



УДК 504.064.3(262.5: 1–16)  
DOI 10.47143/1684-1557/2023.1-2.7

## ПРОСТОРОВА ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ХЛОРОФІЛУ «А» УКРАЇНСЬКОГО СЕКТОРУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ

Соколов Є.В. – к.б.н., с.н.с.

ДУ «Інститут морської біології НАН України», sokolovev87@gmail.com

Засобами геоінформаційних систем проведений просторово-статистичний аналіз розподілу концентрації хлорофілу «а», отриманий на основі супутникових спостережень у водах північно-західної частини Чорного моря за літній період з різною водністю років. Розглянута часова динаміка концентрації хлорофілу «а», яка пов'язана з впливом річкового стоку та іншими факторами. На основі баз геоданих міжнародних «онлайн-сервісів» (платформ) («Copernicus Marine Service», «Giovanni – NASA»), «Copernicus climate change») та аналітичних можливостей програмної платформи «ESA SNAP» виявлений взаємозв'язок між концентрацією хлорофілу «а», температурою води, інсоляцією та концентрацією фосфатів як характеристики комплексної динаміки водних екосистем у регіоні. Розраховані просторові аномалії концентрації хлорофілу «а» на основі статистичних меж середніх значень та середньоквадратичних відхилень. Проведено просторове зонування акваторії за ризиком евтрофікації, використовуючи статистичний аналіз, у тому числі в межах національних підрозділів водних тіл, визначених у рамках Водної рамкової директиви та Морської стратегії ЄС. Дослідження включали аналіз спектральних характеристик морської поверхні, зокрема коефіцієнта відбиття світла, на основі супутникових знімків Sentinel 3 (OLCI). За допомогою інструментів біооптичного процесору «Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC)» вивчено взаємозв'язок між концентрацією хлорофілу «а» та відбиттям світла в різних спектральних діапазонах.

Досліджено багаторічний розподіл розчиненого кисню в придонному шарі на основі гідродинамічної моделі «Black Sea Biogeochemistry Analysis and Forecast» міжнародного сервісу «CMEMS» щодо визначення найбільш вразливих ділянок до впливу процесів евтрофікації в умовах вертикального розшарування за щільністю води.

**Ключові слова:** екологічний стан, евтрофікація, північно-західна частина Чорного моря, дані дистанційного зондування, геоінформаційний аналіз.

### Вступ

Антропогенна евтрофікація та пов'язані з цим спалахи «цвітіння» угруповань фітопланктону є поширеним явищем у морських прибережних та шельфових водах північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ), особливо в зоні впливу стоку річок, що призводить до порушення процесів екологічного балансу та екосистемних послуг (Kahru, Savchuk, and Elmgren 2007; Сафранов та ін. 2022).

За природними умовами цей регіон є складним та гетерогенним з точки зору як широтної, так і вертикальної структури екофакторів. У результаті великого стоку річок (більше 80% від загального стоку, що впадають у Чорне море (Зайцев 1998) та розчленованої структури донної морфології рельєфу (палеодолин з водороздільними просторами річок) відбувається уповільнення вертикального перемішування водних мас внаслідок розшарування водної товщі за щільністю по глибині. Обширні мілководдя зумовлюють протяжні зони фіталі з інфралітораллю та циркулітораллю (Мінічева, Соколов 2021). Екорегіон також містить численні морські природоохоронні акваторії (Alexandrov, Minicheva, and Zaitsev 2017) та визначені екологічно і біологічно значущі райони (EBSA) (Report ... 2017). Водночас різнобічний соціально-економічний потенціал прибережної

та шельфової частин регіону визначає потужне навантаження на його регулюючі екосистемні послуги (Сафранов та ін. 2022). Масштаби біогенного навантаження та пов'язаний з ним рівень евтрофікації морських екосистем ПЗЧМ найбільший порівняно з іншими регіонами Чорного моря (Bakan, and Büyükgüngör 2000).

У таких умовах масовий розвиток фітопланктону, підсилений антропогенним впливом з кліматичними змінами, не тільки викликає синтез токсинів, які негативно впливають на якість морського середовища (O'Neil et al. 2012), але і призводить до зменшення фотичної зони та рівня розчиненого у воді кисню, зміни окислювально-відновних умов з виникненням процесів вторинної евтрофікації (Vahtera et al. 2007).

Оцінка концентрації хлорофілу «а», як рівня евтрофікації, визначено Рамковою директивою про морську стратегію одним з індикаторів Дескриптора 5 «Евтрофікація» (Directive 2008/56/ЄС 2008).

Сучасні спостереження за станом довкілля включають моделювання розподілу гідроекологічних характеристик на основі супутникових даних, які вимірюють спектральну природу – колір води. Використання націлених на проведення атмосферної корекції оптичних процесорів дає змогу дис-

танційно визначати власні оптичні властивості морської води, три основні оптично значущі концентрації: пігменти фітопланктону, загальну кількість зважених речовин, жовту речовину (Brockmann et al. 2016). Моніторинг концентрації хлорофілу «а», включаючи вимірювання методом «In Situ», в регіоні здійснюється у співробітництві з Українським науковим центром екології моря (Забруднення ... 2023) в рамках об'єднаних міжнародних проєктів Чорноморської комісії BSIMAP (O'Neil et al. 2012), у проєкті інтегрованого моніторингу Чорного моря (MISIS) (Kajiyama, D'Alimonte, and Zibordi 2018), проєкті екологічного моніторингу Чорного моря – EMBLAS, відповідно до Рамкової директиви про морську стратегію (Alexandrov, Minicheva, and Zaitsev 2017).

Перелічені вище особливості регіону та можливості дистанційного моніторингу зумовлюють мету роботи – оцінку просторово-часової динаміки та екофакторного впливу на розподіл концентрації хлорофілу «а» в північно-західній частині Чорного моря за літні періоди різної водності років.

#### Матеріал та методи досліджень

Дослідження у регіоні концентрації хлорофілу «а», визначеної за дистанційними даними, включали у себе комплекс методів та інструментів з отримання відповідних даних та оцінки їх просторово-часової динаміки, а також оптичних характеристик морської води за різної концентрації показника.

Просторові дані концентрації хлорофілу «а» за роки з різною водністю (2010–2021 рр.) були отримані з використанням міжнародних платформ: «Copernicus Marine Service – CMEMS» (Copernicus ... 2023) з набору даних: «Black Sea Ocean Colour Plankton MY L4» (Kajiyama, D'Alimonte, and Zibordi 2018), продуктів обробки Sentinel 3 (OLCI). Водність року визначалась за ранжуванням багаторічних значень обсягів стоку р. Дунай ( $W$ ,  $\text{км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$ ), оскільки це найбільша європейська річка, на яку припадає 61% загального річкового стоку до Чорного моря (Bakan, and Büyükgüngör 2000; Zaitsev 2008). Середньомісячні значення стоку р. Дунай були отримані за даними спостережень Дунайської Гідрометеорологічної обсерваторії. Водність року за стоком р. Дунай на основі ранжування значень даних була поділена на три групи: багатоводна ( $211\text{--}300 \text{ км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$ ), середньоводна ( $190\text{--}210 \text{ км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$ ), маловодна ( $132\text{--}189 \text{ км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$ ).

Окрім концентрації хлорофілу «а», були побудовані спектральні профілі значень оптичної характеристики – коефіцієнта відбиття морської поверхні (normalized water leaving reflectance – « $\rho_{\text{w}}^{\text{wn}}$ ») у точках з різною концентрацією, за даними супутника Sentinel 3 (OLCI). Отримання даних щодо концентрації хлорофілу «а» із супутникового знімка, а також розрахунок

коефіцієнта відбиття, відбувалися в різних спектральних смугах на основі використання біооптичного процесору «Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC)». Процесор C2RCC є програмним забезпеченням для обробки даних кольору океану з різних супутникових інструментів, наприклад, OLI, MERIS, MODIS, SeaWiFS, MSI і OLCI (Brockmann et al. 2016). Обробка супутникових даних процесором C2RCC виконується набором нейронних мереж, які генеруються для кожного датчика з використанням підмножини смуг цього датчика. Основна нейронна мережа визначає коефіцієнт спектрального відбиття води та концентрації хлорофілу «а» після проведення атмосферної корекції. Точність та репрезентативність визначення дистанційних значень концентрації хлорофілу «а» за допомогою C2RCC була перевірена для українського сектору ПЗЧМ за щільністю кореляційного зв'язку з даними «In Situ» (Vaičiūtė et al. 2024). Використання саме цього процесора зумовлено його адаптованістю до напівзамкнених морів («Case-2» Waters) з високою оптичною складністю (Brockmann et al. 2016).

На основі гідродинамічної моделі «Black Sea Biogeochemistry Analysis and Forecast» (Ciliberti et al. 2021) міжнародного сервісу «CMEMS» був побудований розподіл розчиненого кисню в придонному шарі.

Кореляційний зв'язок між поверхневою температурою води та концентрацією хлорофілу «а» був оцінений на основі результатів аналізу супутникових даних MODIS-aqua та вбудованих інструментів міжнародного сервісу (платформи) «Giovanni – NASA» (2023).

Кореляційний зв'язок між концентрацією хлорофілу «а» та інсоляцією сонячного світла (сумарний потік сонячної радіації) був проведений на основі даних сервісу «CMEMS», з набору геоданих «Black Sea Biogeochemistry Reanalysis» (Grégoire, Vandembulcke, and Capet 2020) та «Copernicus climate change» (Copernicus ... 2023), з набору даних «Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis» (Vanella et al. 2022).

Кореляційний зв'язок між концентрацією хлорофілу «а» та концентрацією фосфатів ( $\text{PO}_4$ ) був проведений на основі геоданих сервісу «CMEMS» з набору даних «Black Sea Biogeochemistry Reanalysis» (Ciliberti et al. 2021).

Оцінка просторово-часової зміни розподілу концентрації хлорофілу «а» проводилась з інтервалом у 4 дні в літній період 2021 року на основі віднімання «крайніх» цифрових растрів концентрації за вказані діапазони дат з використанням інструменту просторової алгебри «Калькулятор растрів» програмного комплексу QGIS.

Визначення аномалій розподілу концентрації хлорофілу «а» на шельфі ПЗЧМ проводилось на основі просторового ранжування стосовно

середнього багаторічного значення (Avg) концентрації хлорофілу «а» за літній період. Пороговим кроком аномалій слугувала величина перевищення середнього значення концентрації на одне, два, три або більше стандартних (середньоквадратичних) відхилень (StDev).

Водні тіла національних морських вод, визначених за підходами Морської Стратегії ЄС (Directive ... 2008), були проранжовані за значеннями концентрації хлорофілу «а».

#### Результати та обговорення

За оцінкою значень просторового багаторічного розподілу концентрації хлорофілу «а» в літній період в акваторіях шельфу ПЗЧМ кількісні значення збільшуються відповідно до обсягів річкового стоку (рис. 1).

Прибережна інфраліторальна зона характеризується перевищенням значень концентрації хлорофілу «а» пелагічної зони на декілька порядків (у 20 разів та більше), що вказує на «імпакт» фактор впливу річкового та агломераційного стоку, які формують гетерогенність розподілу показника. Статистична оцінка «нормальності» розподілу показника в шельфовій та інфраліторальній зонах (табл. 1) характеризується вкрай нерівномірністю та аномальністю.

Стандартне відхилення, як ступінь розсіяння значень стосовно середньої величини шельфу за оцінювальний період, характеризується здебільшого перевищенням у два рази, тобто значеннями коефіцієнта варіації більше 200%. Найбільший «імпакт» фактор гетерогенності за значенням коефіцієнта

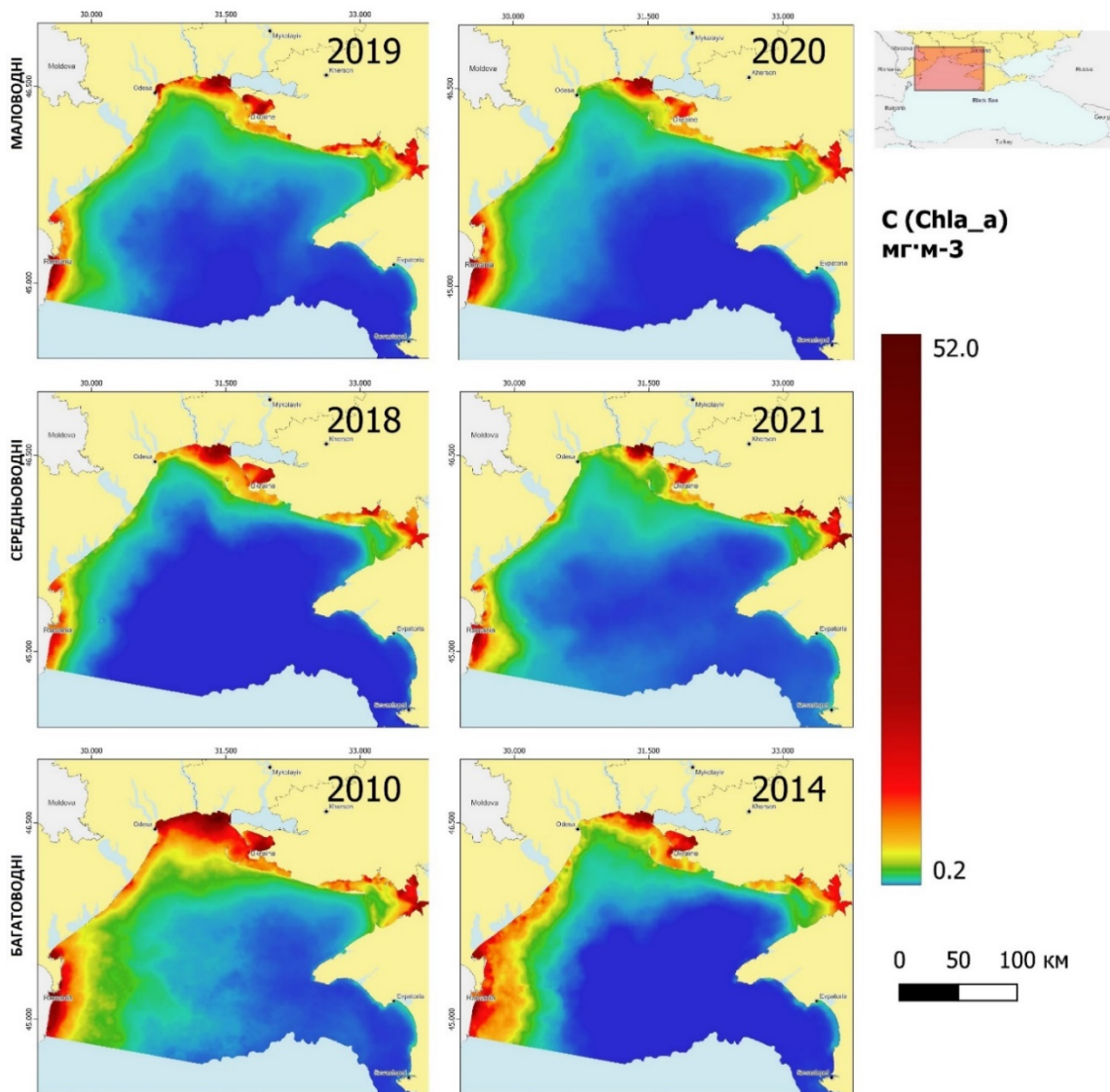


Рис. 1. Середні значення розподілу концентрації хлорофілу «а» в літній період у різні за водністю групи років



Статистичні характеристики розподілу концентрації хлорофілу «а» шельфу ПЗЧМ у літній період за роками різної групи водності (мг·м<sup>-3</sup>)

Рік/ Група водності за стоком р. Дунай	Mean	Median	Stdev	Min	Max	Majority	Cv (%)	
Статистичні характеристики шельфу ПЗЧМ								
2020	Маловодна	1,31	0,49	2,56	0,17	26,91	0,93	195,03
2019	Маловодна	1,50	0,53	2,99	0,20	36,40	1,03	199,48
2018	Середньоводна	1,21	0,29	2,70	0,14	32,81	0,68	222,96
2021	Середньоводна	1,34	0,44	3,09	0,24	50,34	1,01	230,73
2010	Багатоводна	2,56	0,85	4,69	0,26	52,07	2,01	183,07
2014	Багатоводна	1,74	0,43	3,16	0,13	37,63	1,07	181,10
Багаторічні значення		1,61	0,50	3,02	0,22	34,30	0,22	187,64
Статистичні характеристики в інфраліторальній зоні (ізобата – 15 м) ПЗЧМ								
2020	Маловодна	3,95	2,27	4,25	0,21	26,91	0,93	107,58
2019	Маловодна	4,71	2,78	4,99	0,30	36,40	1,03	106,13
2018	Середньоводна	4,25	2,28	4,80	0,25	32,81	0,68	112,85
2021	Середньоводна	4,21	2,05	5,77	0,30	50,34	1,01	137,09
2010	Багатоводна	7,31	4,60	7,93	0,28	52,07	2,01	108,52
2014	Багатоводна	4,86	3,43	4,99	0,22	37,63	1,07	102,50
Багаторічні значення		4,88	4,88	3,15	5,06	34,30	0,27	1,12

**Примітка:** \*Mean – середнє значення; Median – медіана; Stdev – стандартне відхилення; Min – мінімальне значення; Max – максимальне значення; Majority – найбільш поширене значення; Cv – коефіцієнт варіації.

притаманний середньоводній групі років. За співвідношенням середнього значення та медіани розподіл не є нормальним і відображається дуже сильна позитивна асиметрія для всіх років, що свідчить про високі значення середніх концентрації та локальності впливу на екосистему, що також є ознакою просторових аномалій.

Природна специфіка вертикальної структури водної товщі шельфу ПЗЧМ (Bakan, and Büyükgüngör 2000) на тлі «цвітіння» води призводить до розвитку гіпоксійних умов у донних горизонтах, у місцях, де набувають чинності три фактори: від'ємні форми рельєфу, вертикальна термохалинна структура, алохтонний вплив річкового стоку.

У циркуліторальній зоні ПЗЧМ насамперед гіпоксійні явища поширені в Одеському жолобі та палео-долині Дніпра, де на фактор стоку опрісненого з антропогенним впливом евтрофікації накладається геоморфологічний чинник, що перешкоджає вертикальному перемішуванню та спричиняє розшарування за щільністю (зверху «легка» опріснена тепла вода, знизу «важка» – холодна солоня вода) з погіршенням кисневих умов (рис. 2).

Наслідком «цвітіння» води в таких умовах є зміна окислювально-відновних, біогеохімічних процесів бентосного шару, що зумовлюють зміни запасів біогенних сполук, перш за все азоту і фосфору. Наявність гіпоксії спричиняє вихід фосфору з донних відкладів, зміну співвідношення Редфілда Т:Р, появу відновлених форм

металів і сірководню. Таким чином, наслідки «цвітіння» води в результаті алохтонного евтрофування під впливом річкового стоку стають причинами його подальшого посилення (автохтонної, вторинної евтрофікації), утворюючи замкнуте коло, так зване «порочне» коло евтрофікації (Vahtera et al. 2007).

Оцінка взаємозв'язку між концентрацією хлорофілу «а» та поверхневою температурою води встановила фрагментований у просторі тісний зв'язок між цими параметрами. Так, найбільший позитивний прояв є на мілководді та в зонах впливу річкового стоку, найбільш тісний зворотний зв'язок – у пелагічній зоні (рис. 3). За групою водності найбільші значення коефіцієнта детермінації ( $R^2$ ) спостерігалися в маловодний рік, найменші – в багатоводний рік.

Кореляційний зв'язок між концентрацією хлорофілу «а» та інсоляцією сонячного світла (сумарний потік сонячної радіації) притаманний зоні впливу р. Дунай виявився статистично значущий з найбільшою тісністю зв'язку у середньоводну групу років (рис. 4), тоді як загалом для регіону зв'язок розсіяний (рис. 5).

У результаті кореляційного аналізу між концентрацією хлорофілу «а» та концентрацією фосфатів ( $PO_4$ ) у районах найбільшого поширення концентрації фосфатів був отриманий статистично значущий зв'язок з коефіцієнтом детермінації ( $R^2$ ) від 0,43 до 0,77 залежно від водності року. Найбільш щільний

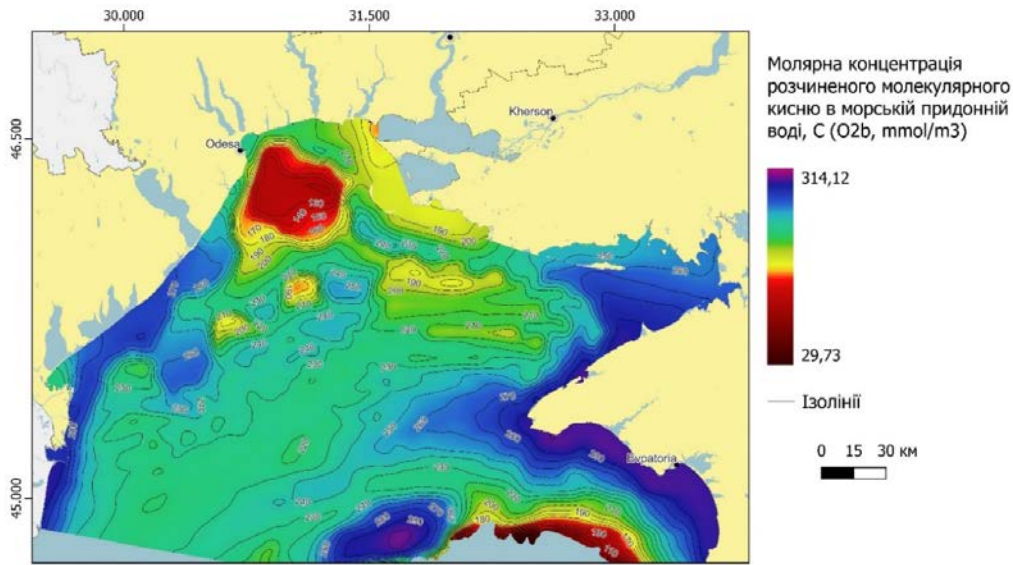


Рис. 2. Багаторічний (2017–2019 рр.) розподіл розчиненого кисню в придонному шарі морської води

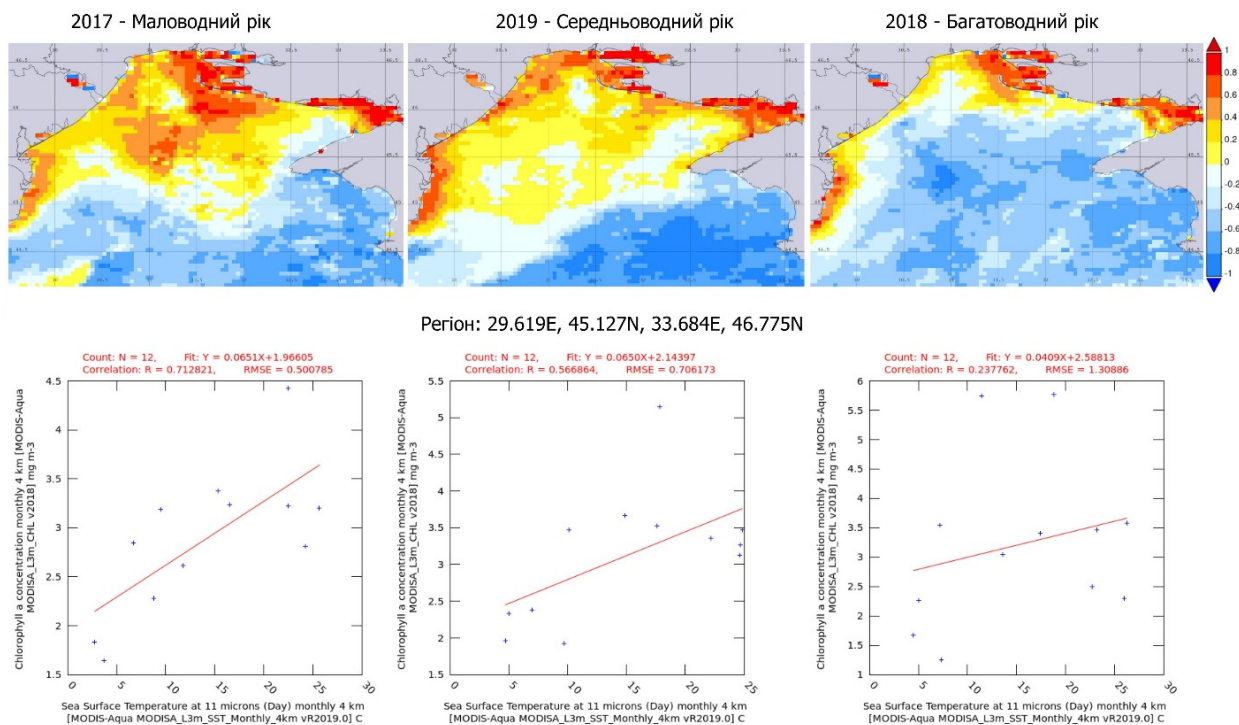


Рис. 3. Багаторічний кореляційний просторовий зв'язок між поверхневою температурою води та концентрацією хлорофілу «а» на основі даних супутника «MODIS-Aqua»: червоний колір – ділянки з найбільш тісним прямим зв'язком; синій колір – ділянки з найбільш тісним зворотним зв'язком

зв'язок – у середньоводні та багатоводні групи років, найменші значення притаманні маловодній групі років (рис. 6).

З метою оцінки чутливості та швидкості динаміки концентрації хлорофілу «а» упродовж місяця, в період кінця травня – початку липня 2021 року,

була отримана просторова добова динаміка концентрації хлорофілу «а» як реакція на погодні та гідрологічні умови. Вона продемонструвала дуже швидку зміну концентрації пігментів, часто протягом одного дня (рис. 7), та розкид статистичних характеристик концентрації хлорофілу «а» (рис. 8).

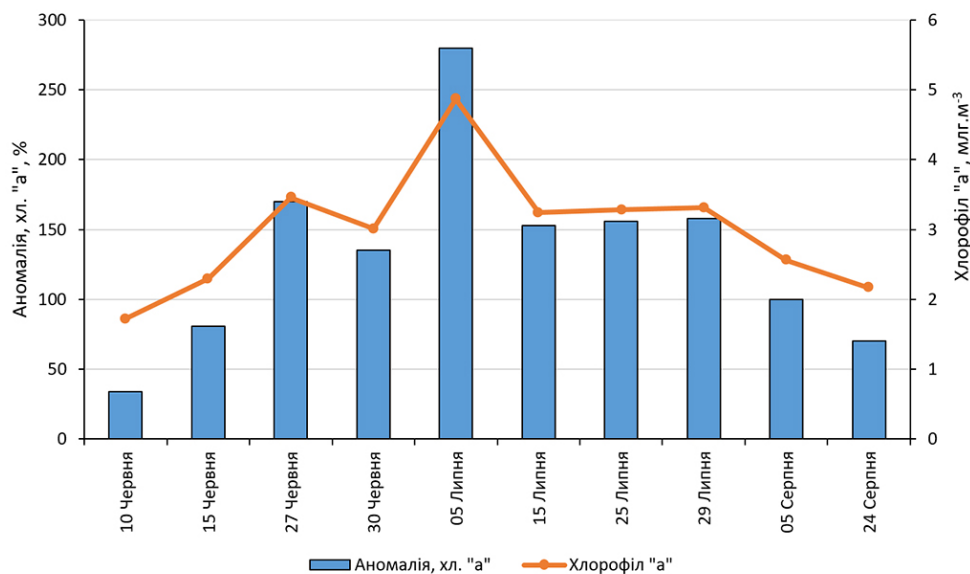


Рис. 4. Багаторічний кореляційний просторовий зв'язок між сонячною інсоляцією та максимальними середньомісячними значеннями концентрації хлорофілу «а» в зоні дії стоку р. Дунай

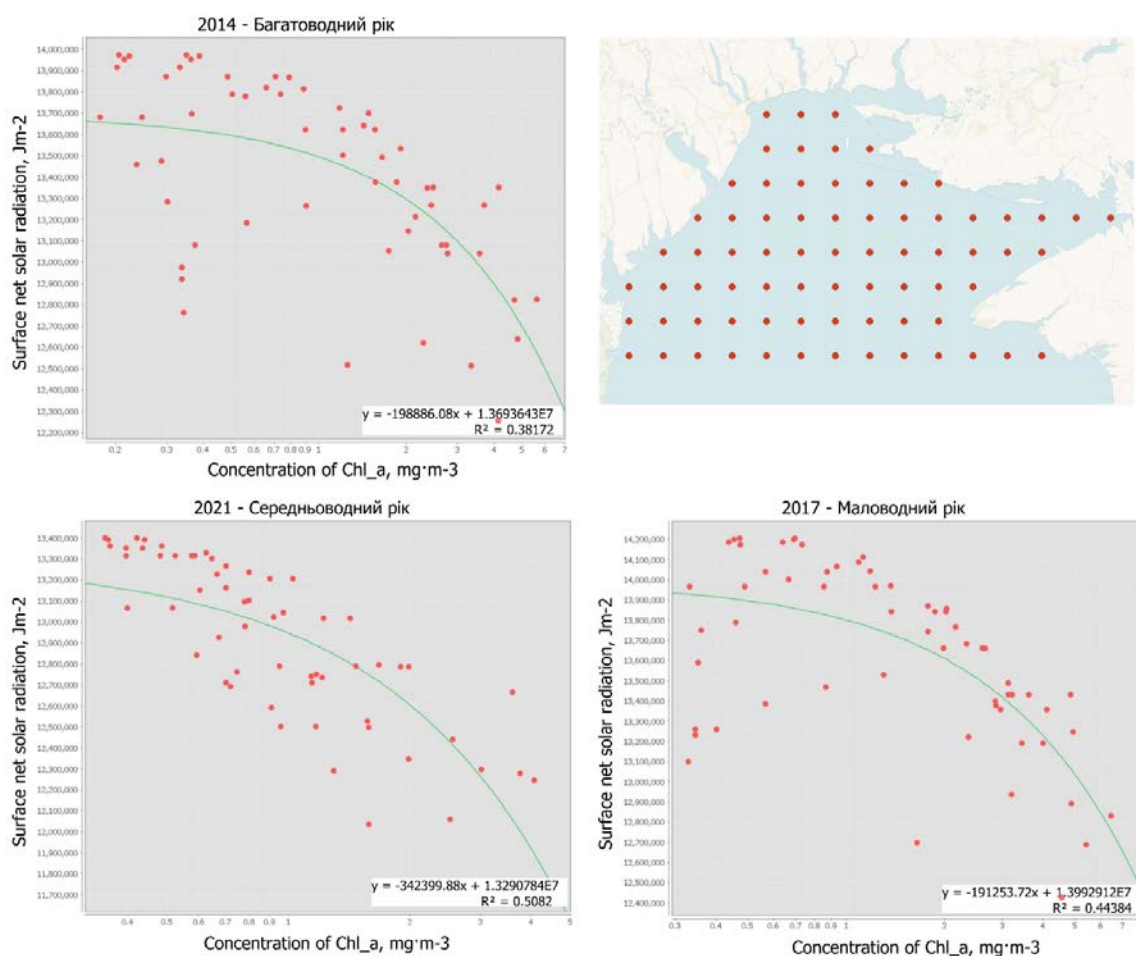


Рис. 5. Багаторічний кореляційний просторовий зв'язок між сонячною інсоляцією та концентрацією хлорофілу «а» на шельфі ПЗЧМ



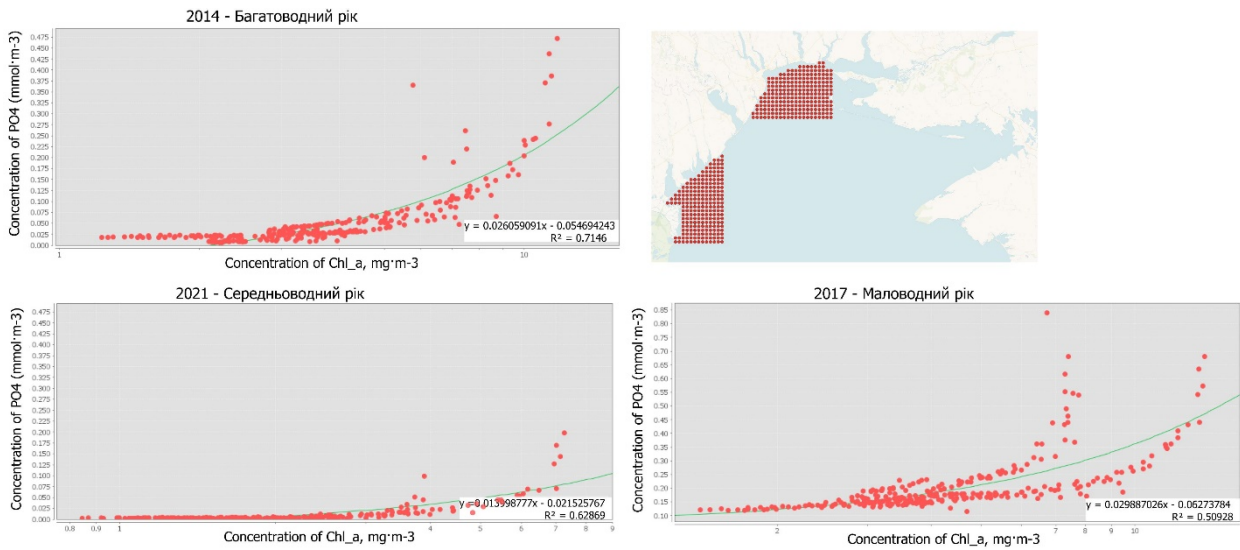


Рис. 6. Багаторічний кореляційний просторовий зв'язок між концентрацією фосфатів та хлорофілу «а» в зонах найбільшого поширення концентрації фосфатів

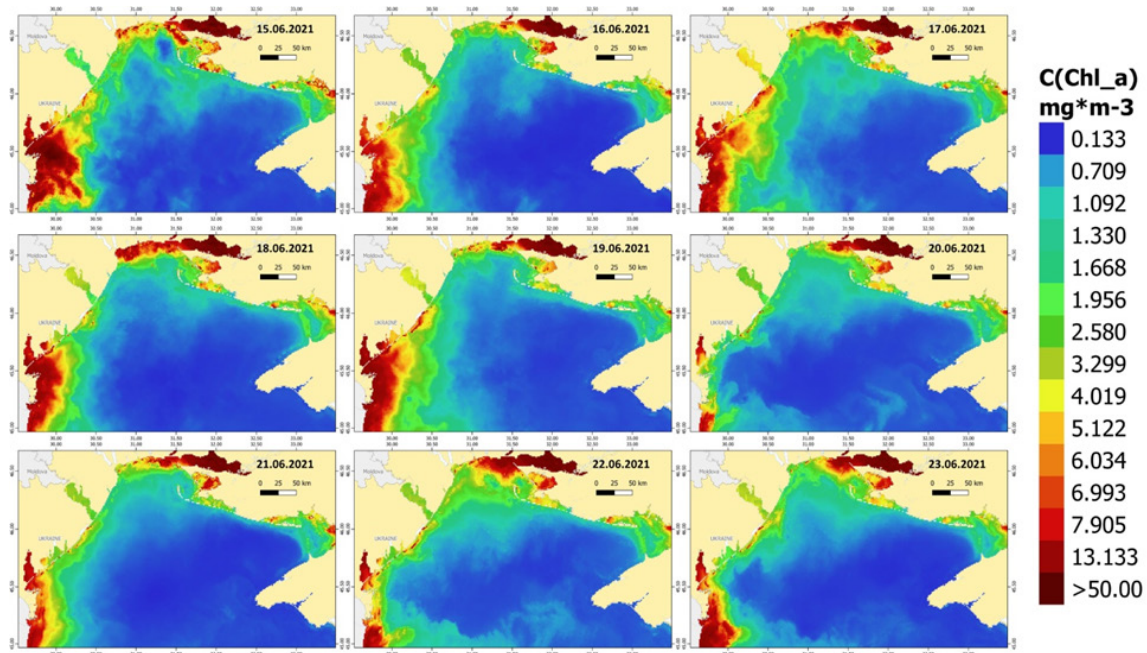


Рис. 7. Розподіл хлорофілу «а» на шельфі ПЗЧМ у червні 2021 року

В усіх випадках стандартне відхилення більше середнього значення, найбільші середні значення концентрації хлорофілу «а» були наприкінці травня, найбільші значення стандартного відхилення – у середині червня. За співвідношенням середнього значення та медіани розподіл не є нормальним і відображає позитивну асиметрію для всіх періодів.

Оцінка зміни просторового розподілу концентрації хлорофілу «а» в межах ПЗЧМ продемонструвало високу динаміку, що змінювалась упродовж декількох днів (рис. 9).

Спектральні профілі значень оптичної характеристики – коефіцієнта відбиття морської поверхні (« $\rho_{\text{rhw}}^{\text{own}}$ ») – в точках з різною концентрацією хлорофілу «а» відображають високу мінливість (рис. 10).

Спектральний аналіз знімка Sentinel 3 (OLCI) показав, що морська вода з низькою концентрацією хлорофілу «а» відбиває світло у фіолетовому, синьому та блакитному діапазонах, а в більш довгих довжинах хвиль спостерігається поглинання водою. Зі збільшенням концентрації хлорофілу «а» відбувається зсув максимальних значень відбиття у сторону більших довжин хвиль. Висока концентрація

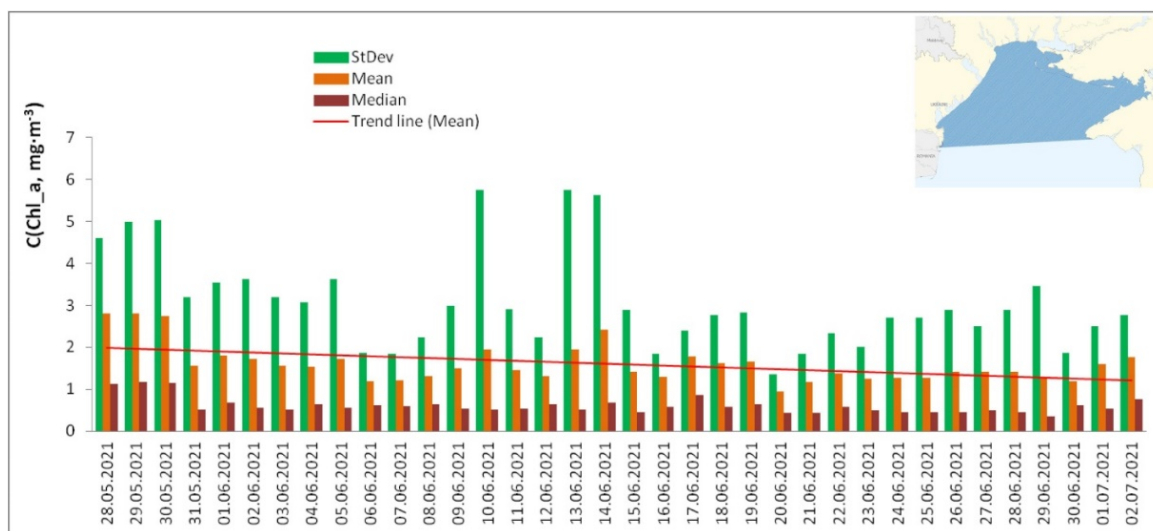


Рис. 8. Динаміка статистичних характеристик розподілу середньодобових концентрацій хлорофілу «а» на шельфі ПЗЧМ у період 28.05.2021 р. – 02.07.2021 р. (\*StDev – стандартне (середнє квадратичне) відхилення, Mean – середнє значення, Median – медіана)

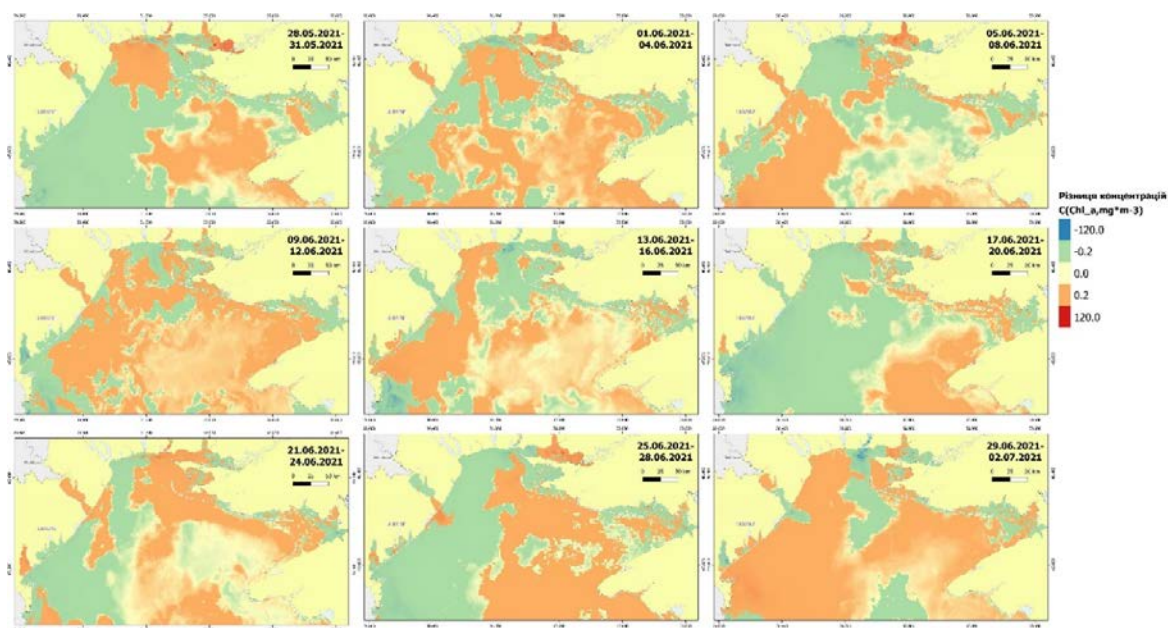


Рис. 9. Просторова зміна концентрації хлорофілу «а» на акваторії ПЗЧМ у період 28.05.2021 р.– 02.07.2021 р.

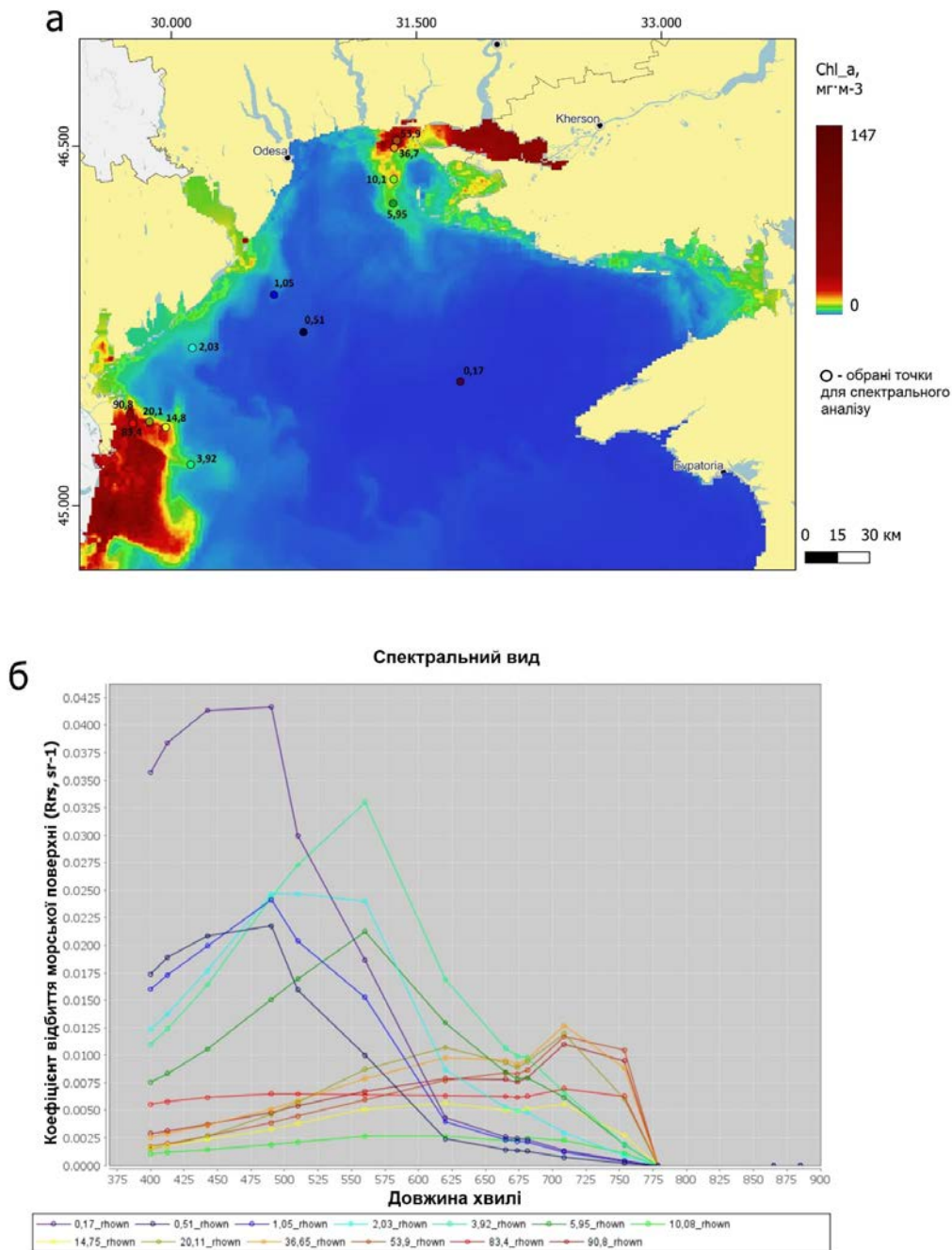
(\*простори зелено-блакитного кольору – зменшення концентрації, жовто-червоні – збільшення концентрації хлорофілу «а»)

хлорофілу «а» характеризується поглинанням у червоному діапазоні та відбиттям у верхньому червоному діапазоні хвиль, що схоже на наземну рослинність.

На основі проведеного вище статистичного аналізу багаторічних значень концентрації хлорофілу «а» в літній період доцільним є просторове зонування районів, які характеризуються найбільшим впливом процесів евтрофікації, «імпакт» факторами та навантаженням на регулюючі екосистемні послуги. Про-

сторове зонування за рівнем інтенсивності «цвітіння» води є необхідним складником щодо розробки стратегій сталого розвитку та прийняття рішень з екологічного менеджменту, для оцінювання причин, наслідків і реакції на зміни в морських екосистемах (Визначення ... 2021; Manea et al. 2019). Крім того, морське планування, відповідно до стратегії «Blue Growth» (Rodríguez-Rodríguez et al. 2012), є складником економічного зростання та соціального добробуту, з одного



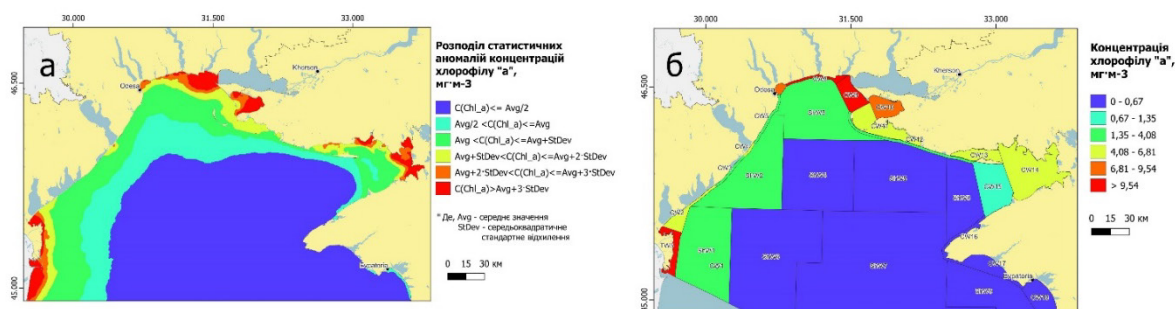


**Рис. 10.** Оптичні властивості концентрації хлорофілу «а» в акваторії ПЗЧМ за 10.06.2021 р.: а – розподіл концентрації хлорофілу «а» з точками вимірів спектральних профілів у різних значеннях концентрації; б – спектральні профілі значень коефіцієнта відбиття морської поверхні відповідно до спектральних діапазонів довжин оптичних хвиль сканеру «OLCI»

боку, і доброго стану морського середовища та його ресурсів, з іншого боку.

Водні тіла з відповідним класифікаційним номером були проранжовані за значеннями статистичних меж концентрації хлорофілу «а». В результаті проведеного статистичного аналізу були визна-

чені регіони, що характеризуються найбільшим ризиком виникнення «цвітіння» води. До аномальних ділянок з перевищенням середнього значення на одне стандартне відхилення потрапили прибережні мілководні затоки та акваторії в районах дії річкових стоків (рис. 11).



**Рис. 11. Просторовий розподіл багаторічних статистичних зон концентрації хлорофілу «а» в літній період: а – статистичних аномалій концентрації хлорофілу «а»; б – ранжування національних водних тіл**

### Висновки

1. Багаторічний розподіл концентрації хлорофілу «а» в ПЗЧМ у літній період характеризується збільшенням відповідно до обсягів стоку р. Дунай. Прибережна інфраліторальна зона характеризується перевищенням значень пелагічної зони на декілька порядків (у 20 разів та більше).

2. Статистична оцінка «нормальності» розподілу концентрації хлорофілу «а» в регіоні характеризується надзвичайно високою нерівномірністю та аномальністю. Стандартне відхилення, як ступінь розкиду значень стосовно середньої величини акваторії шельфу ПЗЧМ, характеризується здебільшого перевищенням у два рази середнього значення. За співвідношенням середнього значення та медіани розподіл не є нормальним і відображається дуже сильна позитивна асиметрія для всіх розглянутих років, що свідчить про високі значення навіть середніх концентрацій та локальності впливу на екосистему і також є ознакою просторових аномалій.

3. Внаслідок інтенсивного «цвітіння» води гіпоксійні явища в циркуліторальній зоні ПЗЧМ насамперед поширені в Одеському жолобі та палео-долині Дніпра, де на фактор опрісненого стоку з антропогенним впливом евтрофікації накладається геоморфологічний чинник (велика депресія з плоским та пологопохилим дном), що перешкоджає вертикальному перемішуванню та спричиняє відповідне розшарування водної товщі за щільністю. Таким чином, наслідки «цвітіння» води в результаті евтрофування під впливом річкового стоку та геоморфологічного чинника морського дна стають причинами його подальшого посилення (вторинної евтрофікації – алохтонна евтрофікація в цих ділянках провокує автохтонну евтрофікацію).

4. У результаті кількісної оцінки впливу абіотичних факторів на інтенсивність розвитку процесів «цвітіння» морської води встановлено, що в регіоні є фрагментований за простором тісний зв'язок між поверхневою температурою та концентрацією хло-

рофілу «а». Найбільш тісний прямий прояв взаємозв'язку спостерігався в маловодну групу років, на мілководді та в зонах впливу річкового стоку, найбільш тісний зворотний зв'язок – у пелагічній зоні.

5. Кореляційний зв'язок між концентрацією хлорофілу «а» та інсоляцією сонячного світла має щільний статистично значущий зв'язок у зоні впливу р. Дунай, особливо у середньоводну групу років, з коефіцієнтом детермінації до 0,82. У районі найбільшого поширення концентрації фосфатів отриманий статистично значущий кореляційний зв'язок з коефіцієнтом детермінації ( $R^2$ ) від 0,43 до 0,77, з найбільш статистично значущим зв'язком у середньоводні та багатоводні групи років.

6. Спектральний аналіз супутникового знімка Sentinel 3 (OLCI) встановив, що морська вода з низькими значеннями концентрації хлорофілу «а» дуже інтенсивно відбиває у фіолетовому, синьому та блакитному спектральних діапазонах світла з довжинами хвиль 440–490 нм, а поглинає в довгих довжинах спектрів хвиль. Морська вода з концентрацією хлорофілу «а» 1–2 мг·м<sup>-3</sup> характеризувалась максимумами відбиття у блакитній довжині хвиль – 490 нм. Подальше збільшення концентрації хлорофілу «а» характеризувалось відповідно зсуванням максимумів значень коефіцієнта відбиття у сторону збільшення довжин хвиль. Води з концентрацією 40 мг·м<sup>-3</sup> характеризувались поглинанням у нижньому червоному спектральному діапазоні – 673 нм та максимумом відбиття у верхньому червоному діапазоні довжини хвиль – 708 нм, що має схожий сигнатурний характер спектрального поглинання та відбиття з наземною рослинністю.

7. На основі проведеного статистичного аналізу багаторічних значень концентрації хлорофілу «а», з перевищенням середнього значення на одне стандартне відхилення показника, під найбільший вплив процесів евтрофікації потрапили прибережні мілководні затоки та акваторії в районах річкових стоків.

Список використаних джерел

1. Визначення біотехнологічних показників для проєктування і розміщення екопозитивних конструкцій в морських екосистемах України : методичні рекомендації / С.В. Стадніченко та ін. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 70 с.
2. Забруднення Чорного моря як наслідок аварійної ситуації, яка склалася після підриву греблі Каховської ГЕС. *УкрНЦЕМ*. URL: [https://sea.gov.ua/index.php/2023/06/27/ges\\_explosion\\_conseq/](https://sea.gov.ua/index.php/2023/06/27/ges_explosion_conseq/) (дата звернення: 27.07.2023).
3. Зайцев Ю.П. Самое синее в мире. Нью-Йорк : Изд-во ООН, 1998. 142 с.
4. Мінічева Г.Г., Соколов Є.В. Екофакторний підхід до зонування українського сектору Чорного та Азовського морів. *Морський екологічний журнал*. 2021. Т. 9, № 1. С. 52–62.
5. Сафранов Т.А., Берлінський М.А., Ель Хадрі Ю., Сліже М.О. Оцінка екосистемних послуг північно-західної частини Чорного моря: стан, проблеми та перспективи. *Вісник Харківського національного університету ім. Каразіна*. 2022. № 56. С. 255–263.
6. Alexandrov B., Minicheva G., Zaitsev Y. Black Sea Network of Marine Protected Areas: European Approaches and Adaptation to Expansion and Monitoring in Ukraine. *Management of Marine Protected Areas: A Network Perspective* / ed. P.D. Goriup. New York : John Wiley & Sons Ltd., 2017. P. 227–246.
7. Bakan G., Büyükgüngör H. The Black Sea. *Marine pollution bulletin*. 2000. Vol. 41(1–6). P. 24–43.
8. 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*. 2016. Vol. 740. P. 54.
9. Ciliberti S.A., Grégoire M., Staneva J., Palazov A., Coppini G., Lecci R., Agostini P. Monitoring and Forecasting the Ocean State and Biogeochemical Processes in the Black Sea: Recent Developments in the Copernicus Marine Service. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, № 10. 1146.
10. Copernicus Marine Service. URL: <https://marine.copernicus.eu/>.
11. Copernicus climate change. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/>.
12. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*. 2008. L. 164. P. 19–40.
13. Giovanni – The Bridge Between Data and Science. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
14. Grégoire M., Vandenbulcke L., Capet A. Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data Set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. URL: [https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/BLKSEA\\_REANALYSIS\\_BIO\\_007\\_005/INFORMATION](https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005/INFORMATION) (дата звернення: 15.08.2021).
15. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability. *Marine ecology progress series*. 2007. № 343. P. 15–23.
16. Kajiyama T., D’Alimonte D., Zibordi G. Algorithms merging for the determination of chlorophyll-a concentration in the Black sea. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018. Vol. 16, № 5. P. 677–681.
17. Manea E., Di Carlo D., Depellegrin D., Agardy T., Gissi E. Multidimensional assessment of supporting ecosystem services for marine spatial planning of the Adriatic Sea. *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 101. P. 821–837.
18. O’Neil J.M., Davis T.W., Burford M.A., Gobler C.J. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful algae*. 2012. Vol. 14. P. 313–334.
19. Report of the regional workshop to facilitate the description of ecologically and biologically significant marine areas in the Black Sea and the Caspian Sea (Baku, 24–29 April 2017). URL: <https://www.cbd.int/doc/c/50f9/bd6d/21c043b0408fd80e5d2bbb96/ebaws-2017-01-04-en.pdf> 10.12.2018.
20. Rodríguez-Rodríguez D., Malak D.A., Soukissian T., Sánchez-Espinosa A. Achieving Blue Growth through maritime spatial planning: Offshore wind energy optimization and biodiversity conservation in Spain. *Marine Policy*. 2014. Vol. 73. P. 8–14.
21. Vahtera E., Conley D.J., Gustafsson B.G., Kuosa H., Pitkänen H., Savchuk O.P., Wulff F. Internal ecosystem feedbacks enhance nitrogen-fixing cyanobacteria blooms and complicate management in the Baltic Sea. *AMBIO: A journal of the Human Environment*. 2007. Vol. 36, № 2. P. 186–194.
22. Vaičiūtė D., Sokolov Y., Bučas M., Dabulevičienė T., Zotova, O. Earth Observation-Based Cyanobacterial Bloom Index Testing for Ecological Status Assessment in the Open, Coastal and Transitional Waters of the Baltic and Black Seas. *Remote Sensing*. 2024. (В друці).
23. Vanella D., Longo-Minnolo G., Belfiore O.R., Ramírez-Cuesta J.M., Pappalardo S., Consoli S., Gandolfi C. Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2022. 42. 101182.
24. Zaitsev Yu. An Introduction to the Black Sea Ecology. Odessa : Smil Edition and Publishing Agency Ltd. 2008. 228 p.



## References

1. Stadnichenko, S.V., Minicheva, G.G., Demchenko, V.O., Snigirova, A.O., Bogatova, Yu.I., Bondarenko, O.S. et al. (2021). *Vyznachennia biotekhnologichnykh pokaznykiv dlia proektuvannia i rozmishchennia ekopozytyvnykh konstruksii v morskykh ekosystemakh Ukrainy [Determination of biotechnological indicators for the design and placement of eco-positive structures in marine ecosystems of Ukraine]*. Kherson: OLDI-PLYUS [in Ukrainian].
2. Zabrudnennia Chornoho moria yak naslidok avariinoi situatsii, yaka skalalasia pislia pidryvu hrebli Kakhovskoi HES [Pollution of the Black Sea as a result of the emergency situation that occurred after the explosion of the dam of the Kakhovskaya HPP]. Retrieved from: [https://sea.gov.ua/index.php/2023/06/27/ges\\_explosion\\_conseq/](https://sea.gov.ua/index.php/2023/06/27/ges_explosion_conseq/) (Last accessed: 27.07.2023) [in Ukrainian].
3. Zaitsev, Yu.P. (1998). *Samoye sineye v mire [The most blue in the world]*. New York: OON [in Russian].
4. Minicheva, G.G., & Sokolov, Y.V. (2021). Ekofakturnyi pidkhid do zonuвання ukraïnskoho sektoru Chornoho ta Azovskoho moriv [Eco-factor approach to the zoning of the ukrainian sector of the Black and Azov seas]. *Morskyi ekolohichnyi zhurnal – Marine ecological journal*, 9(1), 52–62 [in Ukrainian].
5. Safranov, T.A., Berlinsky, M.A., El Khadri, Y., & Slizhe, M.O. (2022). Otsinka ekosystemnykh posluh pivnichno-zakhidnoy chastyny Chornoho morya: stan, problemy ta perspektyvy [Assessment of ecosystem services of the northwestern part of the Black Sea: state, problems and prospects]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu im. Karazina – Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University*, 56, 255–263 [in Ukrainian].
6. Alexandrov, B., Minicheva, G., & Zaitsev, Y. (2017). Black Sea Network of Marine Protected Areas: European Approaches and Adaptation to Expansion and Monitoring in Ukraine. *Management of Marine Protected Areas: A Network Perspective*, (pp. 227–246). New York: John Wiley & Sons Ltd.
7. Bakan, G., & Büyükgüngör, H. (2000). The Black Sea. *Marine pollution bulletin*, 41(1–6), 24–43.
8. 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.
9. Ciliberti, S.A., Grégoire, M., Staneva, J., Palazov, A., Coppini, G., Lecci, R. et al. (2021). Monitoring and Forecasting the Ocean State and Biogeochemical Processes in the Black Sea: Recent Developments in the Copernicus Marine Service. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1146.
10. Copernicus Marine Service. *marine.copernicus.eu*. Retrieved from: <https://marine.copernicus.eu>.
11. Copernicus climate change. *cds.climate.copernicus.eu*. Retrieved from: <https://cds.climate.copernicus.eu>.
12. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*, 164, 19–40.
13. Giovanni – The Bridge Between Data and Science. *giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni*. Retrieved from: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
14. Grégoire, M., Vandenbulcke, L., & Capet, A. (2020). Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) [Data Set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). Retrieved from: [https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/BLKSEA\\_REANALYSIS\\_BIO\\_007\\_005/INFORMATION](https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005/INFORMATION) (Last accessed: 15.08.2021).
15. Kahru, M., Savchuk, O.P., & Elmgren, R. (2007). Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability. *Marine ecology progress series*, 343, 15–23.
16. Kajiyama, T., D'Alimonte, D., & Zibordi, G. (2018). Algorithms merging for the determination of chlorophyll-a concentration in the Black sea. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(5), 677–681.
17. Manea, E., Di Carlo, D., Depellegrin, D., Agardy, T., & Gissi, E. (2019). Multidimensional assessment of supporting ecosystem services for marine spatial planning of the Adriatic Sea. *Ecological Indicators*, 101, 821–837.
18. O'Neil, J.M., Davis, T.W., Burford, M.A., & Gobler, C.J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful algae*, 14, 313–334.
19. UNEP/CBD/EBSA/WS/2017/1/4. (2018). Report of the regional workshop to facilitate the description of ecologically and biologically significant marine areas in the Black Sea and the Caspian Sea (Baku, 24–29 April 2017). Retrieved from: <https://www.cbd.int/doc/c/50f9/bd6d/21c043b0408fd80e5d2bbb96/ebsaws-2017-01-04-en.pdf> (Last accessed: 10.12.2018).
20. Rodríguez-Rodríguez, D., Malak, D.A., Soukissian, T., & Sánchez-Espinosa, A. Achieving Blue Growth through maritime spatial planning: Offshore wind energy optimization and biodiversity conservation in Spain. *Marine Policy*, 73, 8–14.
21. Vahtera, E., Conley, D.J., Gustafsson, B.G., Kuosa, H., Pitkänen, H., Savchuk, O.P. et al. (2007). Internal ecosystem feedbacks enhance nitrogen-fixing cyanobacteria blooms and complicate management in the Baltic Sea. *AMBIO: A journal of the Human Environment*, 36(2), 186–194.
22. Vaičiūtė, D., Sokolov, Y., Bučas, M., Dabulevičienė, T., Zotova, O. (2024). Earth Observation-

Based Cyanobacterial Bloom Index Testing for Ecological Status Assessment in the Open, Coastal and Transitional Waters of the Baltic and Black Seas. *Remote Sensing*. (In print).

23. Vanella, D., Longo-Minnolo, G., Belfiore, O.R., Ramírez-Cuesta, J.M., Pappalardo, S., Consoli, S. et al.

(2022). Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101182.

24. Zaitsev, Y. (2008). *Introduction to the Black Sea Ecology*. Odessa: Smil Edition and Publishing Agency Ltd.

## SPATIAL ASSESSMENT OF WATER BLOOMS IN THE UKRAINIAN SECTOR OF THE NORTHWESTERN PART OF THE BLACK SEA

**Sokolov Y.V.**, Ph.D., Senior Researcher

Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine, sokolovev87@gmail.com

Using geoinformation systems, a spatial-statistical analysis of chlorophyll-a concentration distribution was conducted based on satellite observations in the waters of the northwestern part of the Black Sea during different hydrological years. The temporal dynamics of chlorophyll-a concentrations, associated with the influence of river discharge and other factors, were examined. Utilizing the databases of international online platforms, namely Copernicus Marine Service (CMEMS), Giovanni – NASA, Copernicus Climate Change, and the analytical capabilities of the ESA SNAP software platform, correlations were identified between chlorophyll-a concentration, water temperature, insolation, and phosphate concentration, representing the comprehensive dynamics of aquatic ecosystems in the region. Spatial anomalies of concentrations were calculated based on statistical boundaries of mean values and standard deviations. Spatial zoning of the water area was performed to identify areas at high risk of eutrophication using statistical analysis, including within the boundaries of national water bodies classified according to the EU Water Framework Directive and Marine Strategy Framework Directive ideologies. The study also included an analysis of the spectral characteristics of the sea surface, particularly the light reflection coefficient, based on Sentinel-3 (OLCI) satellite imagery. Using the bio-optical processor “Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC)”, the relationship between chlorophyll-a concentration and light reflection in different spectral ranges was studied. It was found that seawater with varying chlorophyll-a concentrations exhibits different spectral profiles. The long-term distribution of dissolved oxygen in the bottom layer was investigated based on the hydrodynamic model “Black Sea Biogeochemistry Analysis and Forecast” from the international service CMEMS, aiming to identify the most vulnerable areas to the influence of eutrophication processes under conditions of vertical stratification by water density.

**Key words:** environmental condition, eutrophication, northwestern part of the Black Sea, remote sensing data, geoinformation analysis.