорофілу-а [6], що ґрунтується на відношенні відбиття у червоній та червоній крайовій зонах (формула 2):

$$CHL_a = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}, \quad (2)$$

де *B4* – відбиття у червоному діапазоні, *B5* – відбиття у ближньому червоному краї.

Такий підхід ґрунтується на відомих фізико-оптичних властивостях фітопланктону: у червоній області спектру відбувається активне поглинання світла пігментами, тоді як у червоному краї відбивається більша кількість енергії. Співвідношення цих значень дозволяє робити висновки про концентрацію хлорофілу-а, а отже, і про рівень біологічної продуктивності у водоймі.

З метою зменшення впливу шумів та хмарності було сформовано медіанні композити для різних часових інтервалів. Це дозволило згладити випадкові артефакти та виокремити загальні просторові патерни поширення хлорофілу-а. Для оцінки динаміки використовувалося різницеве зображення за яким визначались значення індексу на різних часових інтервалах.

Індексні карти хлорофілу-а було представлено у вигляді багатокольорових картографічних шарів, що відображають просторовий розподіл значень індексу. Додатково проведено порогову сегментацію, яка дозволила виділити зони з підвищеним рівнем хлорофілу-а та чітко ідентифікувати осередки цвітіння води. Це дало змогу здійснити як якісну, так і кількісну оцінку змін, а також підготувати дані для подальшого інтегрування з іншими методами аналізу, зокрема машинного навчання.

У результаті виконаних обчислень було отримано серію картографічних матеріалів, що відображають просторовий розподіл хлорофілу-а у водній акваторії Гданської затоки в різні періоди літнього сезону.

На першому етапі було проаналізовано просторовий розподіл індексу хлорофілу-а в період раннього літа (червень 2024 р.), коли цвітіння ще не досягло значних масштабів. Як видно з карти (Рис. 1), середні значення індексу в акваторії залишалися на низькому рівні, локальні підвищення спостерігалися лише поблизу гирлових ділянок річок, що впадають у затоку, та в зоні штучного розведення. Це пояснюється надходженням поживних речовин зі стоком, які створюють локальні зони підвищеної біологічної продуктивності.

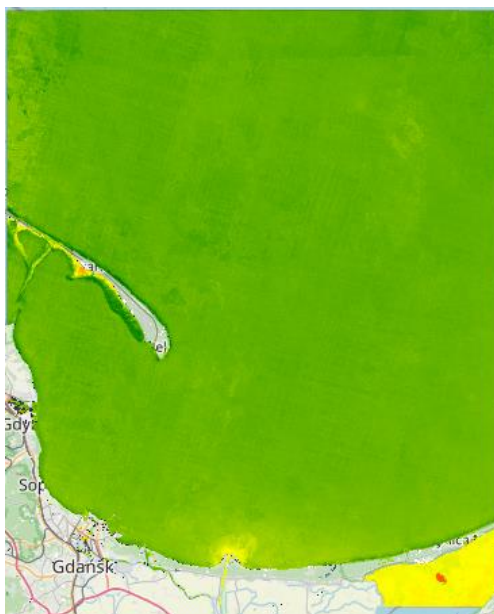


Рис. 1. Карта значення індексу хлорофілу-а на початку цвітіння

У другому часовому інтервалі – період пікового цвітіння (липень–серпень 2024 р.) – зафіксовано суттєве зростання значень індексу хлорофілу-а. Візуалізація (Рис. 2) демонструє значні площі з високими концентраціями фітопланктону, які набувають плямистої структури з чітко вираженими зонами підвищеного вмісту хлорофілу-а в центральній і південній частині затоки.



Рис. 2. Карта значення індексу хлорофілу-а в пікові періоди

У порівнянні з першим періодом площа таких ділянок зростає у кілька разів. Додатково було розраховано різницеву карту, що показує зміни рівня хлорофілу-а між двома вибраними інтервалами (Рис. 3), де синій – рівень зменшився, а червоний – рівень збільшився.

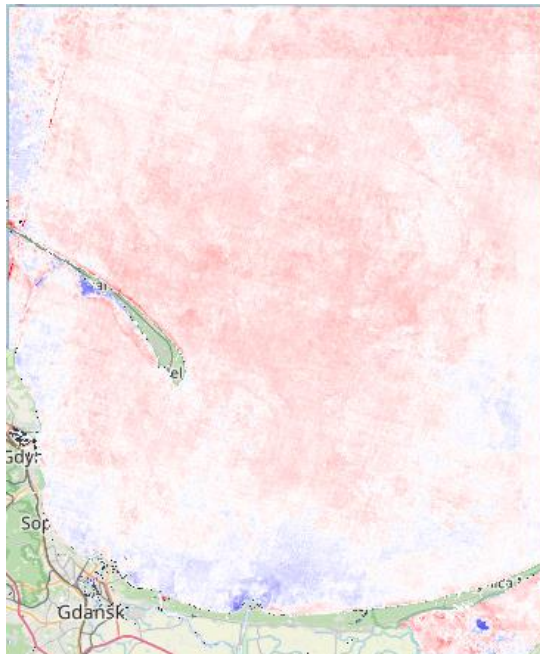


Рис. 3. Карта різниці значення індексу хлорофілу-а між періодами

Карта чітко ілюструє зони найсильнішого зростання концентрацій, які відповідають осередкам інтенсивного літнього цвітіння. Наявність таких ділянок підтверджує сезонний характер процесів евтрофікації, а також демонструє ефективність використання індексного підходу для виявлення динаміки.

Для кращої ідентифікації зон цвітіння було застосовано порогову сегментацію, де виділялися ділянки з індексом вище певного значення. Як показано на карті (Рис. 4), осередки з підвищеним рівнем хлорофілу-а займають значну частину акваторії в період пікового розвитку.

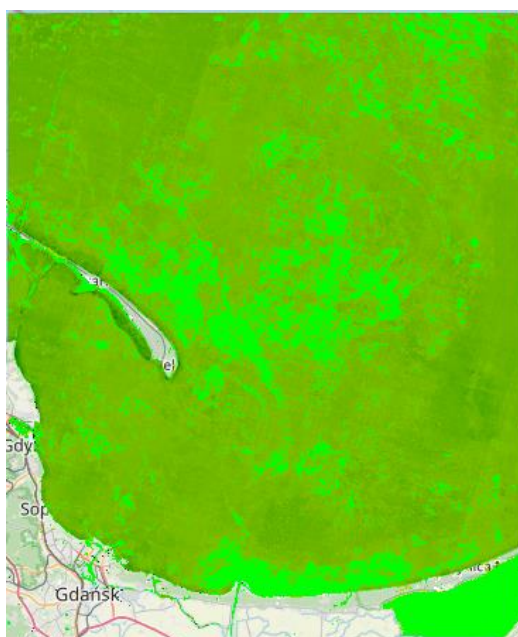


Рис. 4. Карта порогової наявності хлорофілу-а

Такий підхід дозволяє не лише якісно відобразити просторовий розподіл фітопланктону, але й отримати кількісні оцінки площі акваторії, схильної до цвітіння, що важливо для екологічного моніторингу.

Отримані результати підтверджують, що використання супутникових знімків Sentinel-2 у поєднанні з хмарними платформами забезпечує оперативність аналізу та високу деталізацію просторових змін. Використані методи дозволили виділити як локальні джерела надходження поживних речовин, так і масштабні осередки цвітіння, що формуються під час літнього сезону. Це доводить перспективність застосування індексних методів у задачах оперативного моніторингу та управління станом прибережних акваторій.

Висновки. У ході дослідження було здійснено аналіз розподілу та сезонної динаміки хлорофілу-а в акваторії Гданської затоки за даними супутника Sentinel-2 із використанням хмарних обчислювальних систем Google Earth Engine та Google Colab. Застосування методів маскуванню хмарності, виділення водних поверхонь за індексом NDWI та розрахунок індексу хлорофілу-а дали змогу отримати просторово-часові карти, які відображають як фонові концентрації фітопланктону, так і зони інтенсивного цвітіння. Використання медіанних композитів та різницевої карт дозволило зменшити вплив шуму й аномальних значень, а також оцінити масштаби та динаміку процесів евтрофікації у літній період.

Результати підтвердили, що методика є ефективною для виявлення локальних джерел надходження поживних речовин і моніторингу розвитку фітопланктону на регіональному рівні. Порогова сегментація забезпечила можливість кількісної оцінки площ, охоплених цвітінням, що є важливим інструментом для екологічного управління та прийняття рішень.

Водночас проведене дослідження виявило обмеження індексного підходу, пов'язані з залежністю спектральних коефіцієнтів від атмосферних умов, мутності води та різних типів фітопланктону. У зв'язку з цим перспективним напрямом подальших робіт є використання методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж, які здатні враховувати багатовимірні спектральні ознаки, інтегрувати дані з кількох джерел (Sentinel-2, Landsat, SAR, гіперспектральні знімки) та підвищувати точність виявлення і прогнозування цвітіння води. Це відкриває широкі можливості для розвитку систем інтелектуального моніторингу стану водних екосистем у режимі реального часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Roussillon J., Fablet R., Gorgues T., Drumetz L., Littaye J. Martinez, E. A. “Multi-Mode Convolutional Neural Network to reconstruct satellite-derived chlorophyll-a time series in the global ocean from physical drivers”. *Frontiers in Marine Science*. 2023; 10: 1077623. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1077623>.
2. Zennaro F., Furlan E., Canu D., Alcazar L. A., Rosati G., Solidoro C., Aslan S., & Critto A. “Venice lagoon chlorophyll-a evaluation under climate change conditions: A hybrid water quality machine learning and biogeochemical-based framework”. *Ecological Indicators*. 2023; 157: 111245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111245>.
3. “Copernicus Sentinel-2 User Guide”. – URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
4. “Google Earth Engine Documentation”. – URL: <https://developers.google.com/earth-engine>.
5. Sryberko A., Sryberko A. “Analysis of the application of the normalized difference water index (NDWI) in the Odesa bay area of the Black sea”. *Матеріали конференцій МЦНД*. Суми, Україна. 2023. р. 190–192. – URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/article/view/802>.
6. Mishra S., Mishra D. “Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters”. *Remote Sensing of Environment*. 2012; 117: 394-406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.11>

UDC 004.4'24

Monitoring the condition of water surfaces using the integrated environment of Google Earth Engine and Google Colab

Vadym M. Oliinyk¹⁾

Postgraduate Student of the Department of Information Systems

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5527-7750>; 5774806@as.op.edu.ua. Scopus Author ID: 59390493400

Sergiy Yu. Smyk¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-1826>, smyk@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56996011100

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Monitoring the state of aquatic ecosystems is one of the key tasks of modern ecology and natural resource management. One of the most informative indicators of water quality is the concentration of chlorophyll-a, which reflects the level of phytoplankton and is directly related to the phenomenon of eutrophication. Traditional sampling and laboratory analysis methods are accurate but have limitations in terms of scale and speed. In this context, remote sensing and cloud information systems open up new opportunities for regular monitoring of the biological productivity of water bodies. The work involves preliminary image processing, including cloud masking (QA60) and water surface extraction using the NDWI index. To assess phytoplankton levels, the chlorophyll-a spectral index was used, which takes into account the ratio of reflectance in the red and red edge bands. To reduce the impact of noise, median composites were constructed, which allowed the identification of general spatial patterns, and difference maps provided an assessment of the dynamics of changes between selected intervals. Additionally, threshold segmentation was used to identify areas with elevated chlorophyll-a levels and to quantitatively assess blooming areas. The results confirmed the effectiveness of the methodology used to identify both local sources of nutrients and large-scale centres of summer blooms. The resulting cartographic materials clearly reflected seasonal fluctuations in phytoplankton levels and the spatial structure of blooms. At the same time, limitations of the index approach were identified, related to the influence of atmospheric conditions and different types of phytoplankton. A promising direction for further research is the application of machine learning and deep neural network methods, which are capable of integrating multispectral and hyperspectral data, increasing the accuracy of detecting and predicting water blooms. This paves the way for the creation of intelligent real-time environmental monitoring systems.

Keywords: Chlorophyll-a; remote sensing; Sentinel-2; Google Earth Engine; Google Colab; NDWI; threshold segmentation; eutrophication; monitoring of aquatic ecosystems; neural networks