

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕНЬ СВІТОВОГО ОКЕАНУ

УДК 556.54; 551.468; 574.6; 504.4

Вплив коливань річкового стоку на розподіл хлорофілу в естуарних зонах Чорного моря за даними супутникових спостережень

О.Ю. Гончаров, О.І. Шундель, А.С. Тітяпкін

Гончаров Олександр Юрійович – канд. біол. наук, завідувач відділу океанографії Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України"; E-mail: goncharov.olexandr@gmail.com

Шундель Олексій Іванович – к.фіз.-мат.н., старший науковий співробітник відділу панорамних акустичних систем Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України"; E-mail: lixyta666@gmail.com

Тітяпкін Андрій Станіславович – в.о. начальника відділу аналізу морських екосистем та антропогенного навантаження Державної установи "Український науковий центр екології моря"; E-mail: tityarkin@ukr.net

Анотація. Проведено статистичний аналіз варіабельності річкового стоку трьох найбільших річок Чорного моря (Дунаю, Дніпра і Дністра), що впадають в північно-західну частину Чорного моря. Проаналізовано вплив коливань річкового стоку на розподіл полів хлорофілу в Дністровському та Дніпровсько-Бузькому лиманах та в зонах впливу річок у морі в різні сезони року. Зроблено висновок про те, що у морі зона розподілу хлорофілу позитивно залежить від величини стоку. У лиманах – навпаки, скорочення стоку призводить до збільшення концентрацій хлорофілу, що є негативним фактором, який призводить до погіршення якості води та до ризику екологічних катастроф, пов'язаних з евтрофікацією водойм. У морі найвищі концентрації хлорофілу в естуарних зонах спостерігаються навесні з подальшим поступовим зниженням до зими, у той час як у лиманах процеси первинної продукції фітопланктону сягають найвищого рівня влітку. Найвищі концентрації хлорофілу спостерігаються у Дніпровсько-Бузькому лимані в усі сезони року та періоди водності.

Ключові слова: північно-західна частина Чорного моря, річковий стік, розподіл хлорофілу.

Вступ. Північно-західна частина Чорного моря (далі – ПЗЧМ) є найбільшою за площею шельфовою зоною Чорного моря. Сюди надходить майже 80% загального річкового стоку Чорного моря [15] завдяки стоку таких річок як Дунай, Дністер, Дніпро та Південний Буг. Збіг таких факторів, як мілководість та потужний річковий стік суттєво позначається на гідрохімічному режимі ПЗЧМ, який значною мірою і формується під впливом річок. Багаторічна та сезонна нерівномірність річкового стоку впливає на формування режиму біогенних елементів в ПЗЧМ і таким чином позначається також на гідробіологічному режимі через вплив на інтенсивність формування первинної продукції фітопланктону. Кліматичні зміни останніх десятиліть, які уже вплинули на стік причорноморських річок, будуть і надалі призводити до скорочення стоку та його нерівномірності протягом року.

Кожна з перелічених великих річок має свою характерну зону впливу на північно-західну частину Чорного моря [3] в залежності від величини річки, наявності або відсутності естуарію, розташування та напряму річкового витоку щодо основної циркуляції ПЗЧМ. Так, Дністер, а

також Дніпро разом із Південним Бугом утворюють великі естуарії, які називають лиманами. Ці естуарії є гідрологічними системами, які обмежені берегами і косами з відносно вузьким гирлом. Дніпровсько-Бузький та Дністровський лимани є високопродуктивними екосистемами з високими величинами первинної продукції та біомасами фітопланктону [6, 9, 12]. В цих водоймах відбувається трансформація річкової води, а також вилучення багатьох біогенних елементів внаслідок фізичних та біологічних процесів [17].

Дунай, на відміну від Дністра та Дніпра, не утворює лиманної системи, але формує розгалужену дельту, де також відбувається зниження концентрацій біогенних речовин та процеси седиментації завислої речовини. Через те, що витік Дунаю здійснюється безпосередньо у море, процеси змішування та трансформації річкової води, а також створення певних зон підвищеної продуктивності відбувається на дунайському узмор'ї [2, 5].

Саме під впливом річкового стоку, що збагачує море біогенними речовинами (насамперед азотом і фосфором), протягом чверті століття з початку 1970-х і до кінця 1990-х років у північно-західній частині Чорного моря формувалися масштабні зони з повною відсутністю, або дефіцитом кисню, площею в тисячі квадратних кілометрів [20, 22]. Ці явища гіпоксії призводили до масової загибелі планктонних та бентосних мешканців, як то риби, молюски, ракоподібні та ін., і до деградації біологічних угруповань. Таким явищам завжди передують інтенсивне цвітіння фітопланктону, гіперпродукція якого, при відповідних температурних режимах, і призводить врешті-решт до швидкого розкладу органічної речовини з поглинанням кисню.

Концентрація хлорофілу у воді є надійним показником кількісного розвитку фітопланктону і використовується для експрес-оцінки концентрації мікродоростей. Лабораторні методи дозволяють оцінювати розвиток та фізіологічний стан фітопланктону на різних глибинах, проби яких відбирають в польових умовах. Але динамічність процесів первинної продукції фітопланктону у поєднанні з фізичною неможливістю охопити великі поля з достатньою регулярністю, а також трудомісткість аналітичної лабораторної обробки, створюють нові виклики щодо вчасної оцінки та прогнозу розвитку біологічних процесів у морях та океанах.

Останні десятиріччя швидко розвиваються технології супутникового спостереження за станом моря, у т.ч. і за концентрацією хлорофілу у поверхневому шарі води. Регулярність супутникових спостережень, а також одночасне охоплення великих акваторій роблять цей вид досліджень дуже ефективним для рутинного моніторингу. Швидкий розвиток нових супутникових технологій (впровадження нових датчиків і надання нових діапазонів з більшою роздільною здатністю) створює можливості для розвитку спостережень за навколишнім водним середовищем. Розробка регулярних спостережень за концентрацією хлорофілу в океані була розпочата за допомогою датчика широкого поля огляду (*SeaWiFS*). Ці супутникові спостереження під егідою *NASA* відбувалися з вересня 1997 року до грудня 2010 року. Доступна просторова роздільна здатність цих спостережень коливається від 4 км до 9 км. Спектрорадіометр із середньою роздільною здатністю (*MODIS*) – це наступне покоління супутникових датчиків від *NASA*. Цей сенсор встановлено на бортах двох супутників *Terra* і

Aqua, запущених у 1999 і 2002 роках відповідно. Їхні місії завершаться у 2025–2027 роках. Просторова роздільна здатність спостережень хлорофілу у вільному доступі становить 1 км. Наступні покоління супутників для спостереження за станом поверхні моря, з більшою роздільною здатністю (такі як місія *Sentinel*) вже впроваджуються, але їхні алгоритми розрахунку концентрацій хлорофілу поки що знаходяться лише на стадії тестування.

Метою цього дослідження є аналіз впливу коливань річкового стоку на формування полів хлорофілу у північно-західній частині Чорного моря шляхом поєднання даних щомісячних спостережень за стоком основних річок та щомісячних даних щодо концентрації хлорофілу у ПЗЧМ.

Матеріали і методи. Для виявлення коливань річкового стоку зібрано річні та місячні значення для найбільших річок Чорного моря. Найбільше даних отримано для Дніпра (1818–2021), потім Дністра (1881–2021) і Дунаю (1921–2021).

Для дослідження мінливості концентрації хлорофілу в естуарних акваторіях Чорного моря зібрано супутникові дані, які отримано єдиною супутниковою системою (*MODIS Aqua*) за весь час її існування (з 2003 р.), з часовим кроком в один місяць і просторовою роздільною здатністю – 1 км, охопивши таким чином 19-річний період (2003–2021 рр.).

Субрегіони досліджень ПЗЧМ визначили в таких межах:

- Дніпровсько-Бузький: 46.649807°N – 46.436088 °N і 30.783552°E – 32.283768°E;
- Дністровський: 45.6666°N – 46.4000°N і 30.1000°E – 30.8333°E;
- Дунайський: 44.392782°N – 45.871534°N і 28.730319°E – 30.244584°E.

Дані були імпортовані в програмне забезпечення *MATLAB®* і оброблені бігармонійною сплайн-інтерполяцією для створення мап розподілу. На основі усереднених даних побудовано карти просторового розподілу для всіх сезонів року та всіх періодів стоку.

Поділ на сезони року проведено за типовими температурами води:

- зима (січень–березень);
- весна (квітень–травень);
- літо (червень–вересень);
- осінь (жовтень–грудень).

Результати

Параметризація величин річкового стоку

Щоб охарактеризувати "водність" стоку річок і визначити конкретний діапазон стоку, який відповідає багатоводному, середньоводному або маловодному року, проведено статистичний аналіз доступних даних стоку (табл. 1). Середню частину даних між 25-м і 75-м процентилями визначено як діапазон середнього стоку. Значення вище та нижче цього діапазону стосуються високого та низького стоку відповідно.

Можна зазначити, що останні два десятиріччя річковий стік скорочується. Це вплинуло на загальні статистичні параметри. Так, в дослідженні [18] був проведений такий самий аналіз, але коротший на 20 років період (до 2001 р.). Включення до аналізу даних 2002–2021 рр. призвело до зниження мінімальних, середніх, медіанних величин, а також величин квантилів для всіх трьох досліджених річок [18].

Таблиця 1 – Статистичні параметри річкового стоку ($\text{км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$) в північно-західну частину Чорного моря

Параметр	Дунай, n=101	Дністер, n=112	Дніпро, n=204
Мінімальний	126.9	4.9	17.83
Максимальний	302.2	19.3	95.87
Середній	204.6	9.3	49.02
Медіана	199.6	8.9	47.81
Ексцес	0.037	0.679	0.211
Стандартне відхилення	38.03	2.87	14.55
Середнє відхилення	29.54	2.28	11.59
Коефіцієнт варіації, %	14.44	24.40	24.93
25-й перцентиль (75%-забезпеченість)	176.5	7.4	37.68
75-й перцентиль (25%-забезпеченість)	224.8	10.8	57.74

Дніпровсько-Бузький район

У Дніпровсько-Бузькому лимані концентрація хлорофілу завжди в 3–4 рази вище, ніж у прилеглий частині морі. Це характерно для усіх діапазонів річкового стоку. Середньорічна величина в лимані залежить від величини стоку і зростає разом зі зменшенням водності Дніпра (рис. 1, табл. 2).

Таблиця 2 – Середні сезонні концентрації ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$) хлорофілу-а в поверхневому шарі в різні періоди водності в Дніпровсько-Бузькому лимані та прилеглий частині моря в 2003–2021 рр.

Період водності	Концентрації хлорофілу-а, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$				
	Зима	Весна	Літо	Осінь	Річна середня
Дніпровсько-Бузький лиман					
Маловодний	32.93	43.27	62.62	47.65	48.2
Середньоводний	30.56	44.02	55.57	38.95	43.2
Багатоводний	32.92	51.28	48.25	31.56	40.7
Прилегла частина моря					
Маловодний	6.81	12.55	13.65	9.88	10.8
Середньоводний	6.82	19.49	17.50	13.45	14.1
Багатоводний	8.42	23.57	12.81	10.10	12.8

Середні значення концентрації хлорофілу-а в морі є найнижчими при низькому стоці в усі сезони, ймовірно, через зменшення збагачення поживними речовинами. У зимово-весняний період у морі спостерігається пряма залежність величини концентрації хлорофілу від величини стоку. Влітку та восени максимумами концентрації хлорофілу припадають на середньоводний період. Річна динаміка хлорофілу характеризується певною сезонною мінливістю, яка має спільні риси у лимані і у морі, але різні значення при різних діапазонах стоку як у лимані, так і у морі. Так, у морі максимальна концентрація хлорофілу припадає на весну, що співпадає з холодноводними цвітіннями у ПЗЧМ, притаманними для цієї пори року [14]. Від літа до зими концентрація хлорофілу у морі знижується.

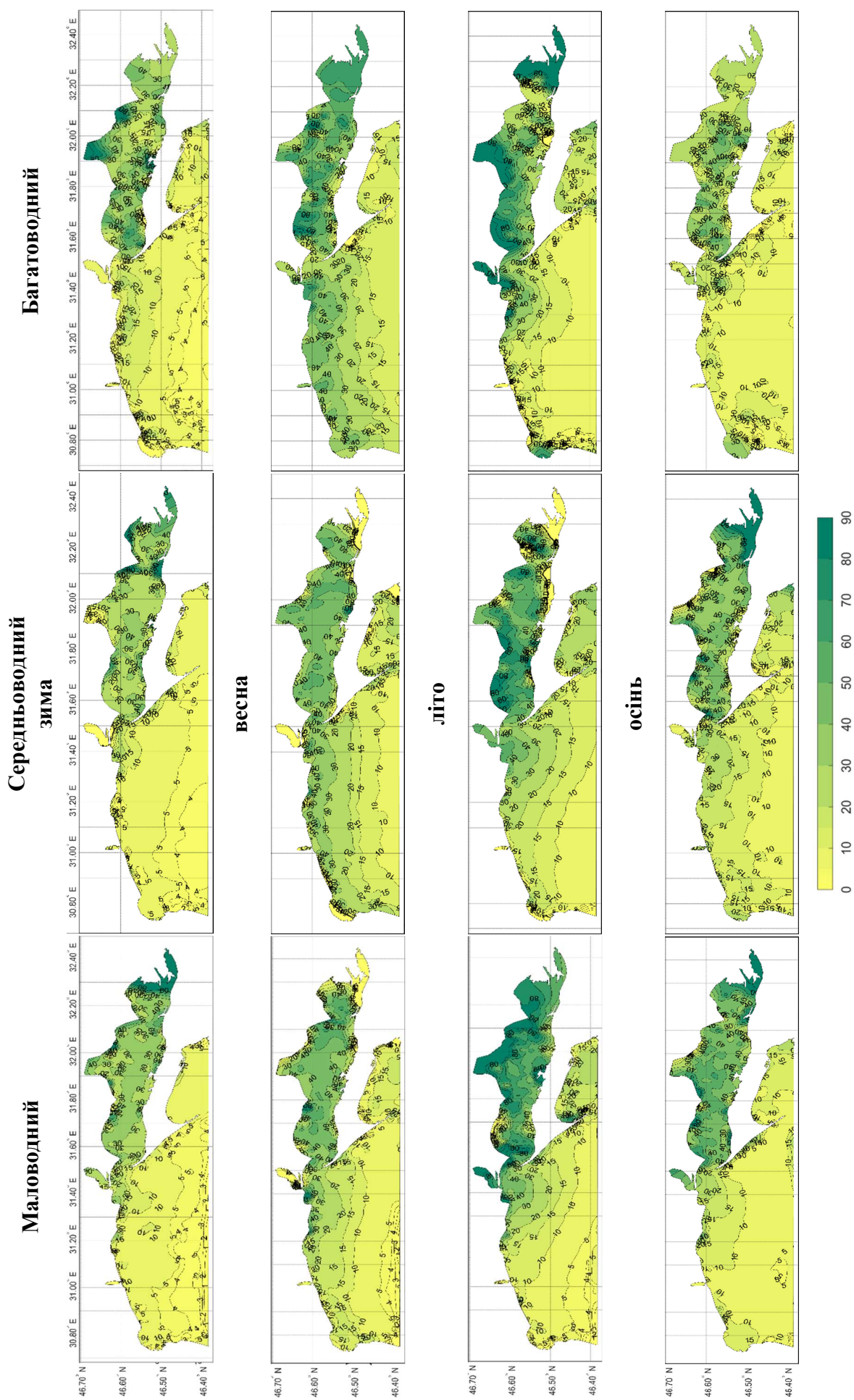


Рис. 1. Сезонний розподіл хлорофілу ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) у різні періоди водності в Дніпровсько-Бузькому лимані та у прилеглий частині моря

У Дніпровсько-Бузькому лимані максимум хлорофілу спостерігається влітку в усі періоди водності. Взимку варіабельність концентрацій хлорофілу і в лимані, і в морі незначна, незалежно від періоду водності, швидше за все, через низьку температуру та меншу варіабельність річкового стоку. Навесні концентрація хлорофілу позитивно корелює з величиною стоку і в лимані, і в морі (табл. 3). У той же час влітку та восени розвиток концентрації хлорофілу мають зворотну залежність від водності Дніпра і є максимальними у маловоддя і мінімальними у багатоводний період.

Таблиця 3 – Середні сезонні концентрації ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$) хлорофілу-*a* в поверхневому шарі в різні періоди водності в Дністровському лимані та прилеглий частині моря в 2003–2021 рр.

Період водності	Концентрації хлорофілу- <i>a</i> , $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$				
	Зима	Весна	Літо	Осінь	Річна середня
Дніпровсько-Бузький лиман					
Маловодний	14.61	18.26	20.57	11.87	16.5
Середньоводний	13.08	14.67	19.43	10.88	14.9
Багатоводний	10.15	10.28	19.74	10.58	13.5
Прилегла частина моря					
Маловодний	2.60	5.44	3.11	3.62	3.5
Середньоводний	2.85	7.11	4.09	4.07	4.3
Багатоводний	2.73	9.60	5.39	3.66	5.0

Дністровський район

Як видно на рис. 2, найвищі концентрації хлорофілу в морі в Дністровському районі спостерігалися навесні в усі періоди водності. Цей феномен відповідає весняному цвітінню фітопланктону в морі. Від літа до зими вміст хлорофілу в морі поступово зменшується, незалежно від величини стоку (табл. 3). Зона поширення високих концентрацій хлорофілу в морі безпосередньо пов'язана з величиною річкового стоку (рис. 2), так само як і найвищі концентрації хлорофілу в морі спостерігалися в період високого стоку, а найнижчі – в маловодний період.

В лимані ситуація кардинально інша, ніж у морі. Максимальні концентрації хлорофілу у Дністровському лимані спостерігались влітку і дещо нижчі навесні протягом усіх періодів стоку. Висока температура води влітку сприяє розвитку фітопланктону аж до стану гіперцвітіння [11]. Зменшення стоку зумовлює збільшення концентрації хлорофілу в Дністровському лимані. Це спостереження підтверджується дослідженнями фітопланктону в 2003–2017 рр., про які повідомляється в [11].

Порівняльна сезонна динаміка середніх концентрацій хлорофілу в морі та в Дністровському лимані за значеннями стоку представлена в табл. 3. Як видно, концентрація хлорофілу в Дністровському лимані є значно вищою, ніж у морі цілий рік. Інша важлива закономірність, яка є очевидною з рис. 2 та табл. 3 – це протилежне (зворотне) співвідношення між хлорофілом у морі та в лимані від величини стоку, яке зазначено вище.

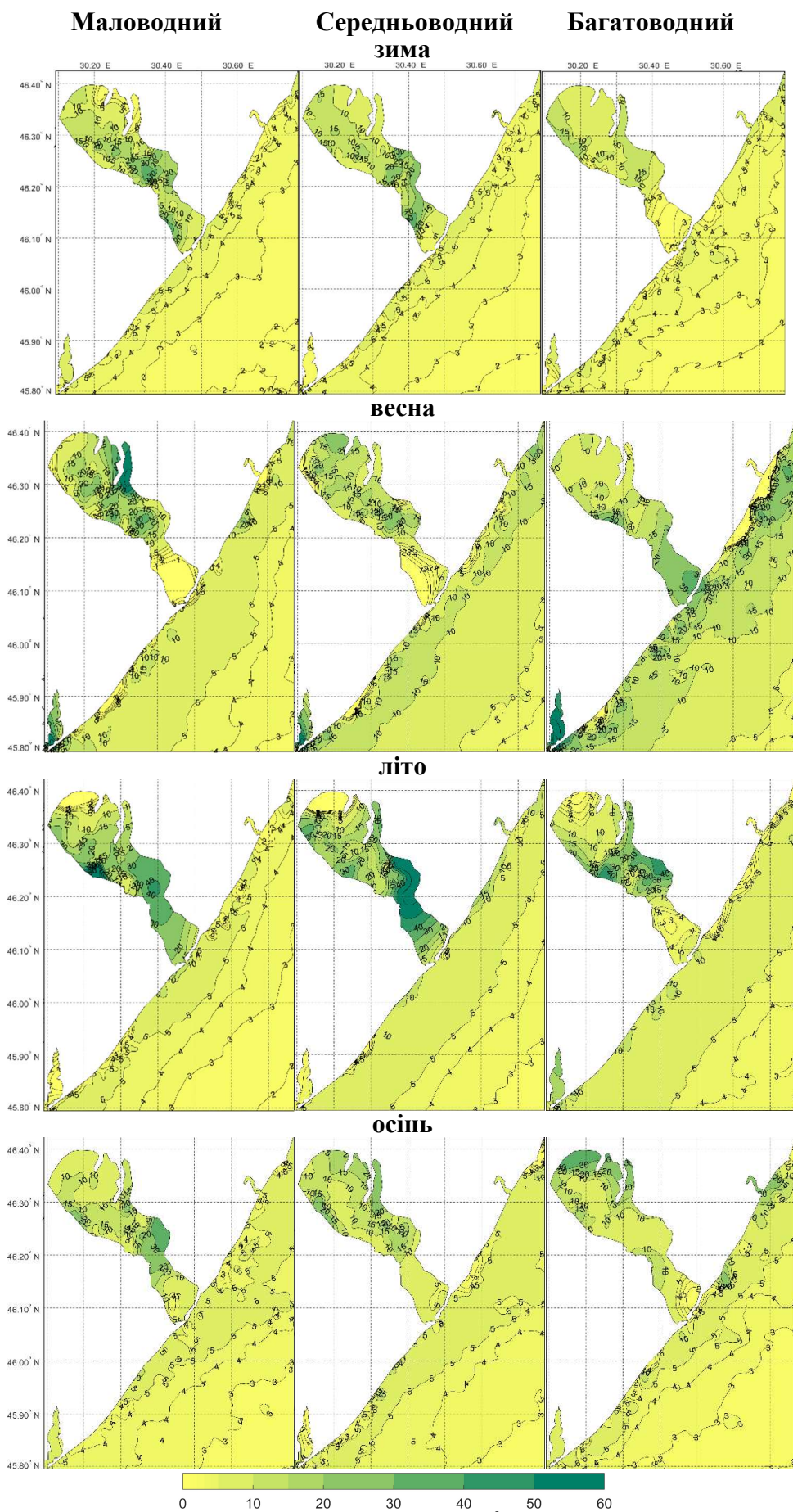


Рис. 2. Сезонний розподіл хлорофілу ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) у різні періоди водності в Дністровському лимані та у прилеглої частині моря

У Дністровському лимані виділяються три основні зони формування фітопланктонних угруповань: верхня, центральна та нижня. У центральній зоні лиману формуються максимальні концентрації хлорофілу (рис. 2).

Дунайський район

Оскільки величина стоку Дунаю в середньому в 4 рази більша за стік Дніпра та у 20 разів – за стік Дністра (табл. 1), то і зона впливу Дунаю є найширшою [3], що підтверджується картуванням (рис. 3).

Середньорічна концентрація хлорофілу на Придунайському узмор'ї, а також зона поширення високих концентрацій хлорофілу в морі позитивно корелює зі стоком – 4.5, 5.4 і 5.8 мг·м⁻³ для мало-, середньо- та багатоводного періодів відповідно (табл. 4).

Таблиця 4 – Середні сезонні концентрації (мг·м⁻³) хлорофілу-*a* в поверхневому шарі в різні періоди водності на Придунайському узмор'ї в 2003–2021 рр.

Період водності	Концентрації хлорофілу- <i>a</i> , мг·м ⁻³				
	Зима	Весна	Літо	Осінь	Річна середня
Маловодний	4.06	5.50	4.71	3.93	4.5
Середньоводний	3.75	8.50	5.52	4.68	5.4
Багатоводний	3.75	8.30	7.31	4.08	5.8

Максимальні концентрації спостерігаються навесні протягом усіх періодів водності, трохи нижчі – влітку. У середньоводний період навесні та восени спостерігається максимум концентрації хлорофілу порівняно з мало- і багатоводним. Найвищі концентрації хлорофілу взимку спостерігаються під час маловодної зими.

Обговорення результатів.

Зона розповсюдження полів хлорофілу в гирлових частинах моря відповідає величині стоку річок. Найменша – у Дністра, найбільша – у Дунаю. Найбільш високі концентрації хлорофілу зафіксовані у прилеглий до моря частині гирла Дніпра, а в Дніпровсько-Бузькому лимані загалом найвищі концентрації хлорофілу зі спостережених у Чорному морі. Продукований в лиманах річок хлорофіл виноситься в море і збагачує собою його води. Трансформована вода річок Дніпро і Південний Буг досягає Одеської затоки і певною мірою маскує локальний вплив від очисних споруд [7, 10] та іншого антропогенного навантаження.

Річка Дунай при впадінні в море має іншу морфологію (дельту), тому створення хлорофілу починається переважно в морі, концентрації хлорофілу тут є екстремально високими (зазвичай до 20 мкг/л) і зона його розповсюдження – доволі широка.

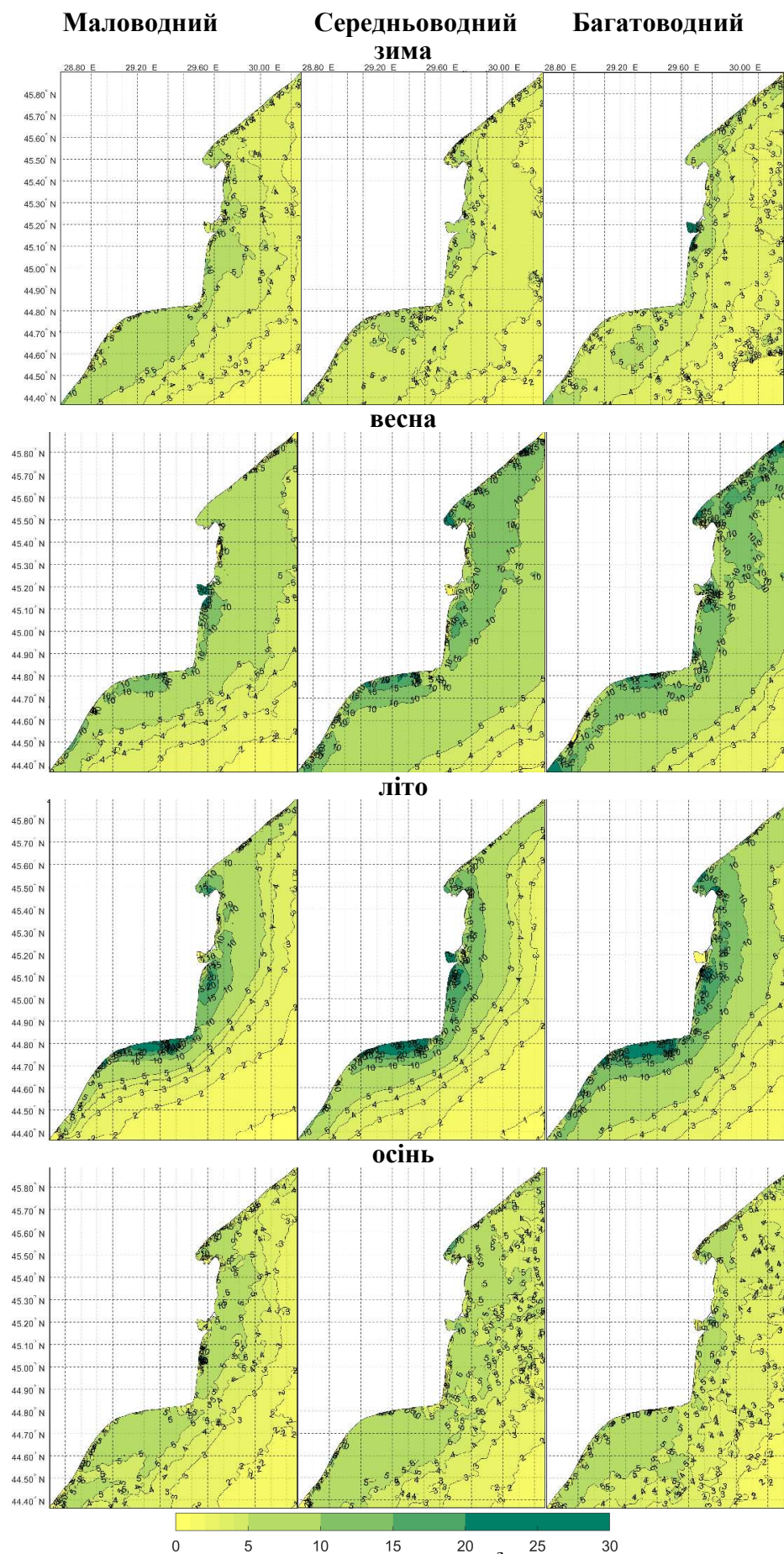


Рис. 3. Сезонний розподіл хлорофілу ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$) у різні періоди водності на Придунайському узмор'ї

У роки з високим стоком концентрація фітопланктону в лиманах зменшується (протягом усього року в Дністровському і влітку – восени в Дніпровсько-Бузькому) і навпаки. Це явище слід пояснити кількома причинами:

- як зазначено в [17, 18], протягом маловодного періоду води Дністровського лиману можуть збагачуватися фосфором, накопиченим у донних відкладах;
- зменшення річкового стоку призводить до збільшення вмісту біогенних речовин внаслідок їх природного акумулювання у воді;
- водні екосистеми мають оптимальні значення водообміну з точки зору формування найкращих умов первинної продукції фітопланктону [8, 9]. Цілком ймовірно, що показники водообміну в Дністровському та Дніпровсько-Бузькому лиманах в період малого стоку сприяють зростанню біомаси фітопланктону.

Також у [18] нами описано феномен, коли збільшення стоку річок в північно-західній частині Чорного моря не призводить до відповідного збільшення концентрацій біогенних речовин, а навпаки навіть викликає їх зменшення. Очевидно, що лимани, перехоплюючи значну частину біогенного навантаження, що створюють річки, відіграють значну роль у цьому явищі. Таким чином, лимани можна розглядати як специфічні реактори біологічних процесів, які є високопродуктивними екосистемами, що трансформують річковий стік та живлять море первинною органічною речовиною.

Дніпровсько-Бузький лиман в весняний період, тобто під час підвищеного річкового стоку має схожі характеристики з морем, а саме: первинна продукція фітопланктону тут прямо залежить від величини стоку (рис.1, табл. 2), але має в 1.3–1.6 разів вищу концентрацію хлорофілу, ніж у прилеглий частині моря. Вочевидь, відмінність від Дністровського лиману полягає в тому, що гідравлічне навантаження на Дніпровсько-Бузький лиман навесні значно більше, ніж у Дністровському лимані, і при зростанні стоку величини водообміну лиману перевищують значення, які є оптимальними для створення первинної продукції фітопланктону.

Ядром цвітіння водоростей в Дністровському лимані є його центральна зона. У цій зоні спостерігаються максимальні концентрації хлорофілу майже в усі сезони і всі періоди водності (рис. 2). Справа в тому, що верхня частина Дністровського лиману знаходиться під сильним річковим впливом і ця зона є дуже нестабільною через мінливість гідрологічних та гідрохімічних умов. У цей же час нижня частина лиману знаходиться під значним впливом морської води, і ця зона також є нестабільною з точки зору гідролого-гідрохімічних і екологічних умов. Іншими дослідженнями також виявлено існування цих трьох зон, що впливають не тільки на гідрохімію угруповання фітопланктону, але на вищі ланки харчового ланцюга [21]. Природно, що центральна частина лиману є найбільш сприятливою для розвитку фітопланктонного угруповання. Це припущення добре узгоджується зі спостереженнями за біомасою фітопланктону та хлорофілом у цих трьох зонах протягом 2003–2016 рр. [11, 13]. Видовий склад і структура фітопланктону Дністровського лиману та моря суттєво відрізняються [11, 14] через суттєві відмінності екологічних умов. Ці

відмінності визначають різницю в суцесійних процесах і призводять до різної сезонної динаміки концентрації хлорофілу.

Сезонна динаміка в різні періоди стоку в гирловій зоні Дунаю відрізняється від Дніпровсько-Бузької та Дністровської гирлових зон через різну морфологію системи естуарію – "дельта – море" Дунаю та "напівзамкнений лиман – море" у Дністра та Дніпра з Південним Бугом. Очевидно саме тому річна динаміка вмісту хлорофілу і залежність його концентрації від величини водності більш подібні до морських систем, але за певних умов також і до лиманних (естуарних) систем. Так, на Дунайському узмор'ї максимум концентрації хлорофілу восени спостерігався в середньоводний період, що також відбувалося в Дністровському лимані та на узмор'ї Дністра та Дніпра. Масова седиментація теригенного і біогенного матеріалів в гирловій зоні моря при взаємодії річкових і морських вод [1, 19] певним чином впливає на формування гідрохімічного і гідробіологічного режимів при зміні водності стоку.

Нові технології супутникового спостереження можуть бути корисними для моніторингу водного середовища та дозволять зосередитися на певних районах моря, включаючи лимани та лагуни. Регулярне спостереження за полями хлорофілу дає інформацію про поточну ситуацію та про довгострокові зміни трофічного стану водного середовища. Просторово-часовий розподіл хлорофілу в поєднанні з іншими супутниковими даними (наприклад, температури поверхні моря, вітрів, радіації тощо) і вимірними гідрологічними даними (річковий стік) може пояснити та передбачити зміни у естуарних екосистемах. Нова інформація також може бути важливою для розширення серії екологічних даних про прибережні водні екосистеми (лимани, лагуни), узагальнених за попередні десятиліття до впровадження технологій дистанційного зондування.

Висновки

- Зона впливу річок у морі відповідає величині стоку. Найбільша зона навколо Дунаю, найменша – навколо Дністра. Весняні концентрації фітопланктону та широка зона їх розповсюдження в морі відповідають сезонному розподілу річкового стоку, який має максимум навесні.

- У морі збільшення водності річки викликає зпідвищення концентрацій хлорофілу в усіх досліджених естуарних районах. В певних випадках середньоводний період є найбільш сприятливим для розвитку фітопланктону (за концентрацією хлорофілу).

- У лиманах навпаки – збільшення водності річки призводить до зменшення концентрації хлорофілу в усі пори року (окрім весни в Дніпровсько-Бузькому лимані) і навпаки. Найвищий вміст хлорофілу у лиманах спостерігається влітку.

- Очікуване зменшення стоку річок, як наслідок прогнозованих кліматичних змін, в першу чергу матиме негативний вплив на екосистеми Дніпровсько-Бузького та Дністровського лиманів через посилення цвітіння та пов'язані з цим наслідки. Водночас знизиться первинна продуктивність прилеглої акваторії моря.

Перелік використаних джерел

1. Алмазов А.М. Гидрохимия устьевых областей рек. Киев: Изд. АН УССР, 1962. 256 с.
2. Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А. Особенности формирования гидрохимических условий украинской части устьевой области Дуная. *Экосистема взморья украинской дельты Дуная*. Одесса: Астропринт, 1998. С. 21–62.
3. Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А., Гончаров А.Ю. Районирование украинского сектора северо-западной части Черного моря (по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам). *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2000. № 1. С. 9–24.
4. Гаркавая Г.П., Берлинский Н.А., Богатова Ю.И., Гончаров А.Ю. Проблемы антропогенного эвтрофирования Днестра и Днестровского лимана и их влияние на северо-западную часть Черного моря (СЗЧМ). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету*. 2005. № 3. С. 26.
5. Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Гончаров А.Ю. Гидрохимический мониторинг взморья Килийского рукава Дуная в связи с созданием судового хода "Дунай–Черное море" через рукав Быстрый. *Причорноморський Екологічний бюлетень*. 2006. № 3–4. С. 156–178.
6. Гидробиологический режим Днестра и его водоемов / Сиренко Л.А., Евтушенко М.Ю., Комаровский Ф.Я. и др. Под ред. Брагинского Л.П. Киев: Наук. думка, 1992. 356 с.
7. Гончаров А.Ю. Гидрохимический режим и первичная продукция фитопланктона в районе аварийного выпуска сточных вод в Одесском заливе. *Экология моря*. 2001. № 58. С. 31–36.
8. Гончаров А.Ю. Связь морфометрических параметров и внешнего водообмена с первичной продукцией в водоёмах северо-западного Причерноморья. *Экология моря*. 2005. №. 68. С. 31–36.
9. Гончаров О.Ю. Умови формування первинної продукції в водоймах північно-західного Причорномор'я: автореф. дис. ... к-та біол. наук: 03.00.17 / Інститут біології південних морів ім. О.О. Ковалевського НАН України. Севастополь, 2006. 21 с. DOI: 10.13140/RG.2.2.32442.70086
10. Гончаров О.Ю. Антропогенний вплив станції біологічної очистки "Північна" на Одеську затоку і Хаджибейський лиман в сучасний період. *Євроінтеграція екологічної політики України: матеріали Всеукраїнської конференції (Одеса, 29-31 травня 2019 р.)*. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2019. С. 98–102.
11. Дерезюк Н.В., Конарева О.П., Солтис И.Е. Летние цветения фитопланктона в Днестровском лимане (2003–2016 гг.). *Transboundary Dniester River Basin Management: Platform For Cooperation And Current Challenges*: материалы междунар. конф. (Тирасполь, 26-27 октября 2017 г.). Тирасполь: Eco-Tiras, 2017. С. 96–100. <http://dspace.onu.edu.ua:8080/handle/123456789/11254>
12. Днепровско-Бугская эстуарная экосистема / Жукинский В.Н., Журавлева Л.А., Иванов А.И. и др. Под ред. Зайцева Ю.П. Киев: Наукова думка, 1989. 240 с.
13. Ковалева Н.В., Мединец В.И. Особенности пространственного распределения фотосинтетических пигментов в Днестровском лимане в 2003–2014 гг. *Лимани північно-західного Причорномор'я: сучасний гідроекологічний стан, проблеми водного та екологічного менеджменту та шляхи їх вирішення*: мат-ли Всеукраїнської наук.-практ. конф. (Одеса, 1–3 жовтня 2014 р.). Одеса, 2014. С. 93–95. <http://dspace.onu.edu.ua:8080/handle/123456789/5389>
14. Нестерова Д.А., Теренько Л.М., Теренько Г.В., Руснак Е.М. Фитопланктон. *Северо-западная часть Черного моря: биология и экология*: монография / ред. Ю.П. Зайцев, Б.Г. Александров, Г.Г. Миничева. Киев: Наукова думка, 2006. Глава 3. С. 175–195.
15. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / ред. Зайцев Ю.П. Киев: Наукова думка, 2005. 701 с.
16. Украинский В.В., Попов Ю.И. Районирование вод северо-западной части Черного моря по термохалинным показателям: *International Symposium: The Black Sea Ecological Problems*: зб. наук. доп. Одесса, Украина: ОЦЭНТИ, 2003. С. 374–377.
17. Garkavaya, G.P., Bogatova, Y.I., Berlinskii, N.A., Bolshakov V.N., Goncharov A.Yu. Long-term variations in the biogenic matter runoff of the Dnestr River. *Water Resources*. 2008. Vol. 35, № 6. P. 708–715. DOI: 10.1134/S0097807808060109 (дата звернення 20.10.2022).
18. Goncharov O.Yu. Variation of rivers runoff as an important factor of nutrient regime of the Black Sea. *Transboundary Dniester River Basin Management: Platform for Cooperation and Current Challenges*: Proceedings of the Intern. Conf., Tiraspol, Moldova, 26-27 October, 2017. Tiraspol: Eco-Tiras, 2017. P. 2–64
19. Lisitsyn A.P. The marginal filter of the ocean. *Oceanology*. 1995. Vol. 34, №5. P. 671–682.

20. Friedrich, J., Janssen, F., Aleynik, D., et al. Investigating hypoxia in aquatic environments: Diverse approaches to addressing a complex phenomenon. *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11, № 4. P. 1215–1259. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1215-2014> (дата звернення 20.10.2022).

21. Snigirov S., Kvach Yu., Goncharov O., Sizo R., Sylantyev S. Hydrology and parasites: What divides the fish community of the lower Dniester and Dniester estuary into three? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019. Vol. 217. P. 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.11.022> (дата звернення 20.10.2022).

22. Zaitsev Yu.P., Alexandrov B.G., Berlinsky N.A., Zenetos A. The Black Sea an oxygen-poor sea. In: Europe's biodiversity – biogeographical regions and seas. Environmental issue report. Published by EEA (European Environment Agency). Copenhagen, 2002. 23 p. URL: http://reports.eea.eu.int/report_2002_0524_154909/en (дата звернення 20.10.2022).

The influence of river flow fluctuations on the distribution of chlorophyll in the estuarine zones of the Black Sea according to satellite observations

O. Yu. Goncharov, O.I. Shundel, A.S. Tityapkin

Goncharov, Oleksandr Yuriyovych – PhD (Biol.), Head of the Department of Oceanography of the State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine"; E-mail: goncharov.oleksandr@gmail.com

Shundel, Oleksiy Ivanovych – PhD (Phys. & Math.), Senior Research the Department of panoramic acoustic systems, State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine"; E-mail: lixyta666@gmail.com

Tityapkin, Andriy Stanislavovych – Acting Head Department of Analysis of Marine Ecosystems and Anthropogenic Impact of the State Institution "Ukrainian Scientific Center of Marine Ecology"; E-mail: tityapkin@ukr.net

Abstract. A statistical analysis was conducted on the variability of river runoff in the three largest rivers that flow into the northwestern part of the Black Sea - Danube, Dnieper, and Dniester. The study analyzed the influence of fluctuations in river flow on the distribution of chlorophyll-a in the Dniester and Dnieper-Bug estuaries, as well as in the areas affected by these rivers in different seasons. The analysis revealed that the distribution of chlorophyll in the sea is positively correlated with the flow rate, while in estuaries, a reduction in flow leads to an increase in chlorophyll concentrations. This is a negative factor that worsens water quality and increases the risk of ecological disasters associated with the eutrophication of water bodies. In the sea, the highest concentrations of chlorophyll in estuarine areas are observed in spring, with a gradual decrease until winter. Meanwhile, in estuaries, primary production processes reach their highest levels in summer. The Dnieper-Bug Estuary has the highest chlorophyll concentrations in all seasons and ranges of runoff.

Keywords: North-Western part of the Black Sea, river flow, distribution of chlorophyll.

References

1. Almazov AM. *Gidrokimiya ust'yevykh oblastey rek* [Hydrochemistry of Estuary Economic Rivers]. Kiyev: Izd. AN USSR; 1962. 256 p. [in Russian].

2. Garkavaya GP, Bogatova YuI, Berlinskiy NA. Osobennosti formirovaniya gidrokhimicheskikh usloviy ukrainskoy chasti ust'yevoy oblasti Dunaya [Features of the formation of hydrochemical conditions in the Ukrainian part of the mouth area of the Danube]. In: *Ekosistema vzmor'ya ukrainskoy del'ty Dunaya* [Coastal ecosystem of the Ukrainian Danube Delta]. Odessa: Astroprint; 1998:21–62 [in Russian].

3. Garkavaya GP, Bogatova YuI, Berlinskiy NA, Goncharov AYu. Rajonirovanie ukrainskogo sektora severo-zapadnoj chasti Chernogo morja (po gidrofizicheskim i gidrohimicheskim harakteristikam). *Jekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Zoning of the Ukrainian Sector of a Northwest Part of the Black Sea (according to hydrophysical and hydrochemical characteristics). Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]. 2000; 1: 9–24 [in Russian].

4. Garkavaya GP, Berlinskiy NA, Bogatova YuI, Goncharov AYu. Problemy antropogennogo evtrofirovaniya Dnestra i Dnestrovskogo limana i ikh vliyaniye na severoazapadnuyu chast' Chernogo morya (SZCHM). *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu* [Problems of anthropogenic eutrophication of the Dniester and the Dniester estuary and their impact on the northwestern

- part of the Black Sea (NWBS). The Scientific Issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University]. 2005;3:26 [in Russian].
5. Garkavaya GP, Bogatova YuI, Goncharov AYu. Gidrokhimicheskiy monitoring vzmor'ya Kiliyskogo rukava Dunaya v svyazi s sozdaniyem sudovogo khoda "Dunay–Chernoye more" cherez rukav Bystryy. Prychornomorskiy Ekolohichniy biuletен [Hydrochemical monitoring of the seashore of the Kiliya branch of the Danube in connection with the creation of the Danube-Black Sea ship passage through the Bystry branch. Prichornomorskiy Ecological Bulletin]. 2006;3–4:156–178 [in Russian].
 6. Sirenko LA, Yevtushenko MYu, Komarovskiy FYa. et al. Braginskogo LP, editor. Gidrobiologicheskii rezhim Dnestra i yego vodoyemov [Hydrobiological regime of the Dniester and its water bodies]. Kiyev: Nauk. dumka, 1992. 356 p. [in Russian].
 7. Goncharov AYu. Gidrokhimicheskiy rezhim i pervichnaya produktsiya fitoplanktona v rayone avariynogo vypuska stochnykh vod v Odesskom zalive. Ekologiya morya [Hydrochemical regime and primary production of phytoplankton in the area of emergency wastewater discharge in the Odessa Bay. Ecology of the sea]. 2001;58:31–36 [in Russian].
 8. Goncharov A Yu. Svyaz morfometricheskikh parametrov i vneshnego vodoobmena s pervichnoy produktsiyey v vodoemakh severo-zapadnogo Prichernomor'ya. Ekologiya morya. [Relationship between morphometric parameters and external water exchange with primary production in water bodies of the northwestern Black Sea region. Ecology of the sea]. 2005;68:31–36 [in Russian].
 9. Goncharov OYu. Conditions of Primary Production Development in Water Bodies of North-West Region of the Black Sea [unpublished PhD thesis on the Internet]. Sevastopol: Institute of Biology of Southern Seas; 2006 [cited 2022 Oct 24]. Available from: DOI: 10.13140/RG.2.2.21460.24962 [in Ukrainian].
 10. Goncharov OYu. Antropohennyi vplyv stantsiyi biolohichnoyi ochystky "Pivnichna" na Odes'ku zatoku i Khadzhybeys'kyy lyman v suchasnyy period [Anthropogenic influx of the biological treatment station "Pivnichna" to Odeska zatoka and Khadzhibeyskiy estuary in the current period] Proceedings of the Yevrointehratsiya ekolohichnoyi polityky Ukrayiny - European integration of the environmental policy of Ukraine; 2019, Odesa, UA: Odessa State Ecological University. 2019. p. 98–102 [in Ukrainian].
 11. Derezyuk NV, Konareva OP, Soltis IYe. Letniye tsveteniya fitoplanktona v Dnestrovskom limane (2003–2016 gg.) [Summer phytoplankton blooms in the Dniester Estuary (2003–2016)]: Transboundary Dniester River Basin Management: Platform For Cooperation And Current Challenges; Tiraspol, Moldova: Eco-Tiras; 2017. p. 96–100. Available from: <http://dspace.onu.edu.ua:8080/handle/123456789/11254> [in Russian].
 12. Zhukinskiy VN, Zhuravleva LA, Ivanov AI, Zaytseva YuP, editor. Dneprovsko-Bugskaya estuarnaya ekosistema [Dnieper-Bug estuarine ecosystem]. Kiev: Naukova dumka; 1989. 240 p. [in Russian].
 13. Kovaleva NV, Medinets VI. Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya fotosinteticheskikh pigmentov v Dnestrovskom limane v 2003–2014 gg. [Features of the spatial distribution of photosynthetic pigments in the Dniester estuary in 2003–2014] [Internet]. Proceedings; 2014 Oct 1-3; Odesa. ODEkU: Lymany pivnichno-zakhidnoho Prychornomor'ya: suchasnyi hidroekolohichniy stan, problemy vodnoho ta ekolohichnoho menedzhmentu ta shliakhy yikh vyrishennia; [cited 2022 Oct 3]; p. 93–95. Available from: <http://dspace.onu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/5389> [in Russian].
 14. Nesterova DA, Terenko LM, Terenko GV, Rusnak YeM, et al. Zaytsev YuP, Aleksandrov BG, Minicheva GG, editors. Fitoplankton. In: Severo-zapadnaya chast Chernogo morya: biologiya i ekologiya [Phytoplankton. North-Western part of the Black Sea: biology and ecology]. Kiyev: Naukova dumka; 2006:175–195 [in Russian].
 15. Zaytsev YuP, editor. Severo-zapadnaya chast' Chernogo mor'ya: biologiya i jekologiya [North-Western part of the Black Sea: biology and ecology]. Kiev: Naukova dumka; 2005. 701 p. [in Russian].
 16. Ukrainskiy VV, Popov YuI. Rayonirovaniye vod severo-zapadnoy chasti Chernogo morya po termokhalinnyim pokazatelyam [Zoning of the waters of the northwestern part of the Black Sea according to thermohaline indicators]. Proceedings of the International Symposium: The Black Sea Ecological Problems; 2003; Odesa, UA: OTSENTI; 2003, p. 374–377 [in Russian].
 17. Garkavaya GP, Bogatova YI, Berlinskii NA, Bolshakov VN, Goncharov AYu. Long-term variations in the biogenic matter runoff of the Dnestr River. Water Resources. 2008;35(6):708–715. DOI: 10.1134/S0097807808060109.
 18. Goncharov OYu. Variation of rivers runoff as an important factor of nutrient regime of the Black Sea. Proceedings of the Intern. Conf. "Transboundary Dniester River Basin Management: Platform for Cooperation and Current Challenges"; 2017; Tiraspol, Moldova: Eco-Tiras. 2017. p. 2–64.
 19. Lisitsyn AP. The marginal filter of the ocean. Oceanology. 1995;34 (5): 671–682.
-

20. Friedrich J, Janssen F, Aleynik D, et al. Investigating hypoxia in aquatic environments: Diverse approaches to addressing a complex phenomenon. *Biogeosciences*. 2014;11(4):1215–1259. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1215-2014>.

21. Snigirov S, Kvach Yu, Goncharov O, Sizo R, Sylantsev S. Hydrology and parasites: What divides the fish community of the lower Dniester and Dniester estuary into three? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019;217:120–131.

22. Zaitsev YuP, Alexandrov BG, Berlinsky NA, Zenetos A. The Black Sea an oxygen-poor sea. In: *Europe's biodiversity – biogeographical regions and seas* [Internet]. Environmental issue report. Published by EEA (European Environment Agency). Copenhagen; 2002 [cited 2022 Oct 20]. Available from: http://reports.eea.eu.int/report_2002_0524_154909/en.

Стаття надійшла 31.10.2022