



УДК 574: 582.261/.279 (262.5) 504
DOI 10.47143/1684-1557/2026.1.3

ПРОГНОЗНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ УКРАЇНСЬКОГО СЕКТОРУ ЧОРНОГО МОРЯ НА ПІДСТАВІ ЗМІНИ МОРФОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ІНДИКАТОРІВ АВТОТРОФНИХ УГРУПОВАНЬ ПІД ВПЛИВОМ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ І НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ (ЧАСТИНА 2: ПРОГНОЗ)

Мінічева Г.Г. – чл.-кор., д.б.н., с.н.с., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2550-5369>

Тучковенко Ю.С. – д.геогр.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

Зотов А.Б. – к.б.н., с.н.с., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8141-0009>

Соколов Є.В. – к.б.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1342-1109>

Калашнік К.С. – к.б.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1845-249X>

Маринець Г.В. – м.н.с., ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5740-9308>

ДУ «Інститут морської біології Національної академії наук України»

minicheva@ukr.net

Ця робота є логічним продовженням (Частина 2: Прогноз) попередніх досліджень авторського колективу, в яких були визначені статистично достовірні зв'язки між морфофункціональними індикаторами різних життєвих форм водної рослинності морської екосистеми Одеського району ПнЗЧМ і середньомісячними об'ємами річкового стоку Дунаю і Дніпра у весняні місяці року (березень–червень) за довгостроковий період з початку XXI ст. (Мінічева та ін. 2025). Методологічно робота базується на дослідженні функціонально пов'язаної системи: річковий стік – морські автотрофи – екологічний стан моря, яка використана як логічний ланцюг прогнозу оцінки.

Головна мета другої частини роботи полягає в отриманні прогнозних оцінок очікуваних змін категорій екологічного статус-класу (ESC) морських вод ПнЗЧМ, пов'язаних із впливом зміни кліматичних умов на стік річок Дунай і Дніпро у період до 70-х років XXI ст. за кліматичним сценарієм RCP8.5. Він базується на тому, що до 60–70-х років XXI ст. слід очікувати у весняний період: зменшення стоку р. Дунай за помірними оцінками у середньому на 14%, за максимальними – до 30%; зменшення стоку р. Дніпро у середньому за помірними оцінками на 10% (до 16% у травні), за максимальними – до 30% порівняно з референтним періодом до початку століття. З використанням класифікаційних шкал визначення категорій ESC за стандартами Водної Рамкової Директиви та Морської стратегії і розрахованих за допомогою статистично достовірних зв'язків значень морфофункціональних індикаторів макрофітів, мікроепіфітону, фітопланктону та супутникових даних площ цвітіння за концентрацією Chl-*a* були встановлені прогнозні оцінки очікуваних категорій ESC за сценаріями А (помірне скорочення стоку) та Б (максимальне скорочення стоку) до 60–70-х років XXI ст.

За морфофункціональними індикаторами всіх життєвих форм автотрофів були отримані прогнозні оцінки покращення категорій ESC у зонах впливу річок Дунай і Дніпро на наступний 40-річний період, яке буде супроводжуватись позитивними змінами в розвитку прибережної та шельфової рослинності. Ці тенденції будуть сприяти відновленню цінних чорноморських видів макрофітів: у прибережній зоні – популяції бурої водорості бородача з роду *Cystoseira* s.l., у шельфовій зоні – популяції червоних водоростей філофори з роду *Phyllophora* Greville.

Прогнозні оцінки зміни ESC морської екосистеми ПнЗЧМ за індикатором Chl-*a* показали, що до 60–70-х років XXI ст. буде відбуватися скорочення площ евтрофованих зон. Для категорії «Поганий» (Poor) на -8,4 і -18,8 (%) та для категорії «Дуже поганий» (Bad) на -16,9 і -29,6 (%) відповідно до сценаріїв А і Б.

Крім кліматичних змін, на ESC морської системи можуть значно впливати активні воєнні дії, які викликають екологічні катастрофи, такі як, наприклад, руйнування греблі Каховського водосховища. В результаті втрати регулюючої ролі Каховського водосховища, за попередньою прогнозу оцінкою на основі показника *S/W* угруповань макрофітів, у зоні впливу р. Дніпро може відбутися зниження категорії ESC від «Високий» (High) до «Задовільний» (Moderate), за показником C_p мікрофітів – від категорії «Задовільний» (Moderate) до «Поганий» (Poor). Оцінки за індикаторами фітопланктону також свідчать про можливість переходу з категорії «Високий» (High) до «Задовільний» (Moderate) і підвищенням нестабільності екосистеми.

Ключові слова: автотрофні угруповання, річковий стік, прогнозні оцінки, екологічний стан, Чорне море, північно-західна частина.

Вступ

Гідрологічні та екологічні процеси в північно-західній частині Чорного моря (ПнЗЧМ) та екологічний стан її вод значною мірою визначаються річковим стоком Дунаю, Дніпра, Південного Бугу і Дністра (Северо-западная часть ... 2006). Річковий стік є головним джерелом антропогенного забруднення і евтрофування цієї частини Чорного моря. З ним до моря надходить велика кількість біогенних речовин, які сприяють інтенсивному первинному продукуванню органічної речовини угрупованнями автотрофів, періодичному виникненню явищ «цвітіння» фітопланктону, розвитку гіпоксійних і аноксійних зон у придонному шарі в літньо-осінню пору року, що, своєю чергою, призводить до загибелі морських біоресурсів та зниження екологічного статусу чорноморської екосистеми. Тому для України принципово важливим є дослідження і прогнозування впливу коливань стоку великих річок на екологічний стан і біоресурси українського сектору Чорного моря.

В останні десятиріччя зміни річкового стоку значною мірою зумовлені впливом кліматичних чинників, які проявляються насамперед у зростанні середньорічної температури повітря, збільшенні випаровування на фоні незмінної річної суми атмосферних опадів або її зменшення, нерівномірному розподілі кількості атмосферних опадів впродовж року, збільшенні повторюваності інтенсивних паводків та водночас посушливих періодів.

Натепер досягнуто значного прогресу в методології отримання прогностичних оцінок глобальних і регіональних змін клімату (ENSEMBLES ... 2009; Warszawski et al. 2013; Jacob et al. 2014; Kok et al. 2015) і, як наслідок, зумовлених ними змін річкового стоку. Модельні проєкції зміни метеорологічних характеристик клімату, отримані за допомогою чисельних моделей змін клімату, використовуються як вхідна метеорологічна інформація для оцінки зміни водних ресурсів і розрахунку характеристик річкового стоку за допомогою сучасних гідроекологічних моделей (Krysanova, Wechsung and Hattermann 2005; Mauser and Bach 2009; Schmied 2017; Probst and Mauser 2023).

Річковий стік, збагачений біогенними елементами, потрапляє в морську екосистему, впливає на швидкість первинно-продукційного процесу, який реалізується у процесі функціонування різних життєвих форм автотрофних угруповань (фітопланктон, макрофітобентос, мікроепіфітон). Швидкість первинно-продукційного процесу в морській екосистемі впливає не тільки на рівень евтрофування (Ménesquen and Lacroix 2018), але і на загальний екологічний стан морської екосистеми, оцінка якого в українському секторі Чорного моря після підпи-

сання Угоди про асоціацію між Україною та ЄС (https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text) повинна проводитись за стандартами європейських водних директив (WFD 2000/60/EC; MSFD 2008/56/EC) та оцінюватись у категоріях екологічного статус-класу (Ecological Status Class – ESC). Функціонально пов'язана система – річковий стік – морські автотрофи – екологічний стан моря – може бути використана як логічний ланцюг прогнозовної оцінки. Найбільш важливим методологічним питанням в аналізі цього ланцюга є відповідні індикатори, за допомогою яких буде проводитись оцінка реакції різномірних життєвих форм автотрофів. Головною вимогою до таких індикаторів повинна бути *функціональність* – властивість, що забезпечує можливість кількісного обліку інтенсивності первинно-продукційного процесу, яку виконують у морській екосистемі автотрофні угруповання різних життєвих форм. Для вирішення такого методологічного завдання були використані морфофункціональні показники водної рослинності для одно- та багатоклітинних водоростей планктону та бентосу (Мінічева, Зотов, Косенко 2003). Для вирішення завдання прогнозовної оцінки зміни екологічного стану морської екосистеми залежно від змін клімату і викликані ними зміни об'єму річкового стоку з комплексу морфофункціональних показників водної рослинності було використано базовий індикатор – питому поверхню (S/W , $m^2 \cdot kg^{-1}$), який кількісно відображає функціональну активність виду залежно від розміру, морфологічної структури та тривалості життєвого циклу. Цей індикатор є універсальним для різних життєвих форм автотрофів і стосовно нього розроблені національні шкали визначення категорій ESC для чорноморської екосистеми (Minicheva 2013; Minicheva et al. 2014).

У першій частині роботи (Мінічева та ін. 2025) були визначені статистично достовірні зв'язки між морфофункціональними індикаторами різних життєвих форм водної рослинності морської екосистеми Одеського району ПнЗЧМ і середньомісячними об'ємами річкового стоку Дунаю і Дніпра у весняні місяці року (березень–червень) за довгостроковий період з початку ХХІ ст. Це дозволяє на основі прогностичних оцінок змін місячних і сезонних об'ємів річкового стоку перейти до визначення можливих змін у значеннях індикаторних морфофункціональних показників автотрофів, а через них – до категорій ESC морської екосистеми.

Мета роботи полягає в отриманні прогностичних оцінок очікуваних змін категорій ESC морських вод ПнЗЧМ, пов'язаних з впливом зміни кліматичних умов на стік річок Дунай і Дніпро у період до 70-х років ХХІ ст., на підставі попередньо встановлених

зв'язків (Мінічева та ін. 2025) між морфофункціональними індикаторами угруповань різних життєвих форм автотрофів і середньомісячними об'ємами річкового стоку у весняний період.

Матеріали та методи досліджень

У роботі використовуються регресійні рівняння значущого кореляційного зв'язку між об'ємами річкового стоку Дунаю і Дніпра і морфофункціональними показниками автотрофних угруповань фітопланктону, макрофітів та мікроепіфітів у весняні місяці року в Одеському районі північно-західної частини Чорного моря, встановлені в першій частині цієї роботи (Мінічева та ін. 2025). Зокрема, для фітопланктону були отримані рівняння, наведені в таблиці 1, а для макрофітів і мікроепіфітів – у таблиці 2.

Відповідність значень морфофункціональних індикаторів автотрофних угруповань категоріям екологічного статус-класу (ESC) морських вод встановлювалась згідно зі шкалами, визначеними для макрофітів (Minicheva 2013) і мікроепіфітону (табл. 3)

у відповідності до стандартів Водних Директив ЄС (WFD 2000/60/EC; MSFD 2008/56/EC).

Для індикаторів фітопланктону – згідно зі шкалами, розробленими у відповідності до стандартів (WFD 2000/60/EC; MSFD 2008/56/EC; Методика ... 2019; EMBLAS. Final scientific report ... 2022), а також з використанням шкал, розроблених на основі багаторічних баз даних фітопланктону для субрегіону «Прибережні води Дунай-Дніпровського міжріччя» (табл. 4).

Прогнозні оцінки очікуваних змін стоку річок Дніпро і Дунай внаслідок зміни клімату протягом XXI ст. надавались на основі аналізу даних літературних джерел, які викладені в окремому розділі.

У першій частині роботи (Мінічева та ін. 2025) також були встановлені статистично значущі лінійні регресійні залежності між середніми за весняний сезон (березень–червень) місячними об'ємами сумарного стоку Дунаю і Дніпра та площами акваторії ПнЗЧМ, на яких концентрації хлорофілу-а (*Chl-a*) перевищували порогові значення 2,23 мг·м⁻³ та 4,63 мг·м⁻³.

Таблиця 1

Кореляційний аналіз регресійної залежності між стоком Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$) та Дніпра ($Q_{\text{Дніпро}}$), км³·міс⁻¹, і показниками фітопланктону ПнЗЧМ (біомаса (B , мг·м⁻³), питома поверхня (S/W , м²·кг⁻¹))

Місячний об'єм стоку – предиктор	Показники фітопланктону (предиктанти прогнозу)	
	у квітні	у червні
Березень	$B=2,008Q_{\text{Дунай}}^2-62,382Q_{\text{Дунай}}+706,04$ $B=40,562Q_{\text{Дніпро}}^2-212,4Q_{\text{Дніпро}}+473,14$	–
Квітень	–	$B=5,3024Q_{\text{Дунай}}^2-175,58Q_{\text{Дунай}}+1789,4$
Травень	–	$B=2,7771Q_{\text{Дунай}}^2-37,238Q_{\text{Дунай}}+247,52$
Червень	–	$S/W=-72,894Q_{\text{Дніпро}}^2+753,25Q_{\text{Дніпро}}-586,68$

Таблиця 2

Регресійні рівняння значущої кореляційної залежності між місячними об'ємами стоку Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$) та Дніпра ($Q_{\text{Дніпро}}$), км³·міс⁻¹, у весняні місяці року і морфофункціональними показниками макрофітів та мікроепіфітів в Одеському районі ПнЗЧМ (питома поверхня (S/W , м²·кг⁻¹; внесок епіфітного компонента C_e , %)

Місячні об'єми стоку річок – предиктор	Показники фітобентосу (предиктанти прогнозу)	
	макрофіти	мікроепіфітон
$Q_{\text{Дунай}}$	$(S/W)=4,1943 Q_{\text{Дунай}}$	$(C_e)=3,211 Q_{\text{Дунай}}$
$Q_{\text{Дніпро}}$	$(S/W)=20,87 Q_{\text{Дніпро}}$	$(C_e)=15,127 Q_{\text{Дніпро}}$

Таблиця 3

Шкала визначення меж категорій ESC для індикатора внесок епіфітного компонента (C_e , %) для морських прибережних екосистем

	High (Високий)	Good (Добрий)	Moderate (Задовільний)	Poor (Поганий)	Bad (Дуже поганий)
C_e	<20	21≤ C_e ≤45	46≤ C_e ≤70	71≤ C_e ≤90	>91

Таблиця 4

Шкала визначення меж категорій ESC для індикатора питома поверхня угруповань фітопланктону (S/W , м²·кг⁻¹) для субрегіону «Прибережні води Дунай-Дніпровського міжріччя»

	High (Високий)	Good (Добрий)	Moderate (Задовільний)	Poor (Поганий)	Bad (Дуже поганий)
S/W	<798	798≤ S/W ≤1267	1268≤ S/W ≤2000	2001≤ S/W ≤2770	>2770

Для надання прогностичної оцінки очікуваних у найближчому майбутньому кліматичному періоді зміни площ акваторій ПнЗЧМ з різним ступенем розвитку евтрофікації підхід, запропонований раніше (Мінічева та ін. 2025), було розвинуто шляхом визначення регресійних рівнянь, які відображають наявний кореляційний зв'язок між середньомісячним стоком річок у весняний період (березень–червень, 2000–2020 рр.) та площами акваторій моря з концентраціями *Chl-a*, які перевищують порогові значення меж екологічних статус-класів відповідно до Водної рамкової директиви ЄС (WFD 2000/60/EC). Граничні значення концентрацій *Chl-a* для визначення меж екологічних статус-класів прийнято згідно з нормативним документом (Методика ... 2019). Відповідно до нього були взяті граничні значення *Chl-a* екологічного стану масивів поверхневих вод (прибережні води – Додаток 15), репрезентативні для умов ПнЗЧМ. Згідно з отриманими значеннями виділяють п'ять класів екологічного стану: I – високий ($Chl-a < 1,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$), II – добрий ($1,5\text{--}2,05 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$), III – задовільний ($2,06\text{--}3,19 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$), IV – поганий

($3,2\text{--}7,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) та V – дуже поганий ($>7,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$). Площі зон кожного статус-класу розраховувались як різниця між площами акваторій з перевищенням двох суміжних порогових значень *Chl-a* ($1,5$; $2,06$; $3,2$ та $7,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$), що відповідають нижнім межах класів II–V.

Оцінка взаємозв'язку між сумарним стоком річок Дунай і Дніпро та масштабами цвітіння фітопланктону в ПнЗЧМ виконувалась за допомогою оброблених даних супутникових спостережень за концентрацією *Chl-a* з набору даних CMEMS (2025). На основі отриманих даних щодо просторового розподілу концентрацій *Chl-a* були розраховані часові ряди площ перевищення кожної межі і побудовані нові, порівняно з раніше запропонованими (Мінічева та ін. 2025), регресійні рівняння залежності цих площ від середнього місячного об'єму стоку Q ($\text{км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}$) за сезон березень–червень (рис. 1). Отримані регресійно-кореляційні рівняння представлені в таблиці 5.

Таким чином, чотири кумулятивні рівняння регресії повністю описують розподіл площ між

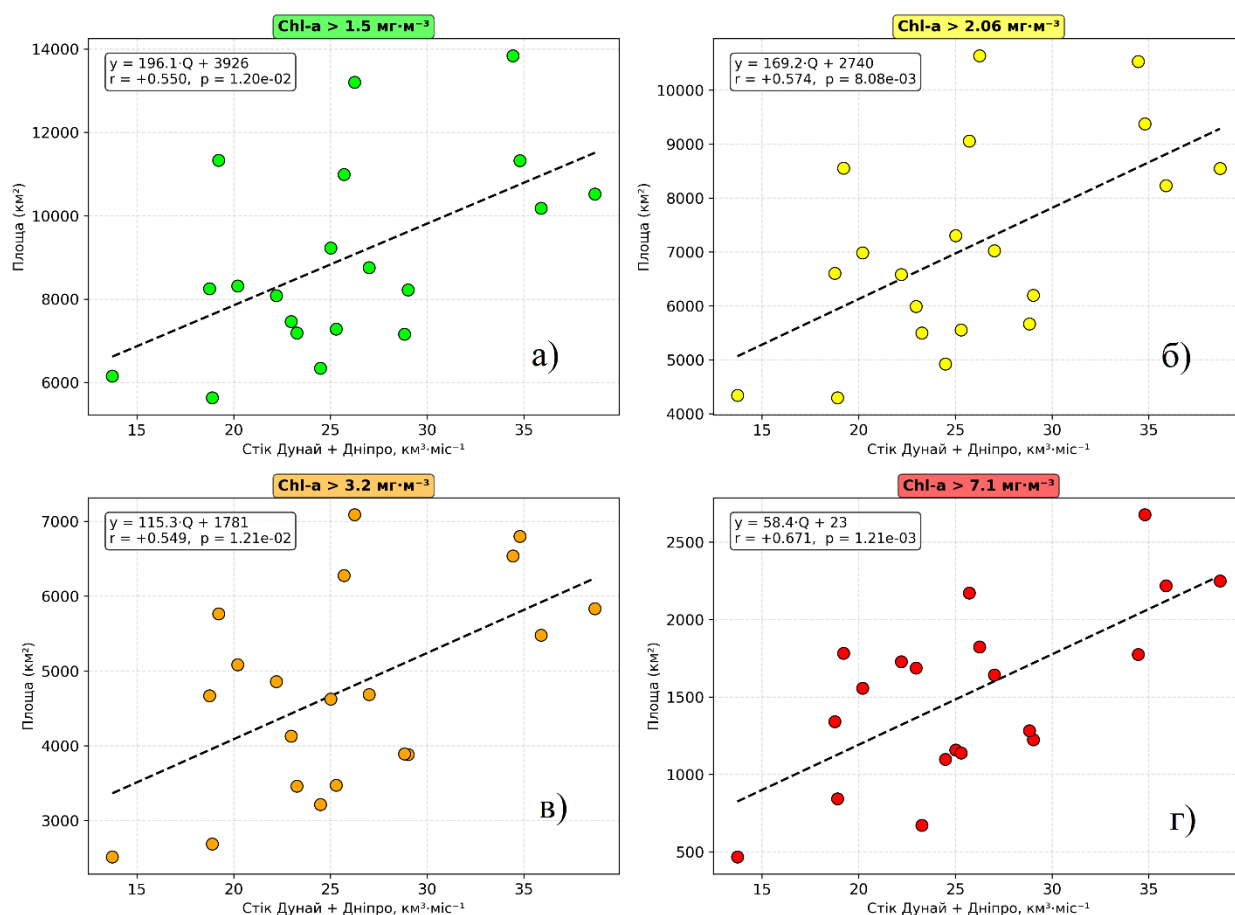


Рис. 1. Статистичний зв'язок між середніми за весняний сезон (березень–червень) місячними об'ємами річкового стоку в період 2000–2020 рр. і площею акваторії ПнЗЧМ, на якій концентрації хлорофілу-а перевищували порогові значення *Chl-a* ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$): 1,5 (а), 2,06 (б), 3,2 (в) і 7,2 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$

Регресійні рівняння залежності площ акваторії ПнЗЧМ із перевищенням порогових значень *Chl-a* (мг·м⁻³) від сумарного середнього місячного об'єму стоку р. Дунай і р. Дніпро *Q* (км³·міс⁻¹) у весняний сезон (березень–червень), 2000–2020 рр.

Межа класів	Поріг <i>Chl-a</i> , мг·м ⁻³	Рівняння	<i>r</i>	<i>p</i> *
I/II	1,50	$F=196,1Q+3925,6$	+0,550	0,012
II/III	2,06	$F=169,2Q+2739,9$	+0,574	0,008
III/IV	3,20	$F=115,3Q+1780,6$	+0,549	0,012
IV/V	7,10	$F=58,4Q+22,5$	+0,671	0,001

p* – рівень статистичної значущості (Field 2013): **p*<0,05; *p*<0,01. *F* – площа (км²), *Q* – сумарний (Дунай і Дніпра) середній місячний об'єм стоку (км³·міс⁻¹) у весняний період

усіма п'ятьма класами: площа кожного окремого класу. Усі чотири рівняння є статистично значущими (*p*<0,05), що підтверджує правомірність їх використання для прогнозних розрахунків. Слід підкреслити, що порогові значення дозволили отримати значущу кореляцію для межі класів IV/V (*Chl-a*>7,10 мг·м⁻³; *r*=+0,671, *p*=0,001), яка є найбільш екологічно критичною зоною з точки зору стандартів (WFD 2000/60/EC).

Отримані регресійні рівняння були використані для прогнозування площ зон евтрофікації відповідних статус-класів у найближчий майбутній кліматичний період (до 2060–2070 рр.) за сценарними оцінками зміни річкового стоку Дунаю і Дніпра (табл. 6).

Результати та обговорення

Зміни річкового стоку спричинені кліматичними чинниками

У першій частині цієї роботи (Мінічева та ін. 2025) були представлені графіки багаторічної зміни у XXI ст. сумарних за роками об'ємів стоку річок Дунай і Дніпро, а також у період весняного водопілля, які показали, що має місце тенденція зменшення цих величин з часом, що зумовлено змінами клімату, які відбуваються на їх водозборах. Для прогнозування впливу цих змін на морфофункціональні характеристики автотрофів у майбутньому були використані прогностичні оцінки змін стоку річок за сценарієм RCP8.5 (IPCC 2013). За цим сценарієм викиди парникових газів будуть зростати протягом усього століття. Це найжорсткіший (песимістичний) сценарій найбільших викидів парникових газів (емісій), який передбачає розвиток людства за принципом «гроші не пахнуть» (*business as usual*), без значних трансформацій способу життя.

Використовуються прогностичні оцінки стоку р. Дунай у різні кліматичні періоди XXI ст., виконані із застосуванням еко-гідрологічної моделі SWIM (Soil and Water Integrated Model) (Stagl and Hattermann 2015). До аналізу залучались кліматичні дані з проєкту ISIMIP (2020), отримані в результаті симуляції за 5 глобальними кліматич-

ними моделями (CMIP5 ESMs): HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M та NorESM1-M (Hempel et al. 2013). У цьому проєкті для кліматичного періоду 2031–2060 рр. сценарій RCP8.5 відповідає рівню глобального потепління з доіндустріального періоду приблизно на +2,5°C.

Моделльні траєкторії проєкту ISIMIP для станції Ceatal Izmail (Ізмаїл) у Нижньому Дунаї прогноують за сценарієм RCP8.5 зменшення стоку у весняні місяці (з березня по травень) у найближчому майбутньому кліматичному періоді 2031–2060 рр. стосовно базового періоду 1971–2000 рр. на 8–18% (у середньому 14%) (Stagl and Hattermann 2015).

У роботі використані прогностичні оцінки зміни у XXI ст. стоку р. Дніпро з роботи «Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine» (Didovets et al. 2020). Моделювання водного стоку річок на період до 2100 року виконувалось з використанням глобальної гідрологічної моделі WaterGAP2 (Müller 2017), яка пройшла калібрування на основі гідрологічних даних Світового центру гідрологічних даних (Global Runoff Data Centre (GRDC)) (<http://grdc.bafg.de>). Як вхідна інформація для гідрологічного моделювання використовувались кліматичні проєкції (середні добові значення температури, опадів та сонячної радіації) з проєкту ISIMIP (2020), які були отримані з використанням глобальних моделей HadGEM2-ES, MIROC5, IPSL-CM5A-LR та GFDL-ESM2M і відкориговані на основі даних реаналізу EWEMBI (Lange 2018, 2019).

Згідно з результатами моделювання стоку р. Дніпро за сценарієм RCP8.5 для двох майбутніх періодів (2041–2070 рр. та 2071–2100 рр.), порівняно з референтним 30-річним періодом (1971–2000 рр.), найбільше зниження водності очікується у травні: на 16% у період 2041–2070 рр. і на 24% у віддаленій перспективі для періоду 2071–2100 рр.

Оновлені прогностичні оцінки кліматичних змін щодо стоку Нижнього Дніпра з урахуванням руйнування Каховського водосховища вказують на збільшення стоку через зменшення втрат на випаровування з площі водної поверхні і фільтрацію

(Snizhko et al. 2023). У результаті прогнозується зменшення стоку Дніпра на 1% у березні, 7,8% у квітні, 16,5% у травні і 13,3% у червні для найближчого майбутньому кліматичного періоду 2041–2070 рр. порівняно з референтним періодом 1971–2000 рр.

Оскільки зазначені вище зміни річкового стоку віднесені до базового періоду 1971–2000 рр., а в цій роботі використовуються дані щодо морфофункціональних характеристик автотрофів, які були отримані після 2000 року, було виконано оцінки змін середніх місячних об'ємів стоку Дніпра і Дунаю в період 2000–2020 рр. порівняно з періодом 1981–2000 рр., які базуються на інших даних спостережень (Державний водний кадастр ... 2023 а, б).

Встановлено, що у вказаний період уже відбулись зміни стоку Дніпра/Дунаю (табл. 6, сценарій А): на -3/+7% у березні, -16/0% у квітні, -15/-14% у травні і -18/-10% у червні. З таблиці 6 видно, що якщо середні багаторічні місячні об'єми стоку р. Дунай, які очікуються у найближчій перспективі, менші за величиною, ніж спостережені в період 2000–2020 рр., то для р. Дніпро спостережені об'єми стоку близькі або менші ніж прогнозовані. Це може пояснюватись врахуванням у прогнозі змін стоку Дніпра, які відбуваються внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС.

Руйнування греблі Каховського водосховища у 2023 році має довгострокові наслідки щодо впливу на гідрологічні і гідроекологічні умови в ПнЗЧМ. Насамперед вони полягають у збільшенні об'ємів

надходження трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману до моря за умов середнього за водністю року, а також у перерозподілі його по місяцях року за відсутності регулювання стоку Каховським водосховищем.

Відзначається, що через перетворення водосховища з великою площею водної поверхні на річку відбулося значне зменшення втрат води на випаровування одночасно зі зменшенням надходження води на водне дзеркало водосховища з атмосферними опадами (Чорноморець та ін. 2023). Також майже в три рази зменшились фільтраційні втрати води у ложі водосховища і був припинений забір води в господарчих цілях (для промислового і сільськогосподарського виробництва, водозабезпечення і водовідведення). В результаті збільшення стоку Дніпра у створі колишньої Каховської ГЕС оцінено щонайменше у 10%. Така ж оцінка збільшення стоку Нижнього Дніпра наводиться й іншими науковцями (Snizhko et al. 2023).

Каховське водосховище виконувало функцію регулювання внутрішньорічного надходження стоку Дніпра до Дніпровсько-Бузького лиману і, відповідно, до моря. В період весняної повені воно наповнювалось водою, зменшуючи надходження річкових вод до моря, а в період літньої межени, навпаки, за рахунок скиду накопиченої у водосховищі води забезпечувало екологічні попуски води до гирлової ділянки Дніпра і Дніпровського лиману для запобігання погіршенню якості води у них шляхом балансування процесів самозбруднення і самоочищення.

Таблиця 6

Місячні об'єми стоку річок Дніпро і Дунай (км³·міс⁻¹) у весняні місяці в різні кліматичні періоди: референтний 1981–2000 рр., фактичні в період 2000–2020 рр.; прогнозні оцінки для найближчих майбутніх кліматичних періодів (2031–2060 рр. для Дунаю і 2041–2070 рр. для Дніпра) за сценарієм RCP8.5; прогнозовані граничні оцінки зменшення водних ресурсів Дніпра (в період 2021–2050 рр.) за сценарієм RCP8.5 і Дунаю (в період 2031–2070 рр.) за сценарієм A1B (IPCC 2007)

Періоди	1981–2000 референтні	2000–2020 фактичні	2031–2060* 2041–2070 прогнозовані (сценарій А)	2021–2050 2031–2070* мінімальний прогнозований (сценарій Б)
Місяці	Дніпро			
березень	4,34	4,23	4,30	3,04
квітень	4,09	3,42	3,78	2,87
травень	4,79	4,07	4,00	3,35
червень	3,40	2,77	2,94	2,37
У середньому за паводковий період	4,16	3,62	3,76	2,91
Місяці	Дунай			
березень	19,85	21,24	18,26	13,90
квітень	24,77	24,68	21,30	17,34
травень	25,14	21,75	20,61	17,60
червень	19,57	17,65	15,07	13,70
У середньому за паводковий період	22,33	21,33	18,81	15,64

* – для р. Дунай

Порівняння медіанних значень середніх місячних об'ємів стоку Дніпра в період до введення в експлуатацію греблі Каховської ГЕС (1950–1958 рр.) з періодом 1981–2000 рр. показало, що у весняні місяці стік річки був на 22% меншим у березні, але більшим на 36% у квітні, 64% – у травні і 24% – у червні. Отже, середні місячні об'єми стоку дорівнювали 3,38; 5,56; 7,85 і 4,22 км³·міс⁻¹, відповідно, а у середньому за паводковий період – 5,25 км³·міс⁻¹.

Зауважимо, що прогнольні оцінки змін річкового стоку у різні кліматичні періоди XXI ст. постійно уточнюються дослідниками з урахуванням отриманих нових даних спостережень. Наприклад, у стадії дослідної експлуатації знаходиться сервіс Climate & Water – майбутні водні ресурси України в умовах зміни клімату (<https://climatewater.uhmi.org.ua>), у якому прогнольні оцінки змін середнього об'єму стоку річок басейну Дніпра надаються для прогнозного періоду 2021–2040 рр. стосовно референтного періоду 1991–2020 рр.

У відповідності до мети цієї роботи для оцінки максимально можливих змін екологічного статусу морської екосистеми Одеського району ПнЗЧМ додатково були використані оцінки змін водних ресурсів р. Дніпро (на період 2021–2050 рр.) і р. Дунай (на період 2031–2070 рр.) стосовно даних базового періоду до 1989 р., які отримані із використанням балансово-стохастичної моделі «клімат–стік», що дозволяє враховувати водогосподарчу діяльність на водозборі (Loboda and Bozhok 2019; Лобода та Козлов 2020). Згідно з цими оцінками зменшення водних ресурсів у басейні Дунаю і Дніпра може досягати 30% (табл. 6, сценарій Б). В роботі використовуються ці значення для «оцінки зверху» (тобто максимальних) можливих змін морфофункціональних показників автотрофів і екологічного статусу морської екосистеми, викликаних зменшенням річкового стоку Дунаю і Дніпра внаслідок зміни клімату.

Отримані прогностичні оцінки зміни річкового стоку протягом XXI ст. і регресійні рівняння, які пов'язують значення морфофункціональних індикаторів автотрофних угруповань з місячними об'ємами річкового стоку Дунаю і Дніпра у весняний період року, були використані для надання прогнозованої оцінки зміни категорій ESC морських вод, спричинених змінами річкового стоку під дією кліматичних чинників. Основою для таких прогностичних оцінок став розрахунок на основі прогностичних рівнянь, отриманих у першій частині цієї роботи, очікуваних змін у значеннях морфофункціональних індикаторів усіх життєвих форм морської рослинності, пов'язаних з річковим стоком, і визначенням на їх основі за класифікаційними шкалами відповідної категорії ESC.

Прогнозна оцінка зміни морфофункціональних індикаторів автотрофних угруповань і екологічного стану морських вод внаслідок зміни річкового стоку у XXI ст.

Макрофіти і мікроепіфітон. З огляду на референтні (1981–2000 рр.) та сучасні дані (2000–2024 рр.) середніх значень місячного стоку річок Дунай і Дніпро в період максимальної функціональної активності автотрофних угруповань (березень–червень) (див. табл. 2, 6) були розраховані очікувані значення середньої питомої поверхні флористичного складу (S/W) угруповань макрофітів. У відповідності до національних оціночних шкал, які поєднують значення S/W флористичного складу ценозів макрофітів (Minicheva 2013) і значення C_e , як індикатора мікроепіфітону (табл. 3), з 5 категорій ESC, що відповідають вимогам Водної Рамкової Директиви ЄС для проведення державного морського моніторингу України (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Text>), були визначені очікувані категорії ESC для акваторій українського сектору Чорного моря, які перебувають під впливом річкового стоку Дунаю та Дніпра, у майбутні кліматичні періоди за сценарними оцінками А (Stagl and Hattermann 2015; Didovets et al. 2020; Snizhko et al. 2023) і Б (Loboda and Bozhok 2019; Лобода та Козлов 2020) (див. табл. 6).

Прогнольні оцінки показали, що у разі скорочення об'ємів стоку р. Дунай за сценарними оцінками А (помірний) і Б (екстремальний) у зоні впливу дунайських річкових вод з причин скорочення потоків надходження поживних речовин у морське середовище буде спостерігатись зниження інтенсивності функціонування угруповань макрофітів зі скороченням морфофункціонального індикатора питомої поверхні (S/W) приблизно з 90 м²·кг⁻¹ у сучасний період до 80–65 (м²·кг⁻¹) у найближчий майбутній кліматичний період (до 2070 р.). Тенденція до зниження рівня первинно-продукційного процесу донної рослинності, пов'язана зі змінами клімату, відповідно, буде супроводжуватись поліпшенням екологічного стану моря з підняттям категорії ESC від сучасного «Задовільний» (Moderate) до «Доброго» (Good) (табл. 7).

Для зони впливу стоку р. Дніпро прогнольні оцінки екологічного стану морських вод за сценарними оцінками свідчать про збереження або можливе покращення екологічного стану прилеглої морської акваторії порівняно із сучасним станом. Якщо у сучасний період середнє значення функціональної активності (S/W) макрофітобентосу в зоні впливу стоку р. Дніпро у середньому близьке до 76 м²·кг⁻¹, то за сценарієм А в майбутньому може відбутись незначне збільшення питомої поверхні угруповань макрофітів на декілька одиниць (78,5 м²·кг⁻¹), але

ESC залишиться в категорії «Добрий» (Good). За сценарієм **Б** буде відбуватись зменшення середньої екологічної активності угруповань макрофітів приблизно на $20 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$, що, за експертною оцінкою, ймовірно, може призвести в найближчому майбутньому (до 70-х років ХХІ ст.) до переходу прилеглих до Дніпровсько-Бузького лиману морських акваторій у категорію «Високий» (High) (див. табл. 7).

Прогнозні оцінки зміни значень морфофункціонального індикатора мікроепіфітону C_e («внесок епіфітного компонента») свідчать, що за цим показником категорія екологічного статус-класу у прогнозованих за сценаріями **А** і **Б** об'ємах весняного стоку р. Дунай, порівняно із сучасною, не зміниться і буде відповідати категорії «Задовільний» (Moderate). Хоча значення самого показника зменшиться у разі реалізації сценарію **Б** на 27% і наблизиться до граничного для категорії «Добрий» (Good). Щодо впливу р. Дніпро, то значення показника C_e у реалізації сценарію **Б** зменшиться на 20% і категорія ESC буде відповідати статусу «Добрий» (Good) (див. табл. 7).

Аналіз та порівняння прогнозних оцінок очікуваних категорій ESC, отриманих на основі морфофункціональних індикаторів макро- і мікроскладової бентосних автотрофних угруповань внаслідок зміни стоку річок Дунай і Дніпро, свідчить про його різний вплив на первинно продукційні процеси прибережної рослинності Дунай-Дніпровського межиріччя, а також про різний відгук угруповань макрофітів і мікроепіфітону на зміну об'єму річкового стоку. За сценарієм **А** річковий стік Дунаю порівняно з референтним періодом (1981–2000 рр.) зменшиться в абсолютному значенні на $3,52 \text{ (км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}\text{)}$, стік Дніпра – на $0,4 \text{ (км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}\text{)}$, за сценарієм **Б** – на $6,62$ та $1,25 \text{ (км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}\text{)}$ відповідно. Але відгук перебудови морфофункціональної організації прибережних макро- і мікрокомпонентів донної рослинності буде мати різний ступінь відповідної реакції на зміни стоку Дунаю і Дніпра. Розрахунки відносного зниження порівняно з референтним періодом (1981–2000 рр.) значень індикаторів макрофітів і мікроепіфітону для сценаріїв **А** і **Б** у середньому показали зменшення у 3,8 рази під впливом зміни стоку

Таблиця 7

Прогнозні оцінки зміни категорій ESC акваторій українського сектору Чорного моря, які перебувають під впливом річкового стоку Дунаю та Дніпра, залежно від сценарних оцінок його зміни в найближчі майбутні кліматичні періоди ХХІ ст. (див. табл. 1), за значеннями морфофункціональних індикаторів макрофітів (S/W) та мікроепіфітів (C_e)

Період	Акваторії впливу									
	р. Дунай					р. Дніпро				
	Q , $\text{км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}$	Макрофіти		Мікроепіфіти		Q , $\text{км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}$	Макрофіти		Мікроепіфіти	
S/W , $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$		Категорія екологічного статус-класу (ESC)	C_e , %	Категорія екологічного статус-класу (ESC)	S/W , $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$		Категорія екологічного статус-класу (ESC)	C_e , %	Категорія екологічного статус-класу (ESC)	
1981–2000 референтний	22,33	93,7	Moderate (Задовільний)	71,7	Poor (Поганий)	4,16	86,8	Moderate (Задовільний)	62,93	Moderate (Задовільний)
2000–2020 фактичний	21,33	89,5	Moderate (Задовільний)	68,49	Moderate (Задовільний)	3,62	75,5	Good (Добрий)	54,76	Moderate (Задовільний)
2031–2060* 2041–2070 прогнозований (оцінка А)	18,81	78,8	Good (Добрий)	60,4	Moderate (Задовільний)	3,76	78,5	Good (Добрий)	56,88	Moderate (Задовільний)
2021–2050 2031–2070* мінімально прогнозований (оцінка Б)	15,64	65,6	Good (Добрий)	50,22	Moderate (Задовільний)	2,91	60,1	High (Високий)	44,02	Good (Добрий)
Вплив воєнних дій (руйнування Каховського водосховища)	–	–	–	–	–	5,25	109,6	Moderate (Задовільний)	79,1	Poor (Поганий)

* – для р. Дунай

Дунаю і у 18,3 раза під впливом зміни стоку Дніпра (рис. 2). Це свідчить, що стік Дніпра в 4,8 раза має більший вплив на прибережні бентосні автотрофні угруповання та екологічний стан Одеського району ПнЗЧМ (центральна частина Дунай-Дніпровського межиріччя) порівняно із впливом Дунаю. У відповідності до відмінностей загальнобіологічних показників функціональної активності водоростей (розміри тіла, питома поверхня таломів і клітин, тривалість життєвого циклу) між угрупованнями макрофітів та мікроепіфітону також спостерігається різниця за швидкістю реагування реакція на зміну об'ємів річкового стоку. У середньому з урахуванням реакції на стік Дунаю і Дніпра за сценаріями А і Б значення морфофункціональних показників макрофітів порівняно з референтним періодом (1981–2000 рр.) зменшаться у 12,5 раза. Значення індикатора C_e (внеску епіфітного компонента) для угруповань мікроепіфітону – у 9,16 раза менше порівняно з референтним періодом (див. рис. 2). Це свідчить про те, що через більшу пластичність та швидкість реакції на зміну умов реакція макрофітів у 1,4 раза має більш швидку реакцію перебудови морфофункціональних показників у відповідь на зміну об'єму річкового стоку порівняно з мікроепіфітоном. Розглянута різниця впливів стоку Дунаю і Дніпра на прибережну донну рослинність, а також різниця в реакції макрофітів і мікроепіфітону логічним чином відобразилась на прогнозних оцінках категорій ESC, отриманих для різних сценаріїв змін річкового стоку, спричинених змінами клімату (див. табл. 7).

Вищенаведені експертні оцінки довгострокової зміни категорій ESC для морської екосистеми ПнЗЧМ, яка перебуває під впливом стоку Дунаю і Дніпра, зроблені залежно від прогнозних сценаріїв очікуваних змін клімату (див. табл. 6). Однак у сучасних умовах український сектор Чорного моря перебуває не тільки під впливом кліматичних змін, але ще і під впливом наслідків воєнних дій, пов'язаних з агресією росії проти України. Руйнування агресором греблі Каховського водосховища 6 червня 2023 року призвело не тільки до катастрофічного впливу забруднених прісних вод Каховського водосховища на біологічний компонент морської екосистеми ПнЗЧМ (Мінічева та ін. 2023), але і значно змінило руслову гідрологічну систему Дніпра і, відповідно, його вплив на прилеглі морські акваторії. Розрахунки за рівняннями залежності інтенсивності функціонування угруповань бентосних макро- і мікрофітів від об'єму багаторічного весняного стоку Дунаю і Дніпра (Мінічева та ін. 2025) із використанням значень середніх місячних об'ємів стоку Дніпра в період до введення в експлуатацію греблі Каховської ГЕС (1950–1958 рр.) показали, що у разі зупинення гідрологоекологічної функції Каховського водосховища як резервуару для сезонного регулювання надходження стоку Дніпра до моря категорії ESC прилеглої морської акваторії можуть суттєво знизитись у наступні 40 років порівняно з періодом до активних бойових дій (2000–2020 рр.). Якщо не буде відновлена гідрологоекологічна функція Каховського водосховища, то

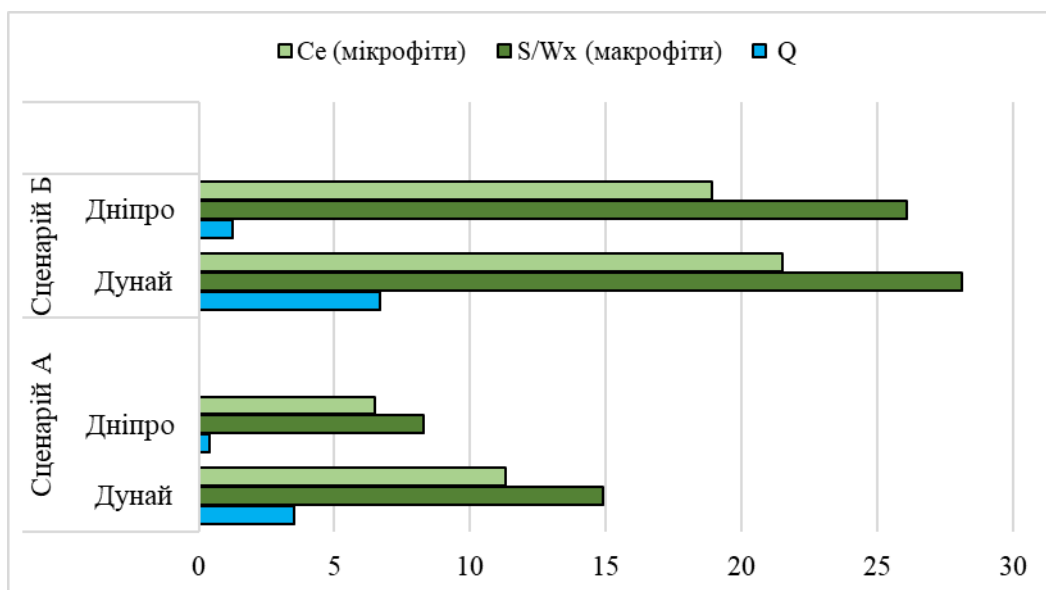


Рис. 2. Зіставлення відносного зниження (в умовних одиницях від значень референтного періоду 1981–2000 рр. – вісь X) об'єму стоку Дунаю і Дніпра (Q) з морфофункціональними індикаторами макро- (S/W) та мікрофітів (C_e) для сценаріїв А і Б зміни річкового стоку

в зоні впливу Дніпра у весняний період за прогностичною оцінкою на основі значень S/W угруповань макрофітів відбудеться зниження категорії ESC від «Високий» (High) до «Задовільний» (Moderate), а за розрахунками на основі значень C_e мікрофітів відбудеться зниження категорії ESC від «Задовільний» (Moderate) до «Поганий» (Poor) (табл. 7).

Таким чином, негативні та тривожні прогнози оцінки скорочення прісноводних ресурсів для суходолу України в найближчі 45 років, які можуть відбутись внаслідок зміни клімату, для українського сектору Чорного моря можуть обернутись покращенням загальної екологічної ситуації, якщо у майбутньому не будуть відбуватись екологічні катастрофи, пов'язані з активними воєнними діями на кшталт руйнування греблі Каховського водосховища. Це пояснюється географічною специфікою ПнЗЧМ, яка приймає на мілководний шельф значний об'єм стоку найбільших європейських річок. Відомо, що річковий стік негативно впливає на якість морського середовища і є не тільки фактором опріснення, але й привносить забруднюючі і поживні речовини, які зменшують біорізноманіття та викликають процеси евтрофування.

Прогнозоване за розглянутим кліматичним сценарієм RCP8.5 покращення категорій ESC в українському секторі Чорного моря буде не тільки сприяти виконанню Морської Рамкової Директиви ЄС (MSFD) щодо досягнення у всіх європейських морях Доброго екологічного стану (GES – Good Ecological Status), а також буде підставою позитивних перебудов у флористичному складі прибережних та шельфових угруповань макрофітів. У разі переходу до «Високий» (High) за якістю екологічного стану (референтні умови для макрофітів), тобто поверненні до історичного природного стану, буде спостерігатись відновлення чутливих (сенситивних багаторічних мало-розгалужених видів водоростей з низкою питомою поверхнею та функціональною активністю. В цих умовах можна очікувати відновлення в українському секторі Чорного моря цінних популяцій макрофітів з роду бурих водоростей – бородача (*Cystoseira* s.l.) та з роду червоних водоростей – філофори (*Phyllophora* GrevilleGre), які є візитною карткою чорноморської рослинності та цінною біологічною сировиною. Також зі зменшенням стоку річок і відповідним зменшенням трофності морських водойм буде спостерігатись зменшення інтенсивності розвитку мікроскопічних епіфітних водоростей, що свідчить про покращення екологічної ситуації в регіоні. Однак вищенаведені прогнози оцінки можуть здійснюватись лише за умови завершення активних бойових дій на території України.

Фітопланктон. Окрім макрофітів і мікроепіфітону, були отримані прогнози оцінки зміни категорій екологічного статус-класу (ESC) акваторій

українського сектору Чорного моря, що прогнозуються як результат змін об'ємів стоку річок Дунай і Дніпро протягом XXI ст. (табл. 6), із використанням індикаторних показників – біомаси (B) і питомої поверхні угруповань (S/W) фітопланктону в Одеському районі ПнЗЧМ (табл. 8).

Для розрахунку значень індикаторів фітопланктону як для синхронного, так і «віддаленого» впливу використовувались залежності, наведені в таблиці 1. У регресійні рівняння вносились актуальні і прогностичні показники об'єму стоку. В червні морфологічна структура угруповань фітопланктону формується під впливом об'ємів річкового стоку Дунаю, що надходить впродовж квітня і травня. Задача врахування впливу річкового стоку Дунаю в квітні і травні на формування фітопланктону вирішувалась шляхом вибору найбільшого значення індикатора, розрахованого за допомогою регресійних рівнянь. Наприклад, значення стоку р. Дунай у квітні і травні становили відповідно $21,30 \text{ км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}$ та $20,61 \text{ км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}$ (прогнозна оцінка А впливу (2031–2060, 2041–2070) (див. табл. 8). В результаті використання наведених у таблиці 1 регресійних залежностей встановлено, що біомаса фітопланктону в червні може прогнозуватись у діапазоні $455 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ та $660 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Найбільше зі значень ($660 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) розглядалось як максимальний прояв впливу стоку р. Дунай у квітні–травні на біомасу фітопланктону у червні (табл. 7). Для визначення екологічного статус-класу використовувались показники біомаси і питомої поверхні угруповань, для яких уже розроблені шкали порогових значень (Методика ... 2019; EMBLAS. Final scientific report ... 2022) (див. табл. 4).

Значення квітневої біомаси, які зумовлені об'ємами стоку як Дунаю, так і Дніпра у березні, що розраховані для референтного, фактичного і найближчого прогностичного періодів, залишаються в межах категорії «Високий» (High) (табл. 8). Однак при цьому в найближчий майбутній кліматичний період очікується зменшення біомаси фітопланктону для прогнозованої оцінки за обома сценаріями (А і Б), яке більш кількісно проявляється в результаті зменшення стоку Дніпра – за сценарієм Б очікується зниження біомаси фітопланктону у квітні до $202 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ порівняно зі значенням у референтний період $315 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (табл. 8).

Більш значний вплив стоку річок на категорії ESC проявляється в червні. Так, у разі скорочення об'ємів річкового стоку за сценарною оцінкою А в акваторіях, які перебувають під впливом стоку р. Дунай, прогнозується зниження біомаси фітопланктону на 38% стосовно референтних значень 1981–2000 рр. У разі скорочення об'ємів річкового стоку за сценарною оцінкою Б біомаса в акваторіях, які перебувають під впливом стоку р. Дунай, знижується на 58%.

Прогнозні оцінки зміни категорій екологічного статус-класу (ESC) акваторій українського сектору Чорного моря, які перебувають під впливом стоку Дунаю та Дніпра, залежно від сценарних оцінок зміни річкового стоку в найближчі майбутні кліматичні періоди XXI ст. на основі індикаторів: біомаси (*B*) та питомої поверхні (*S/W*) його угруповань фітопланктону

Період	Вплив р. Дунай			Вплив р. Дніпро		
	<i>Q</i> , км ³ ·міс ⁻¹	<i>B</i> , мг·м ⁻³	Категорія ESC	<i>Q</i> , км ³ ·міс ⁻¹	<i>B</i> , мг·м ⁻³	Категорія ESC
Прояв впливу у квітні						
1981–2000 референтний	19,85 (березень)	259 (квітень)	High (Високий)	4,34 (березень)	315 (квітень)	High (Високий)
2000–2020 фактичний	21,24 (березень)	287 (квітень)	High (Високий)	4,23 (березень)	300 (квітень)	High (Високий)
2031–2060*, 2041–2070 прогноз. (оцінка А)	18,26 (березень)	237 (квітень)	High (Високий)	4,30 (березень)	309 (квітень)	High (Високий)
2021–2050, 2031– 2070* прогноз. (оцінка Б)	13,90 (березень)	227 (квітень)	High (Високий)	3,04 (березень)	202 (квітень)	High (Високий)
Вплив воєнних дій (руйнування греблі Каховського водосховища)	–	–	–	3,38 (березень)	219 (квітень)	High (Високий)
Прояв впливу у червні						
1981–2000 референтний	24,77–25,14 (квітень– травень)	1067 (червень)	Moderate (Задовільний)	3,40 (червень)	1132 (червень)	Good (Добрий)
2000–2020 фактичний	24,68–21,75 (квітень– травень)	751 (червень)	Good (Добрий)	2,77 (червень)	941 (червень)	Good (Добрий)
2031–2060*, 2041–2070 прогноз. (оцінка А)	21,30–20,61 (квітень– травень)	660 (червень)	High (Високий)	2,94 (червень)	998 (червень)	Good (Добрий)
2021–2050, 2031–2070* прогноз. (оцінка Б)	17,34–17,60 (квітень– травень)	452 (червень)	High (Високий)	2,37 (червень)	789 (червень)	High (Високий)
Вплив воєнних дій (руйнування греблі Каховського водосховища)	–	–	–	4,22 (червень)	1303 (червень)	Moderate (Задовільний)

* – для р. Дунай (див. табл. 6); ** – пояснення розрахунку для *B* для червня надані в тексті

Ці перебудови структури фітопланктону відповідають переходу ESC від категорії «Задовільний» (Moderate) до категорії «Високий» (High), що свідчить про можливість суттєвого покращення екологічного стану у разі реалізації сценарних оцінок А і Б (табл. 8).

В акваторіях, які перебувають під впливом стоку р. Дніпро, прогнозується значне зниження значень питомої поверхні фітопланктону *S/W*. У разі реалізації сценарію Б значення цього індикатора може знизитись до 789 м²·кг⁻¹, що відповідає категорії ESC «Високий» (High) порівняно з референтним значенням 1132 м²·кг⁻¹ – категорія ESC «Добрий» (Good) (табл. 7).

Окремим прогнозним блоком у таблиці 8 відображено оцінку впливу воєнних дій, зокрема руйну-

вання греблі Каховського водосховища, на коротко-строкові зміни індикаторних показників фітопланктону. Згідно з результатами розрахунків, викликані воєнними діями зміни стоку р. Дніпро у березні (з 4,34 км³·міс⁻¹ до 3,38 км³·міс⁻¹) мають призвести до зниження біомаси фітопланктону у квітні порівняно з довоєнним періодом 2000–2020 рр. з 315 мг·м⁻³ до 219 мг·м⁻³, однак категорія ESC залишиться «Високий» (High) (табл. 8). Значне зростання стоку р. Дніпро в наступні місяці весняно-літнього періоду може призводити до суттєвих «відкладених» впливів у літній період, які не розглядаються в межах цієї роботи.

Перші ознаки негативного впливу підвищення стоку р. Дніпро в квітні–травні на морфофункцію-

нальну організацію фітопланктону проявляються в червні, коли значення питомої поверхні угруповання зростають порівняно з довоєнним періодом 2000–2020 рр. з 941 м²·кг⁻¹ до 1303 м²·кг⁻¹ (табл. 7). Це зумовлює відповідне зниження категорії ESC з «Добрий» (Good) до «Задовільний» (Moderate).

Таким чином, зміни у внутрішньорічному розподілі стоку р. Дніпро за місяцями внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища можуть спричинити зміни структурно-функціональної організації угруповань фітопланктону та їх перехід до стану підвищення потенційної швидкості продукційного процесу, погіршення екологічного статусу морської екосистеми (перехід ESC до нижчих категорій якості) у весняні місяці року. Це свідчить, що

зумовлені воєнними діями гідролого-екологічні зміни мають прямий негативний у контексті критеріїв Морської стратегії ЄС вплив на структурно-функціональну організацію фітопланктону, посилюючи нестабільність екосистеми у короткостроковій перспективі.

Хлорофіл-а. Використання отриманих регресійних рівнянь (табл. 5) у поєднанні з прогнозними оцінками об'ємів річкового стоку Дунаю і Дніпра дозволило розрахувати очікувані зміни площі акваторії ПнЗЧМ, на яких концентрації *Chl-a* перевищують порогові значення меж між екологічними статус-класами для двох прогностичних сценаріїв (А і Б) зміни річкового стоку у найближчий майбутній кліматичний період (рис. 3).

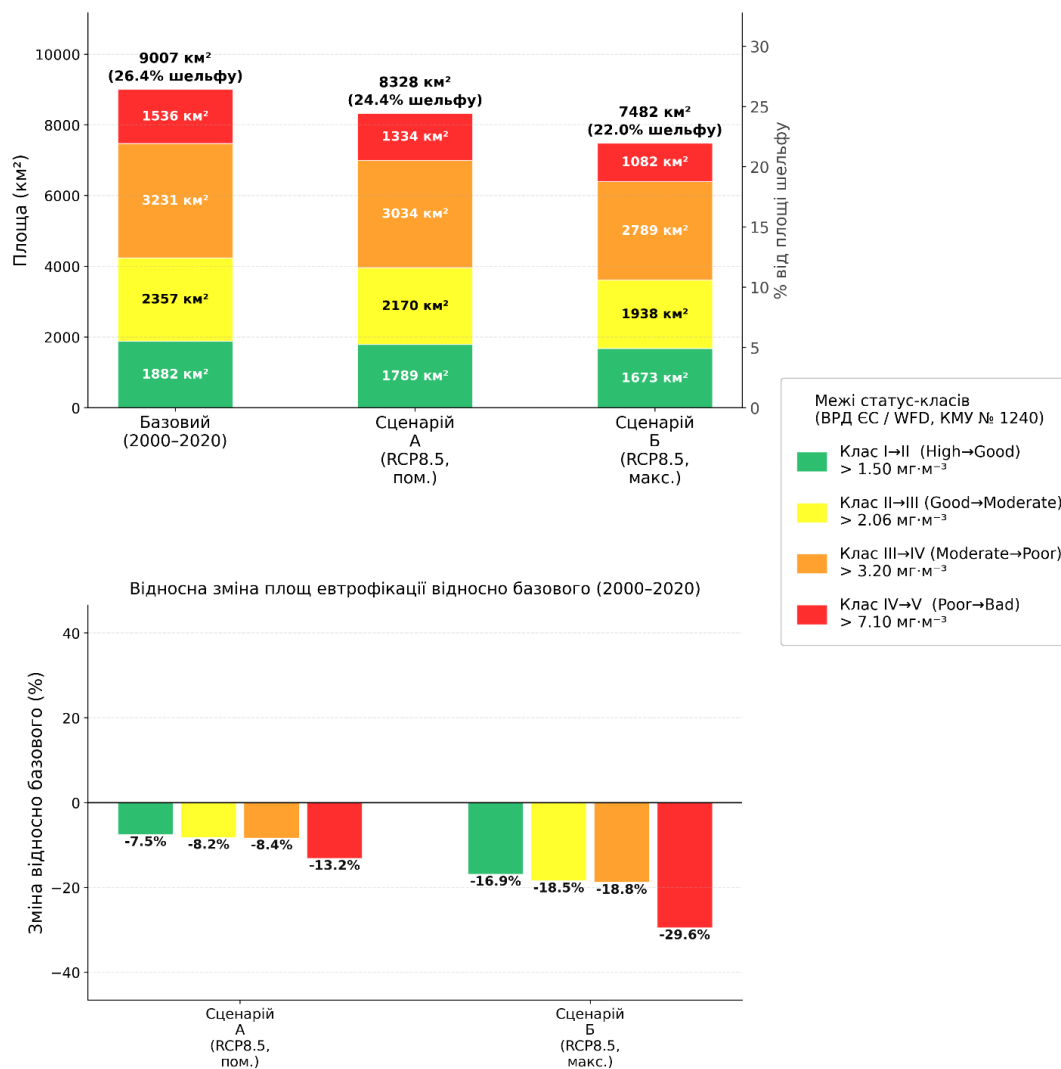


Рис. 3. Прогнозні оцінки площ зон евтрофікації ПнЗЧМ за екологічними статус-класами *Chl-a* для сучасного періоду (2000–2020 рр.) та сценаріїв А і Б зміни річкового стоку у найближчий майбутній кліматичний період (до 2060–2070 рр.)

*Верхня панель – абсолютні площі (км²) та частка від загальної площі шельфу ПнЗЧМ (34 080 км²); нижня панель – відносна зміна площ (%) стосовно базового рівня

У сучасний кліматичний період 2000–2020 рр. середня сезонна площа акваторії ПнЗЧМ із концентраціями *Chl-a*, які перевищують нижній поріг евтрофікації ($>1,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, межа класів I/II), становить $9\,007 \text{ км}^2$, що відповідає 26,4% загальної площі шельфу. З них зони з ознаками задовільного стану ($>2,06 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, межа II/III) займають $7\,124 \text{ км}^2$ (20,9% шельфу), зони поганого стану ($>3,2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, межа III/IV) – $4\,767 \text{ км}^2$ (14%), а зони дуже поганого екологічного стану ($>7,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, межа IV/V) – $1\,536 \text{ км}^2$ (4,5% шельфу).

Прогнозні розрахунки за сценарієм А (помірне скорочення стоку) свідчать про скорочення площ евтрофованих зон в усіх статус-класах. Загальна площа акваторії з перевищенням нижнього порогу скорочується до $8\,328 \text{ км}^2$ (-7,5%), зони поганого стану – до $4\,368 \text{ км}^2$ (-8,4%), а найбільш екологічно критичні зони дуже поганого стану – до $1\,334 \text{ км}^2$ (-13,2%). Таким чином, за помірним сценарієм скорочення стоку найбільш виражене покращення прогнозується саме для вищих статус-класів, що відповідає загальній закономірності, виявленій для макрофітів і мікроепіфітону (табл. 7).

За сценарієм Б (максимальне скорочення стоку на 30%) прогнозується більш істотне скорочення площ евтрофованих зон в усіх статус-класах. Загальна площа зон із перевищенням нижнього порогу скорочується до $7\,482 \text{ км}^2$ (-16,9% від сучасного рівня), зони поганого стану ($>3,2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$) – до $3\,871 \text{ км}^2$ (-18,8%), а зони дуже поганого екологічного стану ($>7,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$) – до $1\,082 \text{ км}^2$ (-29,6%).

Таким чином, максимальне скорочення площ у реалізації сценарію Б спостерігається для зон найвищої концентрації *Chl-a*, тобто найбільш деградованих ділянок шельфу, що є екологічно значущим результатом з точки зору відповідності критеріям Морської рамкової директиви ЄС (MSFD 2008/56/EC).

Необхідно зазначити, що диференційована реакція різних статус-класів на зміну об'єму стоку, більш виражена для вищих порогів концентрації (межа IV/V: -13,2% та -29,6% для сценаріїв А і Б відповідно, порівняно з -7,5% та

-16,9% для нижнього порогу I/II), пояснюється нелінійною чутливістю фітопланктонних угруповань до скорочення надходження біогенних речовин з річковим стоком. Зменшення трофічного навантаження насамперед обмежує розвиток найбільш продуктивних угруповань, що відповідають екологічному статусу «Поганий» (Poor) і «Дуже поганий» (Bad), тоді як фонові евтрофікація зберігається навіть у разі значного скорочення стоку.

Висновки

На підставі аналізу літературних джерел з результатами прогнозних оцінок зміни річкового стоку під впливом кліматичних умов за кліматич-

ним сценарієм RCP8.5 встановлено, що у найближчому майбутньому, до 60–70-х років ХХІ ст., слід очікувати у весняний період: зменшення стоку р. Дунай за помірними оцінками у середньому на 14%, за максимальними – до 30%; зменшення стоку р. Дніпро у середньому за помірними оцінками на 10% (до 16% у травні), за максимальними – до 30% порівняно з референтним періодом до початку століття. Оцінки зміни середніх місячних об'ємів стоку Дніпра і Дунаю в період 2000–2020 рр., порівняно з періодом 1981–2000 рр., які базуються на даних спостережень, показали, що у вказаний період уже відбулись зміни стоку Дніпра/Дунаю: на -3/+7% у березні, -16/0% у квітні, -15/-14% у травні і -18/-10% у червні.

Прогнозні оцінки зміни категорії ESC морської екосистеми Одеського району ПнЗЧМ, виконані за морфологічним індикатором питомої поверхні (*S/W*) макрофітів, показали, що для зони впливу р. Дунай як для сценарію А (помірне скорочення стоку), так і для сценарію Б (максимальне скорочення стоку) категорія ESC може підвищитись від сучасного «Задовільний» (Moderate) до «Добрий» (Good) до 60–70-х років ХХІ ст. У зоні впливу р. Дніпро за сценарієм А не буде спостерігатись зміни категорії, а для сценарію Б – сучасна категорія «Добрий» (Good) за приблизно 40-річний прогнозний період може піднятися до категорії «Високий» (High).

Прогнозоване зменшення стоку річок Дунай і Дніпро призведе до зниження значень індикатора мікроепіфітону «внесок епіфітного компонента» (C_e , %) і, відповідно, до покращення екологічного стану на акваторіях впливу у найближчому майбутньому (до 60–70-х років ХХІ ст.). У зоні впливу р. Дунай категорія ESC за індикатором C_e не зміниться від сучасної (буде відповідати категорії «Задовільний» (Moderate), але буде наближатись до категорії «Добрий» (Good). У зоні впливу р. Дніпро категорія ESC морської екосистеми у разі максимального прогнозованого зниження стоку може підвищитись до 2070 р. від сучасної «Задовільний» (Moderate) до «Добрий» (Good).

Прогнозоване покращення екологічного стану українського сектору Чорного моря за умов скорочення стоку річок Дунай і Дніпро до 60–70-х років поточного століття, викликаного дією кліматичних чинників, буде супроводжуватись морфологічною перебудовою угруповань макрофітобентосу, внаслідок якої можуть очікуватись позитивні зміни в розвитку прибережної та шельфової рослинності. Перевагу в розвитку будуть отримувати чутливі (сенситивні) багаторічні малорозгалужені види водоростей з низькою питомою поверхнею та функціональною активністю. Ці тенденції будуть

сприяти відновленню цінних чорноморських видів макрофітів: у прибережній зоні – популяції бурої водорості бородача з роду *Cystoseira* s.l., у шельфовій зоні – популяції червоних водоростей філофори з роду *Phyllophora* Greville.

Встановлено, що стік р. Дніпро в 4,8 раза має більший вплив на морфофункціональні перебудови прибережних донних угруповань рослинності та екологічний стан вод Одеського району ПнЗЧМ (центральну частину Дунай-Дніпровського межиріччя) порівняно з впливом річки Дунай. Через більшу швидкість морфофункціональної перебудови макрокомпонента автотрофних угруповань реакція макрофітів у 1,4 раза має більшу силу відповідної реакції параметрів угруповань на зміни об'ємів річкового стоку порівняно з мікроепіфітоном.

Прогнозні оцінки зміни категорії ESC морської екосистеми Одеського району ПнЗЧМ за індикаторами фітопланктону показали, що у квітні за сценаріями зменшення стоку А і Б категорія ESC залишиться в межах категорії «Високий» (High). Найбільш виражені реакції впливу скорочення стоку в зоні впливу р. Дунай проявляться в червні, які будуть супроводжуватись підвищенням категорії «Задовільний» (Moderate) у референтний період 1981–2000 рр. до категорії «Високий» (High) для 60–70-х років ХХІ ст. В акваторіях, які перебувають під впливом стоку р. Дніпро, категорія ESC підвищиться з «Добрий» (Good) до такої ж категорії «Високий» (High).

Прогнозні оцінки зміни ESC морської екосистеми ПнЗЧМ за індикатором *Chl-a* показали, що як за сценарієм А (помірне скорочення стоку), так і за сценарієм Б (максимальне скорочення стоку) до 60–70-х років ХХІ ст. буде відбуватись скорочення площ евтрофованих зон для всіх категорій екологічного стану. Для категорії «Поганий» (Poor) на -8,4 і -18,8 (%) та для категорії «Дуже поганий» (Bad) на -16,9 і -29,6 (%) відповідно до сценаріїв А і Б.

Крім кліматичних змін, на ESC морської системи можуть значно впливати активні воєнні дії, які викликають екологічні катастрофи, такі як, наприклад, руйнування греблі Каховського водосховища. В результаті втрати регулюючої ролі Каховського водосховища, за попередньою прогностичною оцінкою на основі показника *S/W* угруповань макрофітів, у зоні впливу Дніпра може відбутися зниження категорії ESC від «Високий» (High) до «Задовільний» (Moderate), за показником C_e мікрофітів – від категорії «Задовільний» (Moderate) до «Поганий» (Poor). Оцінки за індикаторами фітопланктону також свідчать про можливість переходу в червні з категорії «Високий» (High) до «Задовільний» (Moderate) і підвищення нестабільності екосистеми.

Прогнозні оцінки можливих змін категорій ESC екосистеми ПнЗЧМ, отримані із використанням морфофункціональних індикаторів пелагічних та бентосних автотрофних угруповань, дозволяють зробити загальний висновок, що зменшення обсягів стоку Дунаю і Дніпра у ХХІ ст. внаслідок кліматичних змін загалом будуть сприяти підвищенню екологічного статусу вод ПнЗЧМ. За переважною кількістю індикаторів категорія ESC екосистеми Одеського району ПнЗЧМ до 60–70-х років ХХІ ст. буде визначатись як «Добрий» (Good) або «Високий» (High). На 17% зменшиться загальна площа зон евтрофікації ПнЗЧМ (за концентрацією *Chl-a*), зумовлена надходженням річкового стоку. Це пояснюється зменшенням потоків біогенних і органічних речовин, які надходять до моря з річковим стоком. З іншого боку, перерозподіл стоку Дніпра за місяцями, внаслідок втрати регулюючої ролі Каховського водосховища, очікувано призведе до зниження категорій ESC морської екосистеми Дніпровсько-Бузького району у весняні місяці року через збільшення об'ємів стоку Дніпра у цей період.

Список використаних джерел

1. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016–2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 1. Басейн Вісли, Дунаю, Дністра, Південного Бугу, річки Причорномор'я : довідкове видання. Київ, 2023 (а). 465 с.
2. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016–2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 2. Басейн Дніпра : довідкове видання. Київ, 2023 (б). 294 с.
3. Лобода Н.С., Козлов М.О. Оцінка водних ресурсів річок України за середніми статистичними моделями траєкторій змін клімату RCP4.5 та RCP8.5 у період 2021–2050 роки. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. Вип. 25. С. 93–104. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09>.
4. Методика віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод, а також віднесення штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного потенціалу штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод (Додаток 16: Граничні значення класів для визначення екологічного стану масивів поверхневих вод (прибережні води). Фітопланктон) : Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019 № 5. *Офіційний вісник України*. 2019. № 16. С. 69. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0127-19> (дата звернення: 09.04.2026).

5. Миничева Г.Г., Зотов А.Б., Косенко М.Н. Методические рекомендации по определению морфофункциональных показателей одноклеточных и многоклеточных форм водной растительности. Одесса : ЦНТЕП ОНЮА, 2003. 32 с.
6. Мінічева Г.Г., Бондаренко О.С., Богатова Ю.І. та ін. Реакція морської екосистеми на наслідки руйнування греблі Каховського водосховища. *Морський екологічний журнал*. 2023. № 1–2. С. 52–68. <https://doi.org/10.47143/1684-1557/2023.1-2.6>.
7. Мінічева Г.Г., Тучковенко Ю.С., Зотов А.Б. та ін. Прогнозна оцінка екологічного стану українського сектору Чорного моря на підставі зміни морфофункціональних індикаторів автотрофних угруповань під впливом кліматичних факторів і наслідків воєнних дій (Частина 1: Діагноз). *Морський екологічний журнал*. 2025. № 1–2. С. 41–65. <https://doi.org/10.47143/1684-1557/2025.1-2.4>.
8. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология : монография / под ред. Ю.П. Зайцева, Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой. Киев : Наукова думка, 2006. 701 с.
9. Чорноморець Ю.О., Перевозчиков І.М., Орещенко А.В. та ін. Визначення стокових характеристик Нижнього Дніпра з урахуванням підризу дамби Каховської ГЕС. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*. 2023. № 2(4). С. 51–61. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.051>.
10. CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Black Sea – Ocean Colour Plankton MY L4 (Version 009_134) [Data set]. Marine Data Store (MDS). 2025. <https://doi.org/10.48670/moi-00277> (дата звернення: 23.05.2025).
11. Didovets I., Krysanova V., Hattermann F.F. et al. Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. Vol. 32. 100761. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761>.
12. DIRECTIVE 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy, 23 October 2000. (WFD, 2000/60/EC).
13. DIRECTIVE 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of marine environmental policy, 17 June 2008. (MSFD, 2008/56/EC).
14. EMBLAS. Final scientific report of the EU/UNDP Project: Improving Environmental Monitoring in the Black Sea – Selected Measures (EMBLAS-Plus), ENPI/2018/389-859/ ed. by J. Slobodnik et al. Dnipro : Seredniak T.K., 2022. P. 91–111. URL: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2022/03/EMBLAS_Scientific-Report_ISBN-978-617-8111-01-4-web.pdf (дата звернення: 06.03.2026).
15. ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project / Eds. P. Van der Linden, J.F.B. Mitchell. Met Office Hadley Centre, Exeter. 2009. 160 p.
16. Field A. Discovering statistics using IBM SPSS statistics. 4th ed., Sage Publications. 2013.
17. Hempel S., Frieler K., Warszawski L. et al. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*. 2013. № 4. P. 219–236. <https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013>.
18. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007. 996 p.
19. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1535 p.
20. ISIMIP. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project. 2020. URL: <https://www.isimip.org/>.
21. Jacob D., Petersen J., Eggert B. et al. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*. 2014. № 14(2). P. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
22. Kok K., Hesselbjerg C.J., Sloth M.M. et al. Evaluation of existing climate and socio-economic scenarios. Deliverable 2.1 from EU FP7 IMPRESSIONS project. 2015. URL: <http://www.impressions-project.eu/documents/1>.
23. Krysanova V., Hattermann F., Wechsung F. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Processes*. 2005. № 19. P. 763–783. <https://doi.org/10.1002/hyp.5619>.
24. Lange S. Bias correction of surface downwelling longwave and shortwave radiation for the EWEMBI dataset. *Earth System Dynamics*. 2018. № 9. P. 627–645. <https://doi.org/10.5194/esd-9-627-2018>.
25. Lange S. Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data merged and bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI). V. 1.1. *GFZ Data Services*. 2019. <https://doi.org/10.5880/pik.2019.004>.
26. Loboda N.S., Bozhok Y.V. Application of the «climate-runoff» model to the assessment of the Danube River basin water resources in the XXI century according to the climate scenarios (A1B). *XXVIII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management* : Electronic book with full papers. November 6–8, 2019. Kyiv, 2019. P. 100–109. URL: https://www.ncihp.si/wp-content/uploads/ihp/conferences/XXVIII/Electronic_Book_Danube_Conference_2019_2.pdf.
27. Mauser W., Bach H. PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *Journal of Hydrology*. 2009. Vol. 376(3–4). P. 362–377. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.046>.

28. Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: A review. *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 636. P. 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.183>.
29. Minicheva G., Afanasyev D., Kurakin A. Black Sea monitoring guidelines: Macrophytobenthos. Istanbul : Secretariat of commission on protection of the Black Sea against pollution. 2014. 76 p. URL: https://emblasproject.org/wp-content/uploads/2017/01/Macrophytes_Manual-mainAnx123Mar2015-fin-PA3.pdf.
30. Minicheva G.G. Use of the macrophytes morphofunctional parameters to assess ecological status class in accordance with the EU WFD. *Морський екологічний журнал*. 2013. Т. XII. № 3. С. 5–21.
31. Probst E., Mauser W. Climate Change Impacts on Water Resources in the Danube River Basin: A Hydrological Modelling Study. Using EURO-CORDEX Climate Scenarios. *Water*. 2023. № 15(1). <https://doi.org/10.3390/w15010008>.
32. Schmied H.M. Evaluation, modification and application of a global hydrological model. *Frankfurt Hydrology Paper 16*, Institute of Physical Geography, Goethe University Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany. 2017.
33. Snizhko S., Zapototskyi S., Shevchenko O. et al. Assessment of the water resource potential of the lower Dnipro after the destruction of the Kakhovka reservoir taking into account the impact of climate change. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: 17th International Conference*. Kyiv, 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520039>.
34. Stagl J., Hattermann F. Impacts of climate change on the hydrological regime of the Danube River and its tributaries using an Ensemble of Climate Scenarios. *Water*. 2015. № 7. P. 6139–6172. <https://doi.org/10.3390/w7116139>.
35. Warszawski L., Frieler K., Huber V. et al. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *PNAS*. 2013. № 111. P. 3228–3232.

References

1. Derzhavnyy vodnyy kadastr. Bahatorichni dani pro rezhym ta resursy poverkhnevnykh vod sushi [State Water Cadastre. Long-term data on the regime and resources of surface waters of land (for 2016–2020 and the entire observation period). (2023 a). Part 1. Rivers. Issue 1. Basin of the Vistula, Danube, Dniester, Southern Bug, rivers of the Black Sea Region: Reference edition. Kyiv [in Ukrainian].
2. Derzhavnyy vodnyy kadastr. Bahatorichni dani pro rezhym ta resursy poverkhnevnykh vod sushi [State Water Cadastre. Long-term data on the regime and resources of surface waters of land (for 2016–2020 and the entire observation period)]. (2023 b). Part 1. Rivers. Issue 2. Dnieper Basin: reference edition. Kyiv [in Ukrainian].
3. Loboda, N.S., & Kozlov, M.O. (2020). Otsinka vodnykh resursiv richok Ukrainy za serednimy statystychnymy modeliamy traektorii zmin klimatu RCP4.5 ta RCP8.5 u period 2021–2050 roky [Assessment of water resources of the Ukrainian rivers according to the average statistical models of climate change trajectories RCP4.5 and RCP8.5 over the period of 2021 to 2050]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal – Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 25, 93–104 [in Ukrainian].
4. Metodyka vidnesennia masyvu poverkhnevnykh vod do odnogo z klasiv ekolohichnoho ta khimichnoho staniv masyvu poverkhnevnykh vod, a takozh vidnesennia shtuchnoho abo istotno zminenoho masyvu poverkhnevnykh vod do odnogo z klasiv ekolohichnoho potentsialu shtuchnoho abo istotno zminenoho masyvu poverkhnevnykh vod (Dodatok 16: Hranychni znachennia klasiv dlia vyznachennia ekolohichnoho stanu masyviv poverkhnevnykh vod (pryberezhni vody). Fitoplankton) [Methodology for assigning a surface water body to one of the classes of ecological and chemical states of a surface water body, as well as assigning an artificial or significantly modified surface water body to one of the classes of ecological potential of an artificial or significantly modified surface water body (Appendix 16: Limit values of classes for determining the ecological state of surface water bodies (coastal waters). Phytoplankton). (2019). *Oftsiiyni visnyk Ukrainy – Official Gazette of Ukraine*, 16, 69 [in Ukrainian].
5. Minicheva, G.G., Zotov, A.B. & Kosenko, M.N. (2003). *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniiu morfofunktsionalnykh pokazatelei odnokletochnykh i mnogokletochnykh form vodnoi rastitelnosti [Methodical recommendations on the morpho-functional indexes define for unicellular and multicellular forms of aquatic vegetation]*. Odessa: CNTEPI ONYUA [in Russian].
6. Minicheva, G.G., Bondarenko, O.S., Bogatova, Yu.I., Bolshakov, V.M., Bushuiev, S.G., Garkusha, O.P. et al. (2023). Reaktsiia morskoi ekosystemy na naslidky ruinuвання hrebli Kakhovskoho vodoshkovyshcha [Reaction of the marine ecosystem to the consequence of destruction of the Kahovka reservoir dam]. *Morskyi ekolohichnyi zhurnal – Marine Ecological Journal*, 1–2, 52–68 [in Ukrainian].
7. Minicheva, G.G., Tuchkovenko, Yu.S., Zotov, A.B., Sokolov, Y.V., Martyniuk, M.O., Kalashnik, K.S. et al. (2025). Prohnozna otsinka ekolohichnoho stanu ukrainskoho sektoru Chornoho moria na pidstavi zminy morfofunktsionalnykh indyikatoriv avtotrofnykh uhrupovan pid vplyvom klimatychnykh faktoriv i naslidkiv voiennykh dii (Chastyna 1: Diahnoz) [Predictive assessment of the ecological status of the Ukrainian sector of the Black Sea based on changes in morphofunctional indicators of autotrophic communities under the influence of climatic factors and the consequences of military actions (Part 1. Diagnosis)]. *Morskyi ekolohichnyi zhurnal – Marine Ecological Journal*, 1–2, 41–65 [in Ukrainian].
8. Zaitsev, Yu.P., Aleksandrov, B.G., Minicheva, G.G. (Eds). (2006). *Severo-zapadnaya chast Chernogo morya: biologiya i ekologiya [Northwestern Black Sea: biology and ecology]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].

9. Chornomorets, Yu., Perevozchikov, I., Oreshchenko, A., & Mala, L. (2023). Vyznachennia stokovykh kharakterystyk Nyzhnogo Dnipro z urakhuvanniam pidryvu damby Kakhovskoi HES [Determination of flow characteristics of the lower Dnipro taking into account the explosion of Kahovka HPP]. *Meteorolohiia. Hidrolohiia. Monitorynh dovkillia – Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, 2(4), 51–61 [in Ukrainian].
10. CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). (2025). Black Sea – Ocean Colour Plankton MY L4 (Version 009_134) [Data set]. Marine Data Store (MDS).
11. Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F.F., Lo'pez, M.R., Snizhko, S., & Schmied, H.M. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100761.
12. DIRECTIVE 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy, 23 October 2000. (WFD, 2000/60/EC).
13. DIRECTIVE 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of marine environmental policy, 17 June 2008. (MSFD, 2008/56/EC).
14. EMBLAS. Final scientific report of the EU/UNDP Project: Improving Environmental Monitoring in the Black Sea – Selected Measures (EMBLAS-Plus). (2022). ENPI/2018/389-859 / ed. by J. Slobodnik et al. Dnipro: Seredniak T.K. (accessed: 06.03.2026).
15. ENSEMBLES (2009). Climate Change and Its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project / Eds. P. Van der Linden, J.F.B. Mitchell. Met Office Hadley Centre, Exeter.
16. Field, A. (2013). Discovering statistics using IBM SPSS statistics. 4th ed., Sage Publications.
17. Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., & Piontek, F. (2013). A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4, 219–236.
18. IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
19. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (Eds.). (2013). IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
20. ISIMIP (2020). The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project. Retrieved from: www.isimip.org.
21. Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M. et al. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578.
22. Kok, K., Hesselbjerg, C.J., Sloth, M.M., Pedde, S., Gramberger, M., Jäger, J. et al. (2015). Evaluation of existing climate and socio-economic scenarios. Deliverable 2.1 from EU FP7 IMPRESSIONS project. Retrieved from: www.impressions-project.eu/documents.
23. Krysanova, V., Hattermann, F., & Wechsung, F. (2005). Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Processes*, 19, 763–783.
24. Lange, S. (2018). Bias correction of surface downwelling longwave and shortwave radiation for the EWEMBI dataset. *Earth System Dynamics*, 9, 627–645.
25. Lange, S. (2019). Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data merged and bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI). V. 1.1. *GFZ Data Services*.
26. Loboda, N.S., & Bozhok, Y.V. (2019). Application of the «climate-runoff» model to the assessment of the Danube River basin water resources in the XXI century according to the climate scenarios (A1B). Electronic book with full papers from: *XXVIII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. (pp. 100–109). Kyiv, Ukraine.
27. Mauser W., & Bach, H. (2009). PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *Journal of Hydrology*, 376, 362–377.
28. Ménesguen, A., & Lacroix, G. (2018). Modelling the marine eutrophication: A review. *Science of the Total Environment*, 636, 339–354.
29. Minicheva, G.G. (2013). Use of the macrophytes morphofunctional parameters to asses ecological status class in accordance with the EU WFD. *Morskyi ekolohichnyi zhurnal – Marine Ecological Journal*, 3, 5–21.
30. Minicheva, G., Afanasyev, D., & Kurakin, A. (2014). Black Sea monitoring guidelines: Macrophytobenthos. Istanbul: Secretariat of commission on protection of the Black Sea against pollution. Retrieved from: <https://emblasproject.org/>.
31. Probst, E., & Mauser, W. (2023). Climate Change Impacts on Water Resources in the Danube River Basin: A Hydrological Modelling Study. Using EURO-CORDEX Climate Scenarios. *Water*, 15, 8.
32. Schmied, M.H. (2017). Evaluation, modification and application of a global hydrological model. *Frankfurt Hydrology Paper 16*, Institute of Physical Geography, Goethe University Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany.
33. Snizhko, S., Zapototskyi, S., Shevchenko, O., Olexienko, I., Didovets, I., & Bronstert, A. (2023). Assessment of the water resource potential of the lower Dnipro after the destruction of the Kakhovka reservoir taking into account the impact of climate change. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. (pp. 1–5). Kyiv, Ukraine.
34. Stagl, J. & Hattermann, F. (2015). Impacts of climate change on the hydrological regime of the Danube River and its tributaries using an Ensemble of Climate Scenarios. *Water*, 7, 6139–6172.
35. Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O., & Schewe, J. (2013). The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *PNAS*, 111, 3228–3232.

PREDICTIVE ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS OF THE UKRAINIAN SECTOR OF THE BLACK SEA BASED ON CHANGES IN MORPHOFUNCTIONAL INDICATORS OF AUTOTROPHIC COMMUNITIES UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS AND THE CONSEQUENCES OF MILITARY ACTIONS (PART 2: FORECAST)

Minicheva G.G., Corr. member of NAS of Ukraine, Dr. Sci., Senior Researcher

Tuchkovenko Yu.S., Dr. Sci., Senior Researcher

Zotov A.B., PhD, Senior Researcher

Sokolov Y.V., PhD

Kalashnik K.S., PhD

Marinets G.V., Junior Researcher

Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine minicheva@ukr.net

This study is a logical continuation (Part 2: Forecast) of previous studies by the authors' team, in which statistically significant relationships were determined between morphofunctional indicators of various life forms of aquatic vegetation of the marine ecosystem of the Odessa region of the northwestern part of the Black Sea (NWBS) and the average monthly volumes of river runoff of the Danube and the Dnipro in the spring months of the year (March-June) for the long-term period since the beginning of the 21st century (Minicheva et al. 2025). Methodologically, the work is based on the study of a functionally related system: river runoff – marine autotrophs – ecological state of the sea, which is used as a logical chain of predictive assessment.

The main goal of the second part of the work is to obtain forecast assessments of expected changes of the ecological status class (ESC) categories of marine waters of the NWBS, associated with the impact of changing climate conditions on the runoff of the Danube and the Dnipro rivers in the period up to the 70s of the 21st century, under the RCP8.5 climate scenario. This scenario is based on the fact that by the 60s–70s of the 21st century, one should expect in the spring period: a decrease in the Danube River runoff by an average of 14% according to moderate assessments, and up to 30% according to maximum assessments; a decrease in the Dnipro River runoff by an average of 10% according to moderate assessments (up to 16% in May), and up to 30% according to maximum assessments, compared to the reference period before the beginning of the century. Using classification scales for determining ESC categories according to the standards of the European Water Directives (WFD, MSFD) and calculated, using statistically reliable relationships, values of morphofunctional indicators of macrophytes, microepiphyton, phytoplankton, and satellite data of bloom areas by Chl-*a* concentration, predictive assessments of expected ESC categories were established under scenario **A** (moderate reduction in runoff) and scenario **B** (maximum reduction in runoff) by the 60s–70s of the 21st century. In general, based on morphofunctional indicators of all life forms of autotrophs, predictive assessments of the improvement of ESC categories in the zones of influence of the Danube and the Dnipro rivers for the next 40-year period were obtained. The projected improvement in the ecological status of the Ukrainian sector will be accompanied by positive changes in the development of coastal and shelf vegetation. These trends will contribute to the recovery of valuable Black Sea macrophyte species: in the coastal zone – populations of the brown alga *Cystoseira* s.l., and in the shelf zone – populations of the red alga *Phyllophora* Greville. Forecast assessments of changes in the ESC of the marine ecosystem of the NBWS based on the Chl-*a* indicator showed that by the 60s–70s of the 21st century, there will be a reduction in the area of eutrophicated zones. For the “Poor” category, by -8.4% and -18.8%, and for the “Bad” category, by -16.9% and -29.6%, in accordance with Scenarios **A** and **B**, respectively.

In addition to climate change, the ESC of the marine system can be significantly affected by active military actions that cause environmental disasters, such as the destruction of the Kakhovka Reservoir dam. As a result of the loss of the regulatory function of the Kakhovka Reservoir, according to a preliminary prognostic assessment based on the *S/W* index of macrophyte communities, the ESC category in the Dnipro influence zone may decrease from “High” to “Moderate”, and according to the C_e index of microphytes – from “Moderate” to “Poor”. Assessments based on phytoplankton indicators also indicate a possible transition from the “High” to “Moderate” category and increased ecosystem instability.

Key words: autotrophic communities, river runoff, predictive linkages, ecological status, Black Sea, Northwestern part.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)