

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-03>

УДК (UDC): 504.45.058

Ю. С. ТУЧКОВЕНКО, д-р географ. наук, проф.,
завідувач кафедри океанології та морського природокористування
e-mail: tuch2001@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна

Інститут морської біології НАН України

вул. Пушкінська, 37, Одеса, 65048, Україна

В. А. ОВЧАРУК, д-р географ. наук, проф.,

завідувач кафедри гідрології суші

e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна

М. О. МАРТИНЮК, доктор філософії,

молодший науковий співробітник

e-mail: martyniuk0904@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-4907>

Інститут морської біології НАН України

вул. Пушкінська, 37, Одеса, 65048, Україна

Є. І. ГАЗЕТОВ

старший науковий співробітник,

e-mail: gazetov@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5362-1973>

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,

вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна

О. В. ЗОТОВА

науковий співробітник

e-mail: galajkoola@ukr.net

Український науковий центр екології моря

Французький бул. 89, Одеса, 65009, Україна

В. М. ХОХЛОВ, д-р географ. наук, проф.,

професор кафедри метеорології та кліматології

e-mail: valeriy.khokhlov@stir.ac.uk ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна

University of Stirling

Stirling, FK9 4LA, Scotland, United Kingdom

D. JIANG

Research Fellow

e-mail: dalin.jiang@stir.ac.uk ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5676-5860>

University of Stirling

Stirling, FK9 4LA, Scotland, United Kingdom

A. N. TYLER

Scotland Hydro Nation Chair

e-mail: a.n.tyler@stir.ac.uk ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0604-5827>

University of Stirling

Stirling, FK9 4LA, Scotland, United Kingdom

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО МОНИТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОД ОЗЕРНИХ ЕКОСИСТЕМ

Мета. Результати впровадження нових підходів до реалізації моніторингу за показниками екологічного стану вод озерних екосистем на прикладі Придунайських озер із використанням сучасних експрес методів визначення окремих екологічних параметрів та супутникової інформації дистанційного зондування водних об'єктів.

© Тучковенко Ю. С., Овчарук В. А., Мартинюк М. О., Газетов Є. І., Зотова О. В., Хохлов В. М., Jiang D., Tyler A. N., 2024



[This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Методи. Лабораторний аналіз визначення концентрації хлорофілу-а згідно з ДСТУ 7.1. 4.02-90 «Вода. Методика спектрофотометричного визначення хлорофілу α », польові вимірювання прозорості води із використанням стандартного диску Секкі, концентрацій хлорофілу-а, загальної зваженої речовини, показника спектрального ослаблення світла із використанням портативного гіперспектрального радіометру WISP-3. Оброблення процесором C2X-COMPLEX платформи Sentinel Application Platform супутникових знімків SENTINEL-2 MSI L1C завантажених з браузера Copernicus.

Результати. Влітку 2023 року здійснено 2 експедиційні виїзди на Придунайські озера Кагул, Ялпуг-Кугурлуй, Китай, Котлабух. Встановлено, що результати спостережень за показниками якості води (концентраціями хлорофілу-а, загальної зваженої речовини, показника спектрального ослаблення світла) отримані за допомогою гіперспектрального радіометру WISP-3 добре узгоджуються як між собою, так і з даними лабораторного аналізу концентрацій хлорофілу-а і вимірами прозорості води. Оцінено можливість використання супутникових знімків SENTINEL 2 MSI, оброблених із застосуванням процесора C2X-COMPLEX платформи Sentinel Application Platform (SNAP 9.0.0), для отримання оперативної інформації щодо просторово-часової мінливості концентрацій хлорофілу-а та загальної зваженої речовини в Придунайських озерах. Встановлена наявність достатньо тісного кореляційного зв'язку (коефіцієнт детермінації 0,9 і вище) між вимірними і визначеними із супутникових знімків значеннями цих показників. За даними досліджень виконаних у липні 2023 року встановлено, що концентрації хлорофілу-а у 2023 році були вищими ніж на початку XXI століття (у 2001 р.) у всіх озерах, що є очікуваним наслідком поповнення озер великими об'ємами дунайської води в першому півріччі 2023 року після посушливих попередніх років. Найбільші збільшення концентрацій спостерігались у озері Котлабух.

Висновки. Встановлено, що для моніторингу екологічного стану Придунайських озер, зокрема оперативної оцінки просторово-часової мінливості таких показників якості вод як концентрації хлорофілу-а, загальної зваженої речовини, ступеня прозорості вод, можуть бути успішно використані оброблені із застосуванням процесора C2X-COMPLEX супутникові знімки SENTINEL-2 MSI з просторовою роздільною здатністю 20-60 м на піксель. Радіометр WISP-3 може бути використаний для експрес визначення показників якості води на Придунайських озерах при організації екологічного моніторингу із залученням супутникової інформації, зокрема, з метою її верифікації за даними польових спостережень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Придунайські озера, екологічний стан, моніторинг, дистанційний, супутниковий моніторинг, калібрування

Як цитувати: Тучковенко Ю. С., Овчарук В. А., Мартинюк М. О., Газетов Є. І., Зотова О. В., Хохлов В. М., Jiang D., Tyler A. N. Сучасні підходи до моніторингу екологічного стану вод озерних екосистем. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2024. Вип. 42. С. 35-50. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-03>

In cites: Tuchkovenko, Yu. S., Ovcharuk, V. A., Martyniuk, M. O., Gazyetov, Ye. I., Zotova, O. V., Khokhlov, V. M., Jiang, D., & Tyler, A. N. (2024). Modern approaches to monitoring the ecological condition of lake ecosystem waters. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (42), 35-50. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-03> (In Ukrainian)

Вступ

Придунайські озера розташовані на лівому березі Кілійського рукава річки Дунай на ділянці від м.Рені до м.Кілії. Найбільшими з них є Кагул, Ялпуг з Кугурлуем, Катлабух і Китай. Придунайські озера мають величезний природний потенціал для соціально-економічного розвитку півдня Одеської області. Вони є джерелом господарсько-побутового водопостачання прилеглих населених пунктів, сільськогосподарського водопостачання для зрошуваного землеробства, крупним рибогосподарським комплексом.

На теперішній час всі озера відокремлені від річки Дунай дамбами обвалування і з'єднуються з нею природними протоками чи штучними каналами, на яких побудовані

гідротехнічні споруди для регулювання водообміну і пропуску риби. Гідрологічний режим озер відповідає режиму водосховища і є регульованим. Невеликі степові річки, які впадають в озера, маловодні і є пересохлими більшу частину року. Тому річка Дунай є основним джерелом водообміну і водооновлення озер.

Режим роботи водосховищ визначається фазами водного режиму р.Дунай. У період весняного водопілля, коли рівні води в річці вищі за рівні води в озерах, шлюзи в каналах відчиняються і водойми наповнюються дунайською водою. На період літньої межени шлюзи закриваються і вода витрачається на забезпечення різних видів водоко-

ристування і випаровування. Восени, якщо рівні води в р. Дунай нижчі за рівні води в озерах, здійснюються скиди води з водосховищ в річку. Після цього шлюзи знову закриваються на зимовий період [1, 2].

З середини 90-х років минулого століття, через суттєве загальне зменшення площі зрошуваних земель, відбулось зменшення в десятки разів заборів води з озер на зрошування. Це значно погіршило екологічний стан і якість вод озер, головним чином, через значне зменшення водооновлення і водообміну у водосховищах. Погіршення якості вод полягає, насамперед, у підвищенні мінералізації води в озерах до величин, які перевищують вимоги до якості питної та зрошувальної води (1,0-1,5 г/дм³), а також у посиленні евтрофікації вод озер, що призводить до розвитку «цвітіння» синьо-зелених водоростей і зменшення прозорості води до 0,2-0,3 м.

Значне погіршення якості води в озерах відбувається в літньо-осінній період в роки критичного зниження рівня води в них (до рівня мертвого об'єму (РМО) і нижче), коли низькі рівні води в річці Дунай, або замулення підвідних каналів (включно з утворенням барів на вході до них), не дозволяють поповнити їх дунайською водою до нормального підпертого рівня (НПР). Така ситуація склалася у 2022 році, коли через посуху і низькі рівні води в р. Дунай, відсутність весняного водопілля, наповнення озер дунайською водою було неможливим з лютого по грудень. В результаті рівні води в озерах знизились до критичних позначок, і на початку грудня дорівнювали 0,24 м БС – в озері Китай, 1,01 м БС – в оз. Катлабух, 1,92 м БС – в оз. Кагул і 1,44 м БС - в оз. Ялпуг-Кугурлуй. Це при тому, що влітку, протягом двох місяців здійснювалась примусова штучна підкачка дунайської води насосними станціями в озера Китай (близько 300 м³/доб) і Катлабух (близько 600 м³/доб).

Основним джерелом водообміну і водооновлення Придунайських озер, яке за певних умов дає можливість регулювати їх гідрологічний режим і екологічний стан, є р. Дунай. В роботах [3, 4], на підставі результатів чисельних експериментів з 1-D моделлю евтрофікації, було показано, що найбільш небезпечним для екосистем водоймищ є їх обміління в маловодні роки, коли через низькі рівні р. Дунай не вдається наповнити водойми до НПР. Падіння рівня води в літній період року супроводжується зменшенням вмісту мінеральних форм біогенних

речовин та зростанням концентрації, як живої, так і косної органічної речовини. Тобто запаси мінеральних форм біогенних елементів у водоймі трансформуються у запаси органічної речовини. При цьому небезпека полягає в тому, що ця органічна речовина, внаслідок гравітаційного осадження, депонується в донних відкладах і на її біохімічне розкладання витрачається кисень, який міститься у воді. При несприятливому збігу обставин споживання кисню на біохімічне розкладання цієї органічної речовини може перевищити його надходження за рахунок фотосинтезу та газообміну з атмосферою протягом досить тривалого часу, що призведе до розвитку гіпоксії в придонних шарах води.

Концентрація органічної речовини, що утворюється в озерах у літній період року, залежить також від концентрації біогенних речовин у водах річки Дунай у весняні місяці, коли має місце їх надходження у водойму у великих обсягах. Високий вміст біогенних речовин у водах р. Дунай в період наповнення водоймища тягне за собою раннє цвітіння фітопланктону і посилення піку його біомаси на початку літа, коли біомаса зоопланктону ще не досягла тих значень, щоб стримувати зростання фітопланктону.

Проблема посилення евтрофікації вод Придунайських озер обговорювалась також в роботах [5-7].

Залежність екологічного стану Придунайських озер від метеорологічних умов року, водності річки Дунай, пропускної здатності підвідних каналів, визначає необхідність реалізації регулярного моніторингу за індикаторами його погіршення. Такими показниками можуть бути, зокрема, значне збільшення концентрацій хлорофілу-а, загальної зваженої речовини, зменшення прозорості вод.

В умовах дефіциту коштів і обмежень на реалізацію регулярного екологічного моніторингу водних об'єктів України через війну з російською федерацією, найбільш перспективним і економічно виправданим для контролю екологічного стану озер є використання даних супутникового дистанційного зондування Землі [8, 9]. Цей напрям успішно розвивається, зокрема, дослідницькою групою спостережень за Землею в Університеті Стірлінга (Великобританія, Шотландія) [10-13]. Оперативної служба Обсерваторії озер Великобританії (UK Lakes Observatory-UKLO) надає інформацію про якість води для понад 900 водойм Великобританії за допомогою супутникових спостережень [14]. Служба на-

разі використовує дані супутників Copernicus Sentinel-2A/B Європейського космічного агентства для отримання щотижневих агрегованих оцінок концентрації хлорофілу-а у фітопланктоні з роздільною здатністю пікселів 20 м. Дані обробляються за допомогою інноваційного ланцюжка обробки, який був розроблений протягом кількох років досліджень в Університеті Стірлінга. Ланцюжок обробки використовує найсучасніший підхід для атмосферної корекції супутникових даних і поєднує його з набором алгоритмів для оцінки хлорофілу-а, які реалізуються залежно від оптичних характеристик озера, що знаходиться під спостереженням [15 – 17].

В 2023 році, в рамках британсько-української грантової програми з досліджень та інновацій TWINNING, Одеським державним екологічним університетом спільно з Університе-

том Стірлінга виконувався спільний дослідницький проєкт CORNELIA «Capacity Building in Earth observation for national water quality assessment / Розбудова потенціалу в галузі спостереження за Землею щодо національної оцінки якості води», спрямований на запровадження супутникових методів дистанційного моніторингу якості води в водоймах України. В межах цього проєкту Придунайські озера використовувались як істотний полігон для відпрацювання методик, які впроваджуються [18].

Мета – надати результати впровадження нових підходів до реалізації моніторингу за показниками екологічного стану вод озernih екосистем на прикладі Придунайських озер із використанням сучасних експрес методів визначення окремих екологічних параметрів та супутникової інформації дистанційного зондування водних об'єктів.

Методи і матеріали

В дослідженні використано дані щодо концентрацій хлорофілу-а, загальної (органічної і неорганічної) зваженої речовини (Total Suspended Matter - TSM), показника спектрального ослаблення світла (K_d) отримані за допомогою портативного гіперспектрального радіометру WISP-3 [19, 20], який застосовувався для дистанційного сканування поверхні води з плавзасобу та берега.

WISP-3 містить три гіперспектральні радіометри, які вимірюють відповідно низхідне випромінювання, висхідне випромінювання і дифузну низхідну радіацію. За сигналом цих трьох радіометрів визначається коефіцієнт відбиття («колір») води.

WISP-3 розроблено спеціально для спектроскопії відбиття природних водойм. Спектроскопія відбиття пов'язує випромінювання, відбите об'єктом, з його матеріальним складом. Завдання при розробці алгоритмів відбиття полягає в тому, щоб зв'язати властивості поглинання та розсіювання світла речовин, які присутні у водоймі (наприклад, пігменти фітопланктону, зважені речовини), з їхнім впливом на колір води за різних концентрацій кожної речовини. Крім того, головний інтерес для визначення проникнення сонячного світла у товщу води, яке стимулює водний фотосинтез, становить масове ослаблення світла комбінованими речовинами. Алгоритми, які використовуються для отримання концентрацій цих речовин із виміряного коефіцієнта відбиття, вбудовані в WISP-3 за замовчуванням і вважаються

придатними для низки типів вод - від помірно до дуже каламутних.

Більшість вбудованих алгоритмів WISP-3 націлені на певні області в спектрі відбиття, які відповідають діапазонам довжин хвиль, де відповідна речовина має великий вплив на кількість відбитого світла, тоді як інші речовини не мають великого впливу на спектр відбиття. Оптичні сигнали витягуються з різниць між цими спектральними смугами або з відношень смуг до еталонних смуг. Ці алгоритми, як правило, націлені на одну-чотири смуги одночасно для вирішення зворотної проблеми.

З метою перевірки достовірності даних щодо концентрації хлорофілу-а, отриманих із використанням гіперспектрального радіометру WISP-3, паралельно виконувався забір проб води і їх лабораторний аналіз для визначення концентрації хлорофілу-а стандартним методом відповідно до ДСТУ 7.1.4.02-90 «Вода. Методика спектрофотометричного визначення хлорофілу а» [21], а також польові вимірювання прозорості води із використанням стандартного диску Секкі.

На придунайські озера Кагул, Ялпуг-Кугурлуй, Китай, Котлабух влітку 2023 року здійснено 2 експедиційні виїзди: 19-20 липня і 25-26 липня. Відбір проб на концентрацію хлорофіла-а і прозорість води з човна, з одночасним вимірюванням параметрів якості води із використанням гіперспектрального радіометру WISP-3, виконувався тільки на озерах Ялпуг-Кугурлуй і Китай.

Загальне уявлення про станції, на яких виконувався відбір проб на Придунайських озерах, можна скласти з рис. 1.

Для оцінки можливостей організації дистанційного моніторингу якості води Придунайських озер використовувались супутникові знімки SENTINEL-2 MSI L1C, на основі обробки яких були отримані поля просторового розподілу концентрацій хлорофілу-а та загальної зваженої речовини

TSM (Total Suspended Matter). Багатоспектральний оптичний прилад MSI (MultiSpectral Instrument) супутника SENTINEL-2 здійснює вимірювання в 13 спектральних діапазонах з просторовою роздільною здатністю 10-60 м на піксель. MSI працює пасивно, збираючи сонячне світло відбите від Землі. Спектральне розділення кожного діапазону на окремі довжини хвиль виконується смуговими фільтрами, встановленими зверху детекторів.

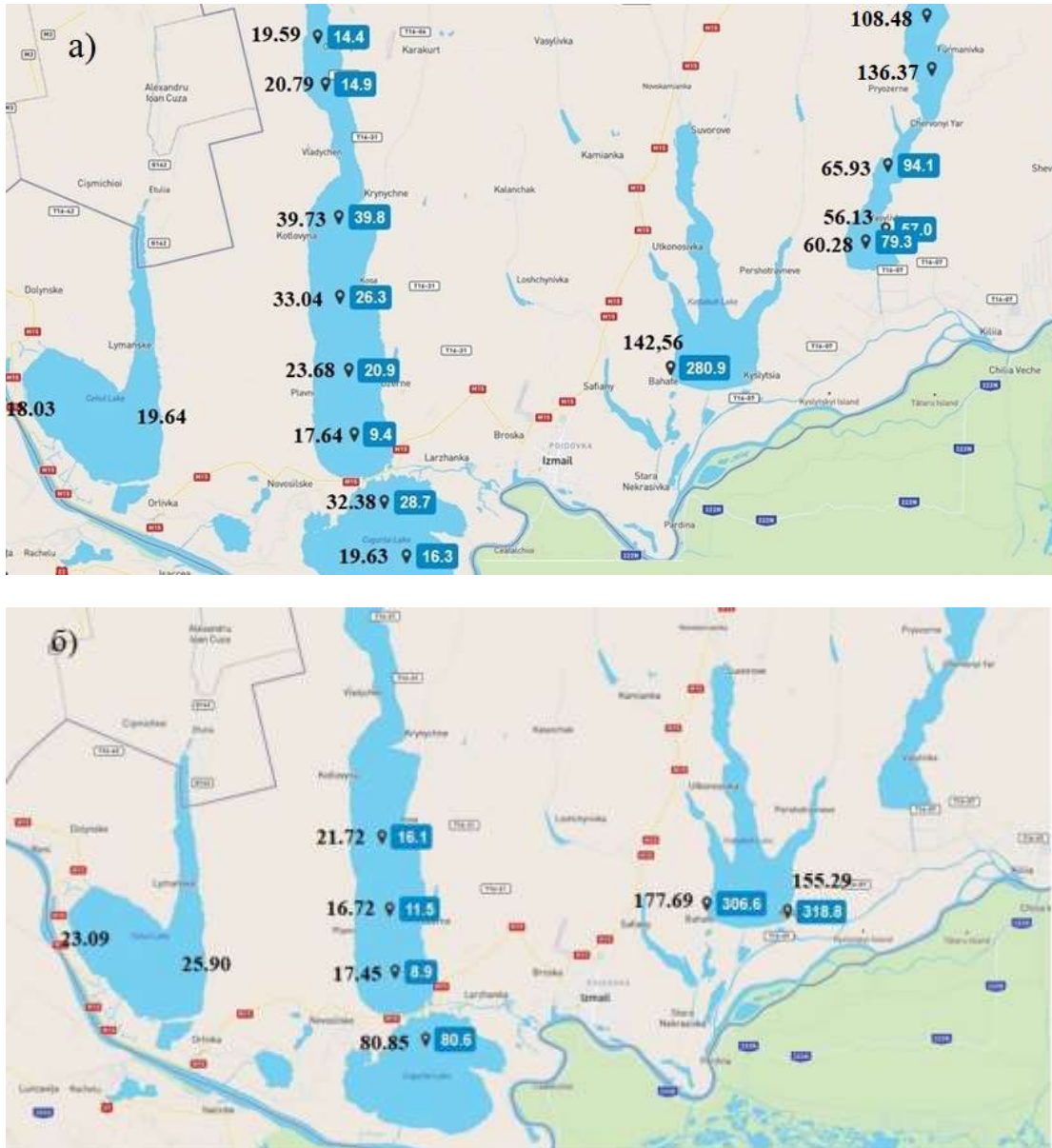


Рис. 1 – Концентрації хлорофілу-а, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, визначені інструментальним методом із застосуванням WISP-3 (значення в синіх прямокутниках праворуч від точки спостереження) та стандартним лабораторним методом (значення чорними цифрами ліворуч від точки спостереження): а) 19-20 липня 2023 р.; б) 25-26 липня 2023 р.

Fig. 1 – Chlorophyll-a concentrations, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, determined by the instrumental method using WISP-3 (values in blue rectangles to the right of the observation point) and standard laboratory method (values in black numbers to the left of the observation point): a) July 19-20, 2023; b) July 25-26, 2023

Супутникові зображення завантажувались з браузеру Copernicus (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>).

Критеріями відбору знімків були наявність вимірювань концентрацій хлорофілу-а та загальної зваженої речовини у день прольоту супутника (і день після прольоту) та відсутність хмарності над пунктами спостережень.

Відібрані знімки оброблялися процесором C2RCC (Case 2 Regional CoastColour) платформи Sentinel Application Platform (SNAP 9.0.0), який дає змогу отримувати концентрації хлорофілу-а та загальної зваженої речовини в поверхневому шарі водних об'єктів.

C2RCC - це процесор для атмосферної корекції та отримання методом навчання нейронних мереж п'яти основних біооптичних компонентів поглинання та розсіювання світла частинками у водному середовищі: поглинання детритом, жовтою речовиною та пігментами фітопланктону; розсіювання «білими частинками» та «типовим осадом». Алгоритмічні основи C2RCC були закладені Schiller H., Doerffer R [22], які вперше навчили штучні нейронні мережі. Надалі мережі були реалізовані в процесорі Case-2

Regional для внутрішніх вод, перетворившись на процесор C2RCC [23]. Остання розробка цього алгоритму, так звана C2X-COMPLEX (C2XC), застосовується для більш каламутних прибережних та внутрішніх вод [24] і вона була використана у цьому дослідженні.

З метою збільшення точності результатів у процесорі задавалися реальні параметри водного середовища: солоність та температура; атмосферні параметри: тиск та вміст озону,- були залишені за умовчанням. Отримані з використанням алгоритму C2X-COMPLEX концентрації хлорофілу-а та TSM бралися з розрахункового растру в точках спостережень шляхом накладання на растр точок з координатами польових вимірювань та експорту розрахункових величин у текстовий формат.

До аналізу залучалися наявні супутникові знімки S2B_MSIL1C_20230719T090559_N0509_R050_T35TPL і S2A_MSIL1C_20230721T085601_N0509_R007_T35TPL отримані 19 та 21.07.2023 р. На жаль, знімок S2B_MSIL1C_20230726T085559_N0509_R007_T35TPL за 26.07.2023 р. було неможливо використовувати через щільну хмарність над акваторією більшості озер.

Результати

Визначені із використанням стандартного аналізу відібраних проб в лабораторних умовах і гіперспектрального радіометру WISP-3 концентрації хлорофілу-а на Придунайських озерах показані на рис. 1. Для визначення відповідності цих даних, отриманих різними методами, був побудований графік, показаний на рис. 2. Видно, що результати вимірювань радіометром WISP-3 в цілому добре узгоджуються з даними лабораторних аналізів, але при значеннях концентрації хлорофілу-а більших за $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ WISP-3 починає завищувати реальні значення, визначені лабораторно, хоча кореляційна залежність між ними зберігається. В діапазоні значень від 15 до $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ зв'язок між значеннями концентрації хлорофілу-а визначеними лабораторно і із використанням радіометру WISP-3 має лінійний характер.

В період досліджень найбільші концентрації хлорофілу-а, які перевищували $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, спостерігались в озері Катлабух і в північній частині озера Китай, найменші – від 16

до $26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ – в озері Кагул та південній частині озера Ялпуг.

Виміряні у липні 2023 року концентрації хлорофілу-а порівнювались з результатами вимірювань, виконаних на Придунайських озерах влітку 2001 р. [6]. З таблиці видно, що концентрації хлорофілу-а у 2023 році вище ніж у 2001 р. у всіх озерах. Найбільше збільшення концентрацій (в 9 разів) відбулося у озері Катлабух. Ступінь його трофності збільшилась зі статусу евтрофного ($11-30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) до гіпертрофного ($>150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) [25].

Зауважимо, що хоча в 2001 році концентрації хлорофілу-а в озері Катлабух були значно меншими ніж в озері Китай, але за свідченням [6] фотосинтетична активність фітопланктону була в 2-3 рази вищою, ніж в інших озерах. Тобто озеро Катлабух мало найбільш високий трофічний статус серед інших.

Отже за даними вимірів хлорофілу-а стандартним лабораторним методом, у липні 2023 року озера Кагул і Ялпуг відносять-

Вміст хлорофілу-а (в $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) у воді Придунайських озер влітку 2001 і 2023 років

Table

Chlorophyll-a content (in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) in the water of the Danube lakes in the summer of 2001 and 2023

Період Водойма	літо 2001 р.		липень 2023 р.	
	середнє	діапазон змін	середнє	діапазон змін
Кагул	11,23	7,21 ÷ 15,41	21,69	18,03 ÷ 25,90
Ялпуг	12,84	2,28 ÷ 22,97	23,37	16,72 ÷ 39,73
Кугурлуй	12,26	2,91 ÷ 27,90	44,29	19,63 ÷ 80,85
Котлабух	17,60	6,20 ÷ 25,70	158,51	142,56 ÷ 177,69
Китай	69,00	46,60 ÷ 95,61	85,44	56,13 ÷ 136,37

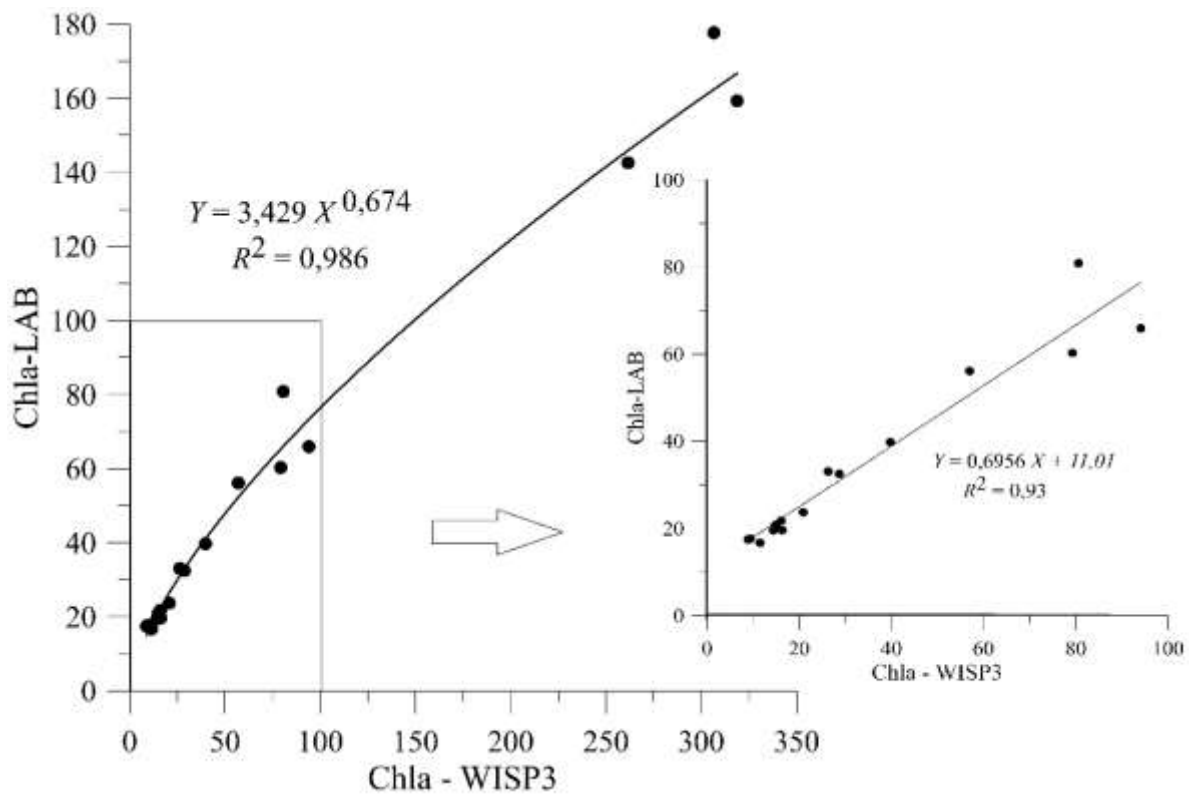


Рис. 2 – Кореляційна залежність між концентраціями хлорофілу-а (в $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) визначеними в результаті застосування гіперспектрального радіометру WISP-3 (Chla-WISP3) та в лабораторних умовах (Chla-LAB). Тут і у подальшому, R^2 – коефіцієнт детермінації

Fig. 2 – Correlation dependence between the concentrations of chlorophyll-a (in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) determined as a result of using the hyperspectral radiometer WISP-3 (Chla-WISP3) and in laboratory conditions (Chla-LAB). Here and in the following, R^2 is the coefficient of determination

ся за трофічним статусом до евтрофних, Кугурлуй - до еволітрофних, політрофних, Китай – до політрофних, а Котлабух – до гіпертрофних.

Визначені із застосуванням WISP-3 концентрації загальної зваженої речовини в водах озер показані на рис. 3. Вони добре корелюють з виміряною в ході польових досліджень прозорістю вод (рис. 4), що є цілком очікуваним, оскільки саме концентрація у

воді зваженої речовини (мінеральної та органічного походження) визначає коефіцієнт ослаблення у воді сонячної радіації та локальну прозорість вод. Найбільші концентрації зависі в період експедиційних досліджень спостерігались в озері Катлабух, а найменші – в озері Ялпуг

Загальна концентрація зважених речовин складається з часток як мінерального, так і органічного походження. Концентрація

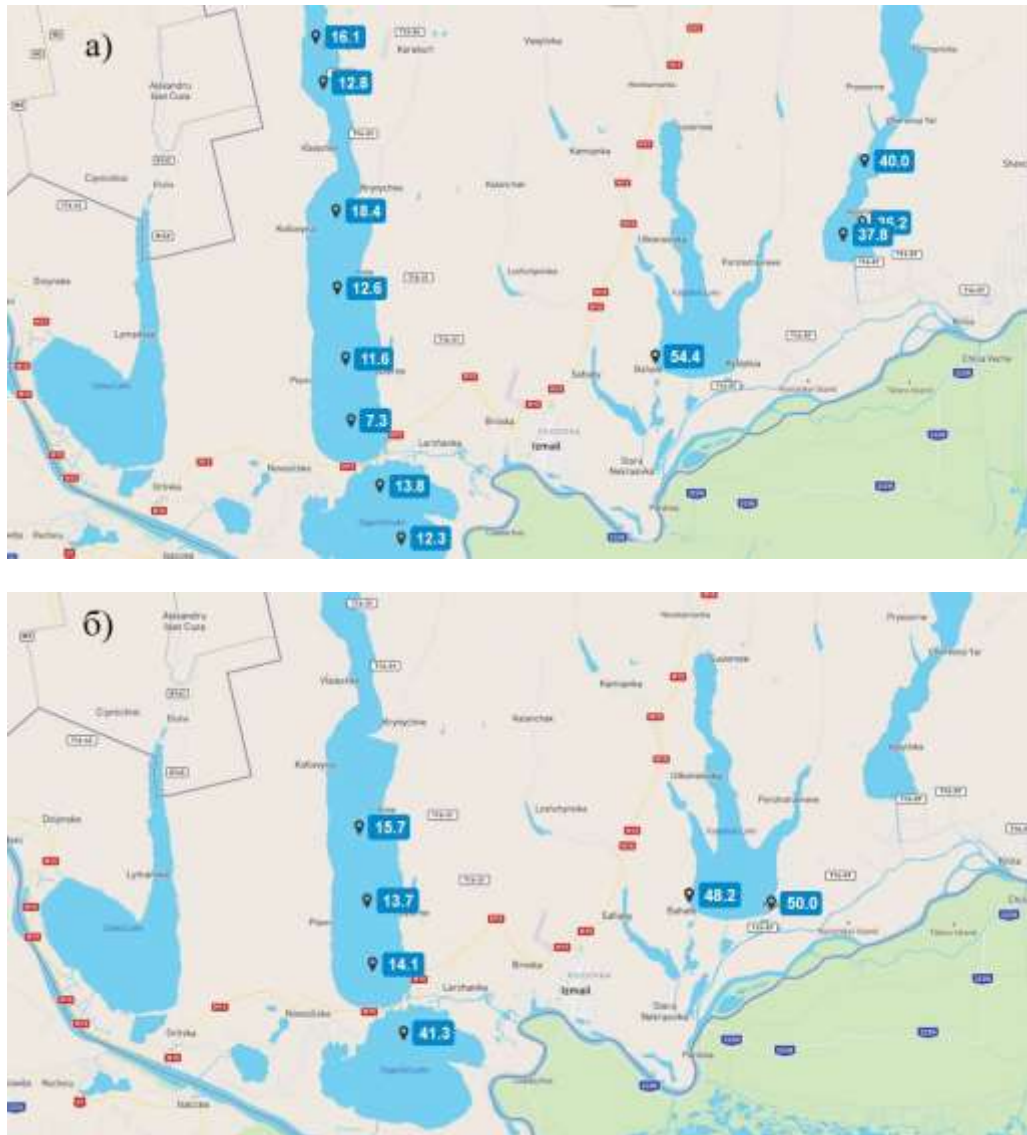


Рис. 3 – Концентрації загальної зваженої речовини ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) визначені із застосуванням гіперспектрального радіометру WISP-3: а) 19-20 липня 2023 р.; б) 25-26 липня 2023 р.

Fig. 3 – Concentrations of total suspended matter ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) were determined using the WISP-3 hyperspectral radiometer: a) July 19-20, 2023; б) July 25-26, 2023.

хлорофілу-а є опосередкованим показником біомаси фітопланктону у воді, який входить до складу зваженої органічної речовини. У разі малого вмісту мінеральної зависі у воді, зростання концентрації хлорофілу-а (біомаси фітопланктону) буде призводити до відповідного збільшення загальної концентрації зважених речовин. Навпаки, у разі значного вмісту у воді мінеральної зависі та детриту, які надходять до водної товщі разом з боковим стоком з водозбору або в результаті вітро-хвильового скаламучування донних відкладів, зв'язок між концентрацією хлоро-

філу-а і загальною концентрацією зважених речовин не буде простежуватись.

Зв'язок між концентрацією TSM та концентрацією хлорофілу-а у водах Приднібнських озер, визначеною лабораторно і із застосуванням радіометру WISP-3, показаний на рис. 5. З рисунку видно, що збільшення концентрації хлорофілу-а супроводжується збільшенням загальної концентрації зважених речовин. Це свідчить про те, що у водах озер у вимірній величині TSM переважає фітопланктон. У разі використання даних щодо концентрації хлорофілу-а визначених лабораторно, зв'язок між ними і зага-

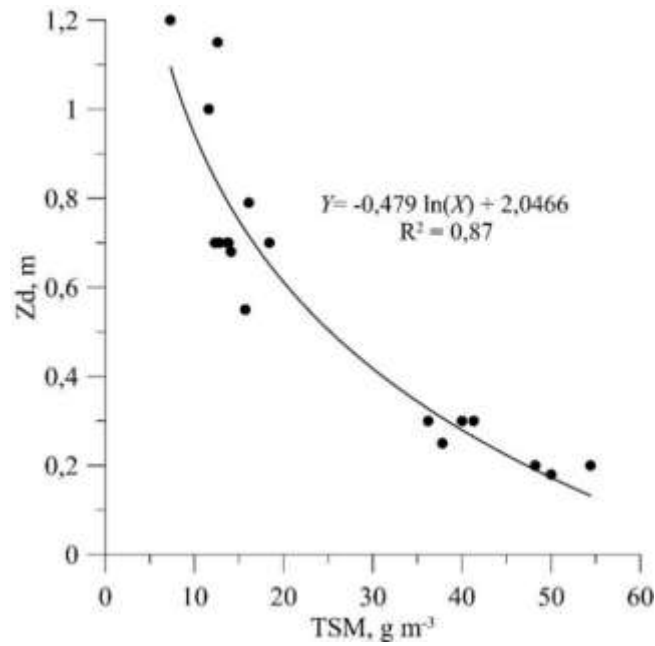


Рис. 4 – Кореляційна залежність між концентраціями загальної зваженої речовини (TSM, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) визначеними в результаті застосування гіперспектрального радіометру WISP-3 та вимірюваною в польових умовах прозорістю вод (Z_d , м)

Fig. 4 – Correlation between concentrations of total suspended matter (TSM, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) determined as a result of the use of the WISP-3 hyperspectral radiometer and water transparency measured in field conditions (Z_d , m)

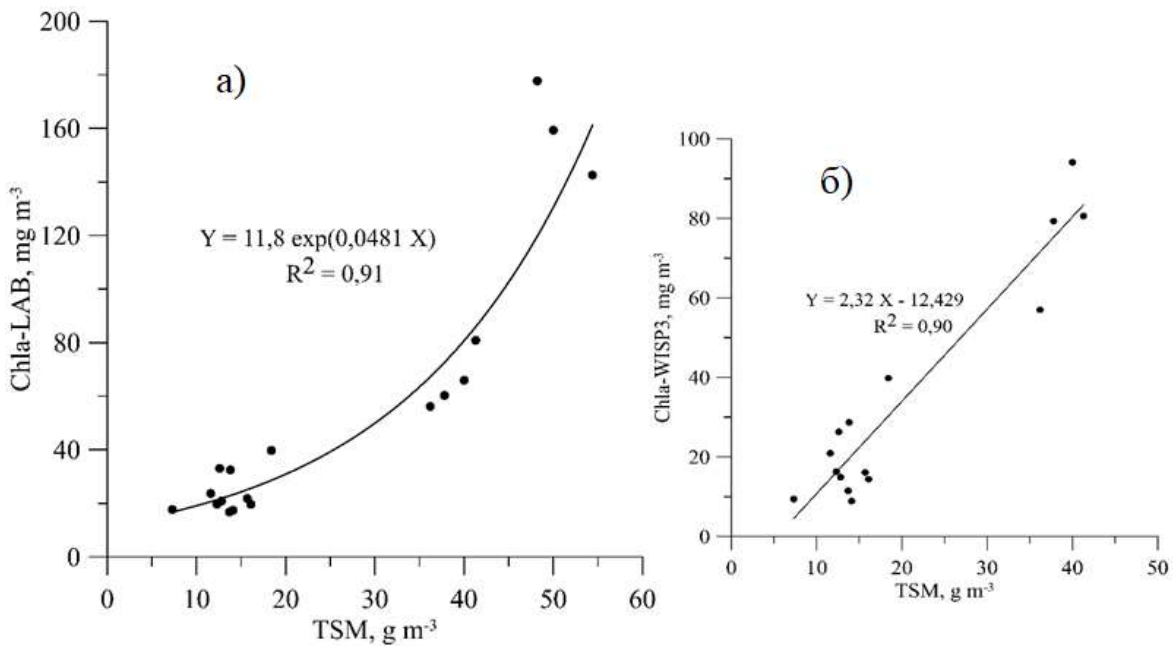


Рис. 5 – Кореляційна залежність між концентраціями загальної зваженої речовини (TSM, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) визначеними в результаті застосування гіперспектрального радіометру WISP-3 та концентраціями хлорофілу-а (в $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) визначеними в лабораторних умовах (Chla-LAB) (а) і виміряними WISP-3 (б)

Fig. 5 – Correlation between concentrations of total suspended matter (TSM, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) determined using the WISP-3 hyperspectral radiometer and chlorophyll-a concentrations (in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) determined in laboratory conditions (Chla-LAB) (a) and measured WISP-3 (б)

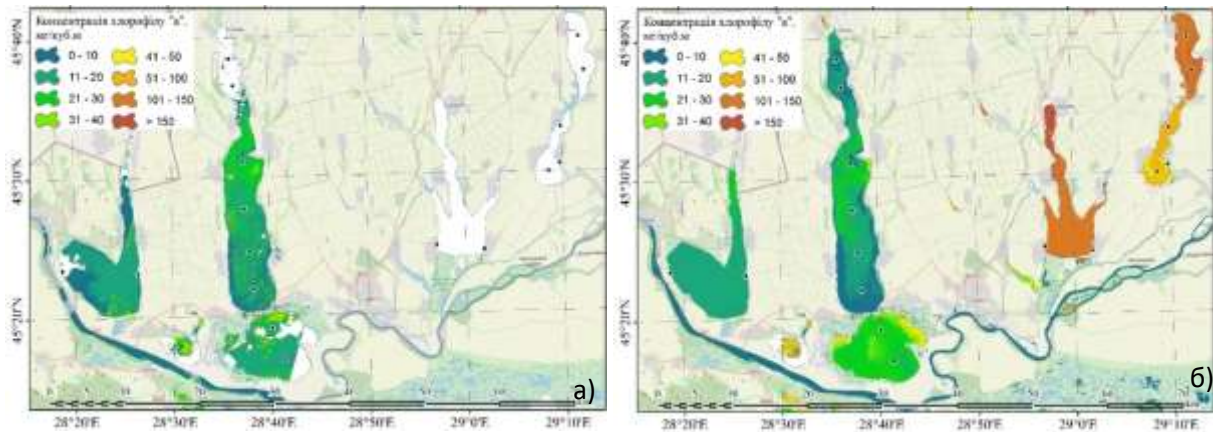


Рис. 6 – Концентрації хлорофілу-а (в $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) визначені із застосуванням розрахункового процесора C2RCC (SNAP) за знімками SENTINEL-2 від 19.07.2023 р. (а) та 21.07.2023 р. (б)

Fig. 6 – Chlorophyll-a concentrations (in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) were determined using the C2RCC calculation processor (SNAP) based on SENTINEL-2 images from 07.19.2023 (a) and 07.21.2023 (б)

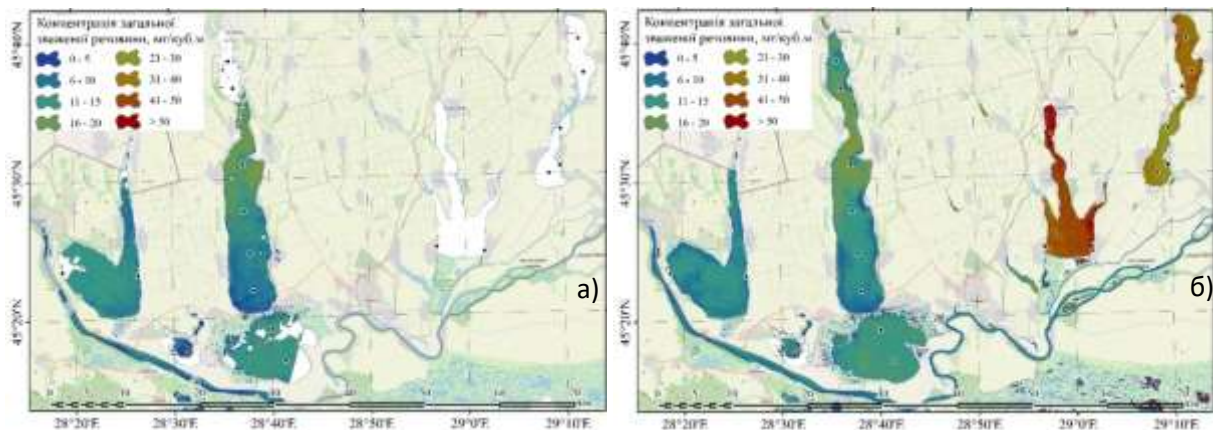


Рис. 7 – Концентрації загальної зваженої речовини (TSM), в $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, визначені із застосуванням розрахункового процесора C2RCC (SNAP) за знімками SENTINEL-2 від 19.07.2023 р. (а) та 21.07.2023 р. (б)

Fig. 7 – Concentrations of total suspended matter (TSM), in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, determined using the C2RCC calculation processor (SNAP) based on SENTINEL-2 images from 07.19.2023 (a) and 07.21.2023 (б)

льною концентрацією зважених речовин має нелінійний експоненціальний характер. Для значень хлорофілу-а визначених із використанням WISP-3 з човна в озерах Ялпуг-Кугурлуй, Китай зв'язок з TSM лінійний.

Одна з головних задач роботи полягала в оцінці можливості використання супутникових знімків SENTINEL 2 MSI для отримання оперативної інформації щодо просторово-часової мінливості таких показників якості вод Придунайських озер як концентрації хлорофілу-а та загальної зваженої речовини. На рис. 6, 7 показані оброблені супутникові знімки з концентраціями хлорофілу-а і TSM за інформацією, отриманою при прольоті супутників 19.07 та 21.07.2023 р.

Кореляційні зв'язки між значеннями хлорофілу-а, визначеними в результаті польових досліджень на озерах Ялпуг, Кугурлуй, Китай і розрахованими за супутниковим знімком від 21.07.2023 року, показані на рис. 8. Вид зв'язку між значеннями концентрацій хлорофілу-а визначеними лабораторно і розрахованими за супутниковим знімком більш близький до ступеневої функції, а між значеннями вимірними із застосуванням WISP-3 і визначеними із супутникового знімку – має лінійний характер. При цьому слід враховувати, що дані щодо концентрації хлорофілу-а визначених лабораторно, які брались для порівняння зі значеннями визначеними із супутникового знімку, було більше (13) ніж вимірю-

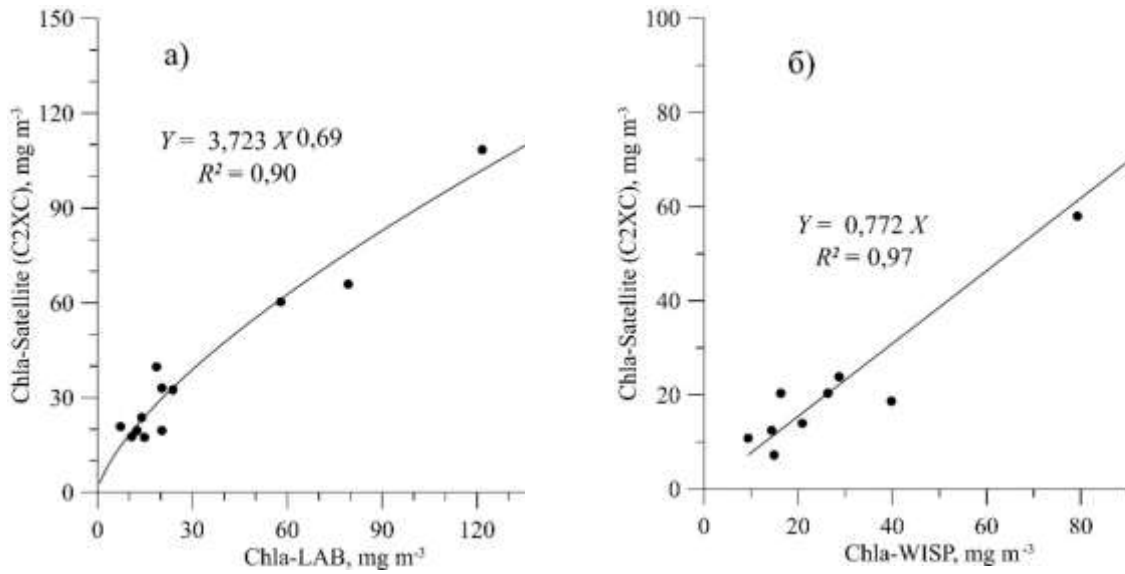


Рис. 8 – Кореляційна залежність між концентраціями хлорофілу-а (в мг·м⁻³) визначеними в лабораторних умовах (Chla-LAB) (а) і вимірними із застосуванням гіперспектрального радіометру WISP-3 (б) 19-20.07.2023 р. зі значеннями визначеними в пунктах спостережень із супутникового знімку (Chla-Satellite) зробленого 21.07.2023 р.

Fig. 8 – Correlation between the concentrations of chlorophyll-a (in mg·m⁻³) determined in laboratory conditions (Chla-LAB) (a) and measured using the WISP-3 hyperspectral radiometer (б) on July 19-20, 2023 with the values determined in observation points from the satellite image (Chla-Satellite) taken on 07.21.2023

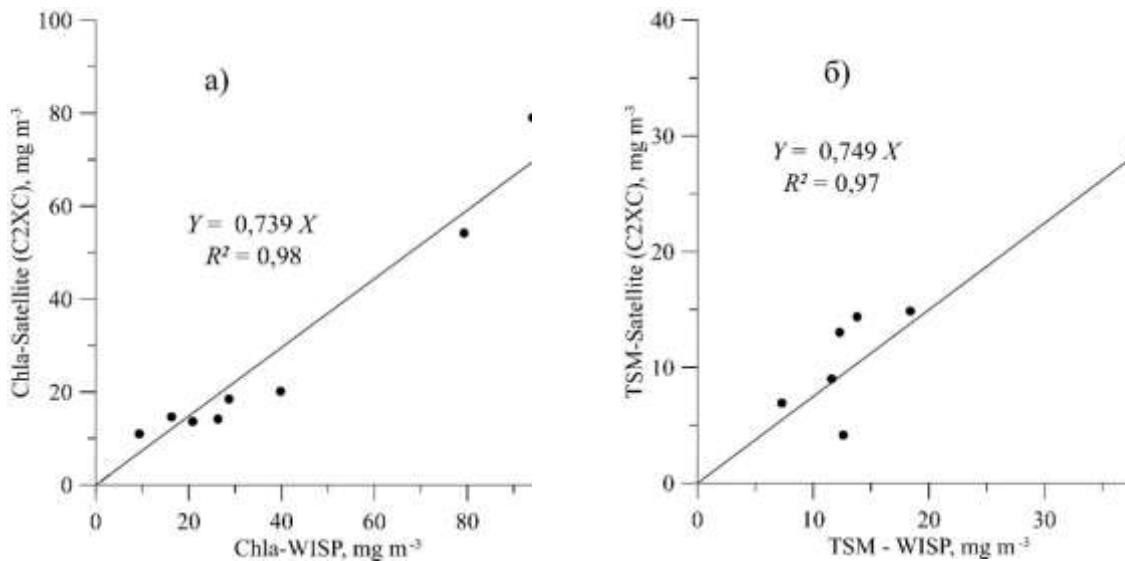


Рис. 9 – Кореляційна залежність між концентраціями хлорофілу-а, в мг·м⁻³, (а) і загальної зваженої речовини TSM, мг·м⁻³, (б) визначеними в результаті застосування гіперспектрального радіометру WISP-3 і значеннями визначеними із найближчих за часом супутникових знімків (відповідно, Chla-Satellite і TSM-Satellite)

Fig. 9 – Correlation between the concentrations of chlorophyll-a, in mg·m⁻³, (a) and total suspended matter TSM, mg·m⁻³, (б) determined as a result of using the WISP-3 hyperspectral radiometer and the values determined from the nearest satellite images (respectively, Chla-Satellite and TSM-Satellite)

вань із використанням WISP-3 (10) і вони охоплювали більший діапазон. Зауважимо, що порівняння значень концентрації хлорофілу-а вимірних з човна із застосуванням WISP-3 і розрахованих за наявними супутниковими

знімками в найближчі дні, коли проводились виміри (тобто 19.07 для озер Ялпуг-Кугурлуй і 21.07 для озера Китай), дало сходні результати рис. 9а.

На відміну від хлорофілу-а, прийнятну для подальшого аналізу лінійну кореляційну залежність між значеннями TSM визначеними із використанням WISP-3 і розрахованими за

супутниковими знімками, вдалось отримати лише у разі використання знімків за дні найближчі до часу проведення вимірів (рис. 9 б).

Висновки

В результаті досліджень, проведених у липні 2023 року на Придунайських озерах встановлено, що для моніторингу їх екологічного стану, зокрема оперативної оцінки просторово-часової мінливості таких показників якості вод як концентрації хлорофілу-а, загальної зваженої речовини, ступеня прозорості вод, можуть бути успішно використані оброблені із застосуванням процесора C2X-COMPLEX супутникові знімки SENTINEL-2 MSI з просторовою роздільною здатністю 20-60 м на піксель.

Встановлена наявність достатньо тісного кореляційного зв'язку (коефіцієнт детермінації 0,9 і вище) між вимірними і визначеними із супутникових знімків значеннями концентрації хлорофілу-а та загальної зваженої органічної речовини (TSM). Тіснота кореляційного зв'язку значно підвищується у разі застосування даних супутникових знімків і результатів спостережень виконаних в один день – день проходження супутника над водоймою.

Результати спостережень за показниками якості води, отримані за допомогою гіперспектрального радіометру WISP-3, добре уз-

годжуються між собою (хлорофіл-а – TSM), а також з даними лабораторного аналізу концентрації хлорофілу-а, вимірів прозорості води. Отже радіометр WISP-3 може бути використаний для експрес визначення показників якості води на Придунайських озерах при організації екологічного моніторингу із залученням супутникової інформації, зокрема, з метою її верифікації за даними польових спостережень.

За даними досліджень виконаних у липні 2023 року встановлено, що концентрації хлорофілу-а у 2023 році були вищими ніж на початку XXI століття (у 2001 р.) у всіх озерах. Це є очікуваним наслідком поповнення озер великими об'ємами дунайської води в першому півріччі 2023 року після посушливих попередніх років. Найбільше збільшення концентрації (в 9 разів) відбулося у озері Котлабух.

Задача подальших досліджень полягає у накопиченні масивів узгоджених даних, отриманих з оброблених супутникових знімків та за даними спостережень, для підтвердження та корегування отриманих калібрувальних залежностей і використання їх у практиці реалізації оперативного моніторингу.

Подяки

Це дослідження отримало підтримку від Research England, on behalf of UK Research and Innovation (UKRI) [Project #11147]' (This work was supported by the Research England, on behalf of UK Research and Innovation (UKRI) [Project #11147]).

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Медведєва Ю. С., Гопченко Є. Д., Шакірзанова Ж.Р. Водний і сольовий режими озера Китай: монографія. Одеса: Одеський державний екологічний університет, «ТЕС», 2018. 136 с.
2. Шакірзанова Ж. Р., Романова Є. О. Водний і сольовий режими озера Катлабух: монографія. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2021. 336 с.
3. Тучковенко Ю.С., Аль-Субари Али Ахмед Салех. Моделирование эвтрофикации озер Ялпуг-Кугурлуй. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2010. Вип. 9. С. 159-172.
4. Иванов В. А., Гопченко Е. Д., Тучковенко Ю. С., Сербов Н. Г., Бузиян Г. Д. Управление качеством вод Причерноморских лиманов и Придунайских озер путем регулирования водного баланса. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2006. Вип. 14. С. 93-106.
5. Ковальчук Л.Й., Мокієнко А.В. Гігієнічна оцінка евтрофікації поверхневих водойм Українського Придунав'я. *Актуальні проблеми сучасної медицини*. 2014. Вип. 14(4). С. 73-78
6. Ковалева Н. В., Мединец В. И. Исследование фотосинтетической активности фитопланктона в Придунайских озерах в 2001-2002 гг. *Вісник ОНУ*. 2002. Том 7, Вип 2. С. 63-69.

7. Джуртубаев М. М., Урбанская Т. В., Джуртубаев Ю.М. Многолетняя динамика гидрологических и гидрохимических показателей озера Китай (Одесская область, Украина). *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*. 2016. Вип. 24(2). С. 384-391. DOI: <https://doi.org/10.15421/011651>
8. Agnoli, L., Urquhart, E., Georgantzis, N., Schaeffer, B., Simmons, R., Hoque, B., Neely, M. B., Neil, C., Oliver, J., Tyler, A. (2023). Perspectives on user engagement of satellite Earth observation for water quality management. *Technological Forecasting and Social Change*, 189, 122357. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122357>
9. Kumar, M., Khamis, K., Stevens, R., Hannah, D.M., Bradley, C. (2024). In-situ optical water quality monitoring sensors—applications, challenges, and future opportunities. *Frontiers in Water*, 1380133. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1380133>
10. Jiang, D., Matsushita, B., Pahlevan, N., Gurlin, D., Fichot, C.G., Harringmeyer, J., Sent G., Brito, A.C., Brotas V., Werther M., Mascarenhas, V., Blake, M., Hunter P., Tyler, A., Spyrakos, E. (2023). Estimating the concentration of total suspended solids in inland and coastal waters from Sentinel-2 MSI: A semi-analytical approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 204, 362–377. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.09.020>
11. Liu, D., Spyrakos, E., Tyler, A., Shi, K., Duan, H. (2024). Satellite algorithms for retrieving dissolved organic carbon concentrations in Chinese lakes. *Science of the Total Environment*, 955, 177117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177117>
12. Wang, S., Jiang, X., Spyrakos, E., Li, J., McGlinchey, C., Constantinescu, A.M., Tyler, A.N. (2024). Water color from Sentinel-2 MSI data for monitoring large rivers: Yangtze and Danube. *Geo-Spatial Information Science*, 27(3), 854–869. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2258950>
13. Jiang, D., Scholze, J., Liu, X., Simis, S.G.H., Stelzer, K., Müller, D., Hunter, P., Tyler, A., Spyrakos, E. (2023). A data-driven approach to flag land-affected signals in satellite derived water quality from small lakes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103188. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103188>
14. Monitoring water resources from space. *University of Stirling. Earth Observation Research Group. UK Lakes Observatory*. URL: <https://eo4ukwater.stir.ac.uk/> (дата звернення: 17.09.2024)
15. Pahlevan N., Mangin A., Balasubramanian S.V., Smith B., Alikas K., Arai K., Barbosa C., Belanger S., Binding C., Bresciani M., Giardino C., Gurlin D., Fan Y., Harmel T., Hunter P., Ishikaza J., Kratzer S., Lehmann M.K., Ligi M., Ma R., Martin-Lauzer F.-R., Olmanson L., Oppelt N., Pan Y., Peters S., Reynaud N., de Carvalho L.A.S., Simis S., Spyrakos E., Steinmetz F., Stelzer K., Sterckx S., Tormos T., Tyler A., Vanhellemont Q., & Warren M. ACIX-Aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol.258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366>
16. Neil C., Spyrakos E., Hunter P.D., & Tyler, A.N. A global approach for chlorophyll-a retrieval across optically complex inland waters based on optical water types. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 229(6). P. 159-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.027>
17. Jiang D., Matsushita B., Pahlevan N., Gurlin D., Lehmann M. K., Fichot C. G., ... & O'Donnell D. Remotely estimating total suspended solids concentration in clear to extremely turbid waters using a novel semi-analytical method. *Remote sensing of environment*. 2021. Vol. 258(11-12), 112386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112386>
18. Ovcharuk, V., Tyler, A., Tuchkovenko, Y., Khokhlov, V., Jiang, D., Spyrakos, E., Martyniuk M., Hoptsi, M. (2023). Estimation of chlorophyll in Danube Lakes in Ukraine using observations from Copernicus Sentinel-2 MSI. *Poster presentation of the Fifth Space for Hydrology Workshop, Hydrospace 2023, Lisbon, Portugal, 27 November - 1 December 2023*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31265.99687>
19. WISP-3 portable water quality spectrometer. *Water Insight*. URL: <https://www.waterinsight.nl/info/wisp-3> (дата звернення: 15.07.2023)
20. How to use the WISP-3 Hyperspectral Spectrometer for water quality measurement. *Water Insight*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FEPqcfQRkoE> (дата звернення: 15.07.2023)
21. ДСТУ ISO 10260:2007 Якість води. Вимірювання біохімічних параметрів. Спектрометричний метод визначення концентрації хлорофілу-а (ISO 10260:1992, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=29451
22. Schiller H., Doerffer R. Neural network for emulation of an inverse model operational derivation of Case II water properties from MERIS data. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. Vol. 20, No 9, 1735-1746. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311699212443>
23. Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters. *Living Planet Symposium, Proceedings of the conference held 9-13 May 2016 in Prague, Czech Republic*. Edited by L. Ouwehand. ESA-SP. 2016. Vol. 740. p.54.
24. Soriano-González J., Urrego E.P., Sòria-Perpinyà X., Angelats E., Alcaraz C., Delegido J., Ruíz Verdú A., Tenjo C., Vicente E., Moreno J. Towards the Combination of C2RCC Processors for Improving Water Quality Retrieval in Inland and Coastal Areas. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14(5), 1124. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14051124>
25. Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / Гриценко А. В., Васенко О. Г., Верніченко Г. А. та ін. Харків: УкрНДЦЕП, 2012. 37 с.

Стаття надійшла до редакції 29.09.2024

Стаття рекомендована до друку 17.11.2024

Yu. S., TUCHKOVENKO, DSc (Geography),

Head of the Department of Oceanology and Marine Nature Management

e-mail: tuch2001@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

Odesa I.I. Mechnikov National University

15, Lvivska str., 65016, Odesa, Ukraine

Institute of marine biology of the NAS of Ukraine

37, Pushkinska St., Odesa, 65048, Ukraine

V. A. OVCHARUK, DSc (Geography),

Head of the Department of Land Hydrology

e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Odesa I.I. Mechnikov National University

15, Lvivska str., 65016, Odesa, Ukraine

M. O. MARTYNIUK, PhD (Earth Science),

Junior Researcher

e-mail: martyniuk0904@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-4907>

Institute of marine biology of the NAS of Ukraine

37, Pushkinska St., Odesa, 65048, Ukraine

Ye. I. GAZYETOV

Senior Researcher

e-mail: gazetov@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5362-1973>

Odesa I.I. Mechnikov National University

15, Lvivska str., 65016, Odesa, Ukraine

O. V. ZOTOVA

Researcher

e-mail: galajkoola@ukr.net

Ukrainian Scientific Center of Ecology of the Sea

89, Frantsuzsky Blvd., Odesa, 65009, Ukraine

V. M. KHOKHLOV, DSc (Geography),

Prof. of the Department of Meteorology and Climatology

e-mail: valeriy.khokhlov@stir.ac.uk ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Odesa I.I. Mechnikov National University

Lvivska str., 15, 65016, Odesa, Ukraine

University of Stirling

Stirling, FK9 4LA, Scotland, United Kingdom

D. JIANG

Research Fellow

e-mail: dalin.jiang@stir.ac.uk ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5676-5860>

University of Stirling

Stirling, FK9 4LA, Scotland, United Kingdom

A. N. TYLER

Scotland Hydro Nation Chair

e-mail: a.n.tyler@stir.ac.uk ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0604-5827>

University of Stirling

Stirling, FK9 4LA, Scotland, United Kingdom

MODERN APPROACHES TO MONITORING THE ECOLOGICAL CONDITION OF LAKE ECOSYSTEM WATERS

Purpose. Presentation of the results of the implementation of new approaches to monitoring indicators of the ecological state of water in lake ecosystems using the example of the Danube lakes with the use of modern express methods of determining individual ecological parameters and satellite information of the water bodies' water bodies.

Methods. Laboratory analysis of determining the concentration of chlorophyll-a according to DSTU 7.1. 4.02-90 "Water. Methodology for spectrophotometric determination of chlorophyll α ", field measurements of water transparency with a standard Secchi disc, concentrations of chlorophyll-a, total suspended matter, spectral attenuation index using a portable hyperspectral radiometer WISP-3.

Results. In the summer of 2023, 2 expeditions were carried out to the Danube lakes Kahul, Yalpug-Kugurlui, Kytai, Kotlabukh. It was established that the results of observations of water quality indicators (chlorophyll-a concentration, total suspended matter, spectral light attenuation index), obtained with the WISP-3 hyperspectral radiometer, are in good agreement with each other and with the data of laboratory analysis of the measurement of chlorophyll-a concentration and water transparency. The possibility of using SENTINEL 2 MSI satellite images, processed using the C2X-COMPLEX Sentinel Application Platform (SNAP 9.0.0) to obtain operational information on the spatio-temporal variability of chlorophyll-a and the total suspended matter concentration in the Danube lakes was evaluated. It was established that there is a sufficiently good correlation (determination coefficient 0.9 and higher) between the measured and determined values of these indicators from satellite images. According to research in July 2023, it was established that the concentrations of chlorophyll-a in 2023 were higher than at the beginning of the 21st century (in 2001) in all lakes, which is an expected consequence of the replenishment of the lakes from large volumes of Danube water in the first half of 2023 after previous dry years. The greatest increase in concentrations occurred in Lake Kotlabukh.

Conclusions. It has been established that the SENTINEL-2 MSI satellite images processed with the C2X-COMPLEX processor can be successfully used for the ecological state monitoring of the Danube lakes, in particular, the operational assessment of the spatio-temporal variability of such water quality indicators as the concentration of chlorophyll-a, total suspended matter and degree water transparency with a spatial resolution of 20-60 m per pixel. The WISP-3 radiometer can be used for operational determination of water quality indicators in the Danube lakes during the environmental monitoring organization with the involvement of satellite information, in particular for the purpose of its verification based on field observation data.

KEY WORDS: Danube lakes, ecological condition, monitoring, remote, satellite monitoring, calibration

References

1. Medvedieva, Yu. S., Hopchenko, Ye. D., & Shakirzanova, Zh. R. (2018). Water and salt regimes of Lake Kytai. Odesa. (in Ukrainian).
2. Shakirzanova, Zh. R., & Romanova, Ye. O. (2021). Water and salt regimes of Lake Kotlabukh. Odesa (in Ukrainian).
3. Tuchkovenko, Yu. S., & Al-Subary Aly Akhmed Saleh (2010). Modeling of eutrophication of Yalpug-Kugurlui lakes. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, (9), 159-172. (in Russian).
4. Ivanov, V. A., Hopchenko, Ye. D., Tuchkovenko, Yu. S., Serbov, M. G., & Buzyian, H. D. (2006). Water quality management in the Black Sea estuaries and Danube lakes by regulating the water balance. *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, (14), 93-106. (in Russian).
5. Kovalchuk, L. I., & Mokienko, A. V. (2014). Hygienic assessment of eutrophication of surface water basins of Ukrainian Danube Region. *Actual problems of modern medicine*, 14(4), 73-78. (in Ukrainian).
6. Kovaleva, N. V., & Medynets, V. I. (2002). Study of photosynthetic activity of phytoplankton in Danube lakes in 2001-2002. *Odesa National University Herald*, 7(2), 63-69. (in Russian).
7. Dzhurtubaev, M. M., Urbanskaya, T. V., Dzhurtubaev, Y. M. (2016). Long-term dynamics of hydrological and hydro-chemical indicators of Kytai Lake (Odessa region, Ukraine). *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, Ecology*, 24(2), 384-391. (in Russian). <https://doi.org/10.15421/011651>
8. Agnoli, L., Urquhart, E., Georgantzis, N., Schaeffer, B., Simmons, R., Hoque, B., Neely, M. B., Neil, C., Oliver, J., Tyler, A. (2023). Perspectives on user engagement of satellite Earth observation for water quality management. *Technological Forecasting and Social Change*, 189, 122357. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122357>
9. Kumar, M., Khamis, K., Stevens, R., Hannah, D.M., Bradley, C. (2024). In-situ optical water quality monitoring sensors—applications, challenges, and future opportunities. *Frontiers in Water*, 1380133. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1380133>
10. Jiang, D., Matsushita, B., Pahlevan, N., Gurlin, D., Fichot, C.G., Harringmeyer, J., Sent G., Brito, A.C., Brotas V., Werther M., Mascarenhas, V., Blake, M., Hunter P., Tyler, A., Spyrakos, E. (2023). Estimating the concentration of total suspended solids in inland and coastal waters from Sentinel-2 MSI: A semi-analytical approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 204, 362–377. <https://doi.org/10.1016/j.isprs.2023.09.020>
11. Liu, D., Spyrakos, E., Tyler, A., Shi, K., Duan, H. (2024). Satellite algorithms for retrieving dissolved organic carbon concentrations in Chinese lakes. *Science of the Total Environment*, 955, 177117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177117>
12. Wang, S., Jiang, X., Spyrakos, E., Li, J., McGlinchey, C., Constantinescu, A.M., Tyler, A.N. (2024). Water color from Sentinel-2 MSI data for monitoring large rivers: Yangtze and Danube. *Geo-Spatial Information Science*, 27(3), 854–869. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2258950>

13. Jiang, D., Scholze, J., Liu, X., Simis, S.G.H., Stelzer, K., Müller, D., Hunter, P., Tyler, A., Spyrakos, E. (2023). A data-driven approach to flag land-affected signals in satellite derived water quality from small lakes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103188. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103188>
14. University of Stirling. Earth Observation Research Group. UK Lakes Observatory. Monitoring water resources from space. Retrieved September 17, 2024 from: <https://eo4ukwater.stir.ac.uk/>
15. Pahlevan, N., Mangin, A., Balasubramanian, S.V., Smith, B., Alikas, K., Arai, K., Barbosa, C., Belanger, S., Binding, C., Bresciani, M., Giardino, C., Gurlin, D., Fan, Y., Harmel, T., Hunter, P., Ishikaza, J., Kratzer, S., Lehmann, M.K., Ligi, M., Ma, R., Martin-Lauzer, F.-R., Olmanson, L., Oppelt, N., Pan, Y., Peters, S., Reynaud, N., de Carvalho, L.A.S., Simis, S., Spyrakos, E., Steinmetz, F., Stelzer, K., Sterckx, S., Tormos, T., Tyler, A., Vanhellemont, Q., & Warren, M. (2021). ACIX-Aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366>
16. Neil, C., Spyrakos, E., Hunter, P.D., & Tyler, A.N. (2019). A global approach for chlorophyll-a retrieval across optically complex inland waters based on optical water types. *Remote Sensing of Environment*, (229), 159-178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.027>
17. Jiang, D., Matsushita, B., Pahlevan, N., Gurlin, D., Lehmann, M. K., Fichot, C. G., ... & O'Donnell, D. (2021). Remotely estimating total suspended solids concentration in clear to extremely turbid waters using a novel semi-analytical method. *Remote sensing of environment*, (258), 112386. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112386>
18. Ovcharuk, V., Tyler, A., Tuchkovenko, Y., Khokhlov, V., Jiang, D., Spyrakos, E., Martyniuk M., Hoptsi, M. (2023). Estimation of chlorophyll in Danube Lakes in Ukraine using observations from Copernicus Sentinel-2 MSI. *Poster presentation of the Fifth Space for Hydrology Workshop, Hydrospace 2023, Lisbon, Portugal, 27 November - 1 December 2023.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31265.99687>
19. Water Insight. WISP-3 portable water quality spectrometer. Retrieved July 15, 2023 from: <https://www.waterinsight.nl/info/wisp-3>
20. Water Insight. How to use the WISP-3 Hyperspectral Spectrometer for water quality measurement. Retrieved July 15, 2023 from: <https://www.youtube.com/watch?v=FEPqcFQRkoE>
21. ISO 10260:1992 Water Quality. Measurement of Biochemical Parameters. Spectrometric determination of the chlorophyll-a concentration. (in Ukrainian).
22. Schiller, H., Doerffer, R. (1999). Neural network for emulation of an inverse model operational derivation of Case II water properties from MERIS data. *International Journal of Remote Sensing*, (20:9), 1735-1746. <https://doi.org/10.1080/014311699212443>
23. Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Kerstin, S., Embacher, S., & Ruescas, A. (2016). Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters. *Living Planet Symposium*, (740), 54.
24. Soriano-González, J., Urrego, E.P., Sòria-Perpinyà, X., Angelats, E., Alcaraz, C., Delegido, J., Ruíz Verdú, A., Tenjo, C., Vicente, E., Moreno, J. (2022). Towards the Combination of C2RCC Processors for Improving Water Quality Retrieval in Inland and Coastal Areas. *Remote Sensing*, (14), 1124. <https://doi.org/10.3390/rs14051124>
25. Hrytsenko, A.V., Vasenko, O.H., Vernichenko H.A. et al. (2012). Methods of ecological assessment of surface water quality by relevant categories. Kharkiv: UkrNDIEP (in Ukrainian)

The article was received by the editors 29.09.2024

The article is recommended for printing 17.11.2024