

Дмитрієва О. О., д-р екон. наук, ст. наук. співр.;

Цапко Н. С., канд. техн. наук, доц.;

Лисов Б. В.;

Мовчан Ю. О.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕВТРОФУВАННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ (ДЗЗ)

Тези

Сучасні методи спостереження, які умовно поділяються на *контактні* (прямі вимірювання, лабораторні аналізи) та *дистанційні*, дозволяють проводити ефективний контроль. Методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надають унікальні можливості для моніторингу великих акваторій, дозволяючи отримувати миттєву інформацію та переходити від дискретних вимірювань до безперервного просторового зображення екологічних показників.

Протягом більш ніж двадцяти років УКРНДІЕП ведуться дослідження екологічного стану Кам'янського водосховища, у районі міста Горішні Плавні, окрім наземних спостережень використовуються дослідження методами дистанційного зондування Землі. За допомогою матриці дистанційних спостережень було розраховано величину хлорофілу «а» в контрольних точках. Ці дані є основою для оцінювання рівня евтрофування водних об'єктів та визначення їхньої категорії якості

Ключові слова: Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), хлорофіл «а», фікоціанін, ціанобактерії, шкідливе цвітіння водоростей, евтрофікація, якість води, спектральні індекси, машинне навчання.

Шкідливе цвітіння ціанобактерій стає все більш поширеною проблемою у водних екосистемах по всьому світу. Їх зростання пов'язане з процесами евтрофування, спричиненою надходженням поживних речовин у водойми, а також зі зміною клімату, що призводить до серйозних загроз для водних екосистем, здоров'я людей і тварин та соціально-економічної діяльності. Цвітіння ціанобактерій призводить до зниження прозорості води, дефіциту кисню, неприємних запахів і вироблення ціанотоксинів, шкідливих для живих організмів Традиційні методи моніторингу, які включають відбір

проб води в польових умовах і лабораторний аналіз, часто є дорогими, трудомісткими і обмеженими в просторовому і часовому охопленні. У зв'язку з цим існує потреба в ефективних і широкомасштабних методах моніторингу, які можуть доповнити або замінити традиційні підходи.

Запропоновано метод оцінювання рівня «цвітіння» поверхневих водних об'єктів і визначення у подальшому в залежності від нього еколого-соціальної безпеки водокористування на основі сумісного аналізу експериментальних даних етапу наземних спостережень та результатів космічних спостережень.[1]

Використання запропонованого підходу із визначенням космічних показників дозволяє одержати оперативну оцінку рівня розвитку процесів евтрофування поверхневих водних об'єктів, характеризувати розподіл фітопланктону по акваторії за тих чи інших гідрометеорологічних умов і дає чітку інформацію щодо еколого-санітарної ситуації, що формується в місцях питних і технічних водозаборів, зон рекреації та інших ділянках водосховищ. Це дозволяє оперативно приймати необхідні адекватні управлінські рішення щодо зменшення негативних еколого-соціальних наслідків водокористування з евтрофованих водних об'єктів.

На основі сумісного аналізу експериментальних даних етапу наземних спостережень щодо вмісту хлорофілу «а» та результатів космічних спостережень із визначенням коефіцієнта спектральної яскравості (КСЯ) та NDVI одержується оцінка рівня «цвітіння» поверхневих водних об'єктів (табл. 1).

Таблиця 1 – Шкала визначення рівня «цвітіння» ПВО із використанням методів ДЗЗ

Якість поверхневих вод (рівні «цвітіння» води)	КСЯ	NDVI	Вміст хлорофілу «а», мкг/дм³
Чиста (I початкове)	≤ 4	≤0,05	< 1
Слабко забруднена (II слабке)	4 - 19	0,05–0,2	1 - 10
Помірно забруднена (III помірне)	20 - 33	0,2–0,3	11 - 50
Брудна (IV сильне)	34 - 40	0,3–0,4	51 - 100
Дуже брудна (V дуже сильне «гіперцвітіння»)	>40	>0,4	>100

Традиційно хлорофіл «а» використовується як універсальний індикатор біомаси водоростей. Однак він не є специфічним для ціанобактерій, оскільки міститься у всіх

фотосинтезуючих організмах. Це може призводити до неточностей у випадках, коли цвітіння спричинене іншими видами водоростей.

На відміну від нього, фікоціанін є унікальним пігментом, що міститься виключно в ціанобактеріях. Отже, його наявність і концентрація є прямим і більш точним індикатором саме «цвітіння», викликаного цією конкретною групою організмів. Для ДЗЗ це дає можливість:

- *підвищити специфічність моніторингу цвітіння ціанобактерій*, що є важливим для своєчасного виявлення і запобігання поширенню потенційно токсичних видів;
- *поменшити ризик хибних спрацьовувань*, коли високі показники хлорофілу «а» пов'язані з нешкідливими водоростями, а не з ціанобактеріями;
- *покращити точність прогнозування екологічних ризиків*, оскільки токсичність «цвітіння» переважно асоціюється саме з ціанобактеріями.

Таким чином, перехід на використання фікоціаніну дозволяє підвищити якість, точність та інформативність великих досліджень екологічного стану водойм.

Фікоціанін (РС) – це фотосинтетичний пігмент, унікальний для ціанобактерій, що робить його специфічним маркером їх присутності у водоймах. Вимірювання концентрації РС можна використовувати для оцінки біомаси ціанобактерій та прогнозування шкідливого цвітіння. На відміну від хлорофілу «а», який присутній у більшості фітопланктону, РС забезпечує більш специфічну індикацію ціанобактерій.

Методи дистанційного зондування (ДЗЗ) пропонує швидкі, економічно ефективні та великомасштабні спостереження з високою часовою та просторовою роздільною здатністю для моніторингу процесів евтрофування. Деякі датчики на сучасних супутниках здатні вловлювати відбите світло від водної поверхні евтрофної водойми. Методи дистанційного зондування дозволяють подолати обмеження дискретного відбору проб, надаючи інформацію про розподіл цвітіння на великих площах одночасно. Дистанційне зондування процесів евтрофування у тому числі вмісту фікоціанінів, є перспективним інструментом для моніторингу та оцінки стану водних екосистем [18].

Фікоціанін має характерний пік поглинання в помаранчево-червоній області спектра, близько 620 нм [2]. Він також має пік флуоресценції близько 650 нм [10]. Ці спектральні особливості створюють потенціал для виявлення та кількісного визначення РС за допомогою інструментів дистанційного зондування [6]. Спектральний діапазон 600-630 нм є особливо важливим для виявлення РС [13].

Смуги навколо 665 нм, 705 нм і 740 нм (наприклад, на супутниках Sentinel-2 MSI) були використані для розробки алгоритмів кількісного визначення концентрації PC. «Помаранчева контр-смуга» (590-635 нм) на супутниках Landsat 8/OLI була використана для моніторингу ціанобактерій, кількісно визначених за допомогою PC [20]. Також були розроблені індекси, такі як Індекс ціанобактерій (CI), для використання з такими датчиками, як MERIS і Sentinel-3 OLCI [7]. Індекс спектральної форми (SSI) використовує вплив фікоціаніну на спектри відбиття, враховуючи флуоресценцію хлорофілу-«а» [19].

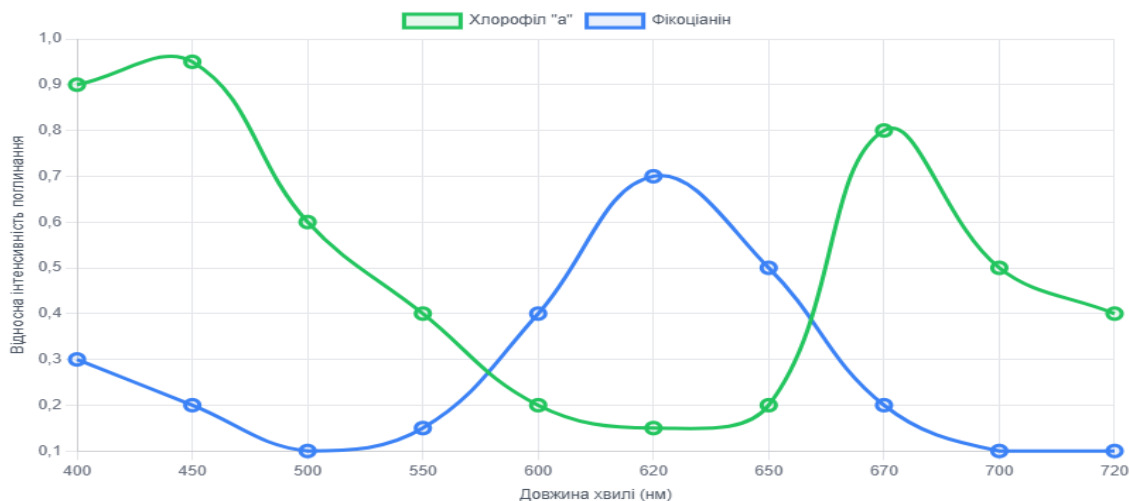


Рисунок 1 – Графік візуалізації спектральних «відбитків» хлорофілу «а» та фікоціаніну.

На графіку (рис. 1) по горизонтальній осі відкладено *довжину хвилі світла* в нанометрах (нм), а по вертикальній — *відносну інтенсивність поглинання*. Чим вище крива, тим сильніше пігмент поглинає світло на цій довжині хвилі.

Крива *хлорофілу «а»* (позначена зеленим кольором) має два основні піки поглинання. Перший, дуже високий, розташований у синій області спектра (близько 450 нм), а другий, також значний, — у червоній (близько 670 нм). Це пояснює, чому рослини та водорості, що містять хлорофіл «а», здаються зеленими — вони поглинають синє та червоне світло, відбиваючи зелене.

Крива *фікоціаніну* (позначена синім кольором) має свій виразний пік поглинання в помаранчево-червоній області спектра, приблизно на 620 нм. Це є відмінністю, що робить фікоціанін чудовим індикатором для ДЗЗ. У той час як хлорофіл «а» поглинає світло в цьому діапазоні менш інтенсивно, фікоціанін демонструє тут виражений максимум.

Основні аерокосмічні датчики, що використовуються для виявлення фікоціанінів, Sentinel-2 MSI, Sentinel-3, OLCI, Landsat 8 OLI, MODIS, гіперспектральні датчики (аерокосмічні, такі як HICO, PRISMA) [3, 9, 18, 20, 21, 25]. (табл. 2)

Слід зазначити, що гіперспектральна зйомка з БПЛА також демонструє високу точність виявлення фікоціаніну, однак, у зв'язку з військовими діями, що тривають на території України, використання БПЛА для обстеження водних об'єктів наразі є неможливим.

Таблиця 2 – Порівняння супутникових сенсорів для виявлення фікоціанінів

Супутник	Сенсор	Ключові спектральні діапазони (нм)	Просторова роздільна здатність	Часова роздільна здатність	Можливість оцінки ціанобактерій (PC)
Sentinel-3	OLCI	600-630	300	1-3	Так
MERIS	MERIS	600-630	300	-	Так
Sentinel-2	MSI	665, 705, 740	10-20	2-5	Так
Landsat 8	OLI	590-635	30	16	Так
MODIS	MODIS	667, 551	250-1000	1-2	Так
HICO	HICO	400-900 (багато вузьких діапазонів)	90	-	Так
PRISMA	PRISMA	400-2500 (багато вузьких діапазонів)	30	-	Так

Емпіричні моделі встановлюють статистичні взаємозв'язки між відбивною здатністю дистанційного зондування та концентраціями PC, виміряними під час польових досліджень за допомогою регресійного аналізу. Напівемпіричні моделі включають відомі оптичні властивості води та її складових для отримання коефіцієнтів поглинання PC [5].

Алгоритми машинного навчання, такі як градієнтне підсилення дерев (Gradient Boosting Trees, GBT), машини опорних векторів, штучні нейронні мережі та мережі змішаної щільності (MDN) все частіше використовуються для вилучення даних про PC. Регресія GBT показала високу точність для вилучення даних про PC з зображень MODIS і OLCI. Нейронні мережі використовувалися для розробки алгоритмів в Балтійському морі [4]. MDN продемонстрували надійність для оцінки PC з використанням гіперспектральних датчиків, таких як HICO і PRISMA [20].

Алгоритми співвідношення смуг використовують відбиття на певних довжинах хвиль для оцінки концентрації РС. Приклади включають алгоритми, які використовують співвідношення відбиття при 709 нм до 620 нм або 665 нм [15].

Також використовуються нормалізований індекс хлорофілу (NDCI) та індекс поверхневого цвітіння водоростей (SABl) [7]. Було розроблено трисмуговий алгоритм (PC3) для визначення концентрації РС з урахуванням впливу хлорофілу «а» [23].

Дистанційне зондування дозволяє візуалізувати концентрації РС у водних об'єктах, виявляючи просторову неоднорідність. Тематичні карти концентрацій РС можуть бути створені на основі рівнів тривоги, які можуть бути використані такими організаціями, як ВООЗ. Наприклад, гіперспектральні дані аерофотозйомки були використані для прогнозування просторового розподілу концентрацій РС у річках [10].

Концентрація РС використовується як індикатор для характеристики біомаси ціанобактерій і, відповідно, інтенсивності цвітіння. Алгоритми можуть бути використані для оцінки біомаси ціанобактерій та картографування інтенсивності цвітіння. Індекс ціанобактерій (C_{cyano}) дозволяє відрізнити ціанобактерії від інших водоростей та оцінити концентрацію клітин [22]. Псевдоіндекс Фореля-Уле (P-FUI) дозволяє визначити цвітіння ціанобактерій та його інтенсивність (висока, середня, низька) на основі відмінностей у кольорі води [8].

Хлорофіл «а» і хлорофіл «b» також поглинають світло в області 620 нм, що потенційно може перешкоджати виявленню фікоціанінів. Додаткові пігменти також можуть перекривати пік поглинання РС [24]. Неточна атмосферна корекція може призвести до помилок у відновлених концентраціях фікоціанінів [11]. Атмосферна корекція над каламутними внутрішніми водами може бути особливо складною. Каламутність, спричинена завислими осадами і забарвленими розчиненими органічними речовинами (ЗРОР), може впливати на оптичні властивості води і заважати виявленню РС. Алгоритми часто не враховують ЗРОР і триптичне поглинання, що може призвести до переоцінки поглинання пігменту [16].

Більшість сучасних супутників не мають спектральних діапазонів, які дозволяють однозначно ідентифікувати спектр відбиття фікоціанінів. Просторова роздільна здатність може обмежувати застосування методів ДЗЗ до менших водойм [17]. Часова роздільна здатність не завжди може відображати швидку динаміку цвітіння водоростей [2]. Залежно від виду та умов навколишнього середовища може спостерігатися мінливість вмісту фікоціаніну в ціанобактеріях [21]. Вміст фікоціаніну може змінюватися внутрішньоклітинно. Лабораторні методи вимірювання фікоціаніну

ще не повністю стандартизовані [14]. Також бракує стандартизації алгоритмів та метрик продуктивності [13].

Майбутні гіперспектральні місії, такі як PACE, обіцяють більш точні дані РС завдяки високій спектральній роздільній здатності [12]. Гіперспектральні дані дозволяють розробляти більш складні алгоритми, які можуть краще відрізняти фікоціанін від інших пігментів. Синергетичне використання даних з різних супутників (наприклад, MODIS і OLCI, Sentinel-2 і Sentinel-3) може забезпечити більш повне просторове і часове покриття. Інтеграція супутникових, аерокосмічних (включаючи БПЛА) і наземних даних може призвести до створення більш надійних систем моніторингу. Складні алгоритми, включаючи моделі машинного навчання, розробляються для підвищення точності і надійності даних за РС [2]. Методи глибокого навчання можуть запропонувати подальші поліпшення в аналізі складних спектральних даних. Ключовою сферою на найближче майбутнє – є розробка універсальних алгоритмів, придатних для різних типів вод і регіонів.

Література

1. Дмитрієва О.О. Екологічно безпечне водокористування у населених пунктах України. – К.: Рада по вивченню продуктивних сил України НАН України, 2008. – 459 с.
2. Phycocyanin Monitoring in Some Spanish Water Bodies with Sentinel-2 Imagery – MDPI. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/20/2866>
3. Пашенко Р.Е., Радчук В.В., Красовський Г.Я. та ін. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA : монографія / під ред. С.О. Довгого. – Х: ФОП Пономаренко Є.В., 2013. 316 с.
4. Comparison of phycocyanin concentrations in Chaohu. – Frontiers. Режим доступу: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.922505/full> 3
5. The Cyanobacteria Assessment Network (CyAN) - NOAA, <https://cdn.coastalscience.noaa.gov/page-attachments/HABHRCA/IWG-CyAN-HABs-Monitoring-Forecasting.pdf>
6. Mapping Freshwater Algal Blooms with Remote Sensing - LG Sonic. Режим доступу: <https://www.lgsonic.com/freshwater-remote-sensing/>
7. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie | Request PDF - ResearchGate. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/222547958_Phycocyanin_detection_from LANDSAT_TM_data_for_mapping_cyanobacterial_blooms_in_Lake_Erie

[SAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie](#)

8. Innovative Remote Sensing Identification of Cyanobacterial Blooms Inspired from Pseudo Water Color - MDPI. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/1/215>
9. The Search for a MODIS Image Product for Mapping Phycocyanin Pigment - NOAA Great Lakes Environmental Research Laboratory. Режим доступа: <https://www.glerl.noaa.gov/res/projects/ifyle/proposals/vincent-leshkevich.doc>
10. Quantification of Phycocyanin in Inland Waters through Remote. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/16/3335>
11. Advancing cyanobacteria biomass estimation from hyperspectral observations - the NOAA Institutional Repository. Режим доступа: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/50675/noaa_50675_DS1.pdf
12. Phycocyanin sensors as an early warning system for cyanobacteria blooms concentrations: a case study in the Rotorua lakes - Taylor & Francis Online. Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00288330.2019.1617322>
13. Phycocyanin concentration retrieval in inland waters: A comparative review of the remote sensing techniques and algorithms | Request PDF - ResearchGate. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/325391334_Phycocyanin_concentration_retrieval_in_inland_waters_A_comparative_review_of_the_remote_sensing_techniques_and_algorithms
14. Challenges for mapping cyanotoxin patterns from remote sensing of cyanobacteria - CIGLR. Режим доступа: https://ciglr.seas.umich.edu/wp-content/uploads/2017/03/Stumpf_et.al.pdf.pdf
15. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments. Режим доступа: chlorophyll a and phyc. Режим доступа: <https://www.csum.edu/oceanography/media/2008-randolph-et-al.pdf>
16. (PDF) A remote sensing tool for near real-time monitoring of harmful algal blooms and turbidity in reservoirs - ResearchGate. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/369529536_A_remote_sensing_tool_for_near_real-time_monitoring_of_harmful_algal_blooms_and_turbidity_in_reservoirs
17. CONFOUNDING CONSTITUENTS IN REMOTE SENSING OF. Режим доступа: <https://scholarworks.indianapolis.iu.edu/bitstreams/ad117408-1bd5-405f-8d51-8df8569a458a/download>
18. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. Режим

доступу: https://www.researchgate.net/publication/232041562_Remote_sensing_of_the_cyanobacterial_pigment_phycocyanin_in_turbid_inland_water

19. Phycocyanin Remote Sensing of Water Resources. Режим доступа: <https://water.rs.umn.edu/phyococyanin>

20. Monitoring Phycocyanin with Landsat 8/Operational Land Imager Orange Contra-Band. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3298/9/3/40>

21. Using Sentinel-3 Satellite Imagery for Cyanobacteria Development Monitoring - ScholarWorks@GVSU. Режим доступа:

<https://scholarworks.gvsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1898&context=honorsprojects>

22. Remote Sensing of Harmful Algal Blooms - Sanibel-Captiva Conservation Foundation. Режим доступа: <https://sccf.org/blog/2021/11/09/remote-sensing-of-harmful-algal-blooms/>

23. A novel remote sensing algorithm to quantify phycocyanin in cyanobacterial algal blooms - Politecnico Di Milano. Режим доступа:

http://www.bibliosearch.polimi.it/discovery/fulldisplay?docid=cdi_crossref_primary_10_1088_1748_9326_9_11_114003&context=PC&vid=39PMI_INST:VU1&lang=it&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=sub%2Cequals%2CAbsorption%20spectra%20%2CAND&mode=advanced&offset=0

24. (PDF) A novel remote sensing algorithm to quantify phycocyanin in. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/267696510_A_novel_remote_sensing_algorithm_to_quantify_phycocyanin_in_cyanobacterial_algal_blooms

25. Assessment of Estimated Phycocyanin and Chlorophyll-a Concentration from PRISMA and OLCI in Brazilian Inland Waters: A Comparison between Semi-Analytical and Machine Learning Algorithms - Apollo. Режим доступа: <https://www.repository.cam.ac.uk/items/3b4b4dd5-8dfc-45f6-b777-9ec2d96b8381>