

**ПРОГНОЗНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ УКРАЇНСЬКОГО СЕКТОРА
ЧОРНОГО МОРЯ НА ПІДСТАВІ ЗМІНИ МОРФОФУНКЦІОНАЛЬНИХ
ІНДИКАТОРІВ АВТОТРОФНИХ УГРУПОВАНЬ ПІД ВПЛИВОМ КЛІМАТИЧНИХ
ФАКТОРІВ І НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ (ЧАСТИНА 1. ДІАГНОЗ)**

¹ *Мінічева Г.Г.* – чл.-кор., д.б.н., с.н.с., minicheva@ukr.net,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2550-5369>

¹ *Тучковенко Ю.С.* – д.геогр.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

¹ *Зотов А.Б.* – к.б.н., с.н.с., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8141-0009>

¹ *Соколов Є.В.* – к.б.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1342-1109>

¹ *Мартинюк М.О.* – д. філос., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-4907>

¹ *Калашнік К.С.* – к.б.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1845-249X>

¹ *Маринець Г.В.* – м.н.с., ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5740-9308>

² *Овчарук В.А.* – д.геогр.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5654-3731>

¹ ДУ «Інститут морської біології Національної академії наук України»,

² Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

У роботі вперше для північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ) зроблено аналіз статистично значущих зв'язків середньомісячних об'ємів річкового стоку Дунаю і Дніпра у весняні місяці (березень – червень) із морфофункціональними індикаторами фітопланктону, макро- і мікрофітобентосу, а також показником первинно-продукційного процесу – хлорофілом-*a*, на підставі даних 2000–2024 рр. Головне завдання роботи полягає в отриманні коефіцієнтів регресійних рівнянь, які відображають вплив річного стоку річок Дунай і Дніпро на перебудову структурно-функціональної організації угруповань коротко- і довгоциклічних форм водної рослинності в пелагіалі й бенталі морської екосистеми та в подальшому зможуть бути використані для надання довгострокової прогнозовної оцінки зміни екологічного стану моря в зонах річкового впливу, яку планується отримати у другій частині цієї роботи (Частина 2. Прогноз). Встановлено, що в період 2000–2024 рр. спостерігаються наявні тенденції до загального зниження об'ємів річкового стоку Дунаю і Дніпра як загалом за рік, так і у весняний період (березень – червень). Виявлено збільшення амплітуди коливань об'ємів стоку в період 2000–2024 рр. порівняно з попереднім – 1981–1999 рр., що свідчить про вплив змін сучасного клімату, які проявляються в нерівномірному розподілі кількості атмосферних опадів упродовж року, збільшенні повторюваності інтенсивних паводків і водночас посушливих періодів. У період 2000–2020 рр. середні багаторічні площі зон із високою концентрацією хлорофілу-*a* (*Chl-a*) становили приблизно 5900 км² для *Chl-a* > 2,23 мг·м⁻³ та 2300 км² для *Chl-a* > 4,63 мг·м⁻³. Збільшення сумарного річкового стоку Дунаю та Дніпра на 1 км³ у ранньовесняний період року асоціюється з розширенням площі помірно евтрофних вод (*Chl-a* > 2,23 мг·м⁻³) на 150–200 км². Аналіз синхронних впливів місячного стоку річок на показники фітопланктону у весняний період (березень – червень) виявив схожий характер зв'язків як для Дунаю, так і для Дніпра, рівень яких був максимальним для показників площі поверхні (*S*). Березневий стік обох річок формував сильні обернені зв'язки з *S*, що узгоджується з домінуючим впливом зимового типу гідродинамічних процесів до початку інтенсивного паводка. У квітні виявлено сильний прямий зв'язок з індексом поверхні (*SI*) угруповань фітопланктону, пов'язаний із впливом максимального паводка. Аналіз «віддаленого» впливу обсягів місячного стоку річок Дунай і Дніпро на показники фітопланктону в Одеському районі ПнЗЧМ підтвердив наявність «запізнення» позитивного (прямого) впливу у випадках, коли цей вплив не проявлявся в той же місяць. Для морфофункціональних показників донної рослинності – питомої поверхні флористичного складу макрофітів (*S/W_x*) і внеску епіфітного компонента (*C_e*) в Одеському районі ПнЗЧМ – були отримані діаграми розсіювання та визначені коефіцієнти апроксимаційних рівнянь, які відображають наявний статистичний зв'язок між тенденціями зміни середніх значень цих індикаторів і об'ємами місячного стоку Дунаю

і Дніпра у весняні місяці багаторічного періоду 2000–2024 рр. Показано, що зі збільшенням місячних об'ємів стоку значення вказаних показників теж зростають. Це дає можливість використовувати отримані рівняння для надання прогнозу оцінки зміни структурно-функціональної організації макро- і мікрокомпонентів бентосної рослинності, яка пов'язана з категоріями екологічного статусу (ESC) морської екосистеми. Проведений діагноз наявності кількісних зв'язків об'ємів стоку найбільших річок ПнЗЧМ з функціональною активністю й інтенсивністю функціонування автотрофних угруповань створює основу для подальшого отримання прогнозних оцінок щодо можливих довгострокових змін категорій ESC морської екосистеми українського сектора Чорного моря відповідно до існуючих сценаріїв змін об'ємів річкового стоку, викликаних кліматичними змінами.

Ключові слова: автотрофні угруповання, річковий стік, прогностичні зв'язки, екологічний стан, Чорне море, північно-західна частина.

Вступ

Структура й інтенсивність функціонування угруповань водної рослинності забезпечує базовий екологічний процес створення автохтонної органічної речовини в морських екосистемах і визначає інтенсивність її подальшої трансформації трофічними ланками. Інтенсивність первинно-продукційної функції автотрофних угруповань планктону та бентосу – це індикатори, які мають прямий зв'язок з екологічним станом морських прибережних і шельфових екосистем і за якими можна визначати категорії екологічного статусу (ESC) європейських морів відповідно до класифікації Водної рамкової директиви (WFD 2000/60/EC) та Морської стратегії (MSFD 2008/56/EC). Однак одним із найбільш вузьких місць моніторингу та прогнозування ESC за станом водної рослинності є правильність вибору індикаторів, властивістю яких повинна бути можливість відображати швидкість первинної продукційної функції, без вимірювання якої неможна успішно реалізувати такі завдання. Флористичний склад, чисельність (для одноклітинних водоростей) і біомаса – це важливі показники, які віддзеркалюють безпосередньо стан самої водної рослинності, але коли є завдання визначення екологічного стану морської екосистеми на базі стану автотрофних угруповань, постає питання про функціональні показники, які зв'язані зі швидкістю первинно-продукційного процесу й віддзеркалюють її екологічний стан. Такими функціональними індикаторами всіх життєвих форм морської рослинності є комплекс морфофункціональних показників, який надає можливість не тільки кількісно визначати екологічну активність кожної популяції водоростей, але й оцінювати інтенсивність первинно-продукційної функції морської рослинності (Мінічева 1998). Морфофункціональні показники одно- і багатоклітинних водоростей планктону та бентосу легко визначаються за розробленими алгоритмами і є чутливим інструментом моніторингу й надання прогнозних оцінок (Мінічева, Зотов і Косенко 2003). Ще однією великою перевагою морфофункціональних індикаторів морської рослинності є їхній прямий зв'язок з еко-

логічним станом морської екосистеми, що надає можливість використовувати їх для визначення категорій екологічного статусу (Ecological Status Class – ESC) відповідно до стандартів Водних директив ЄС (Minicheva 2013). У районах впливу річкового стоку на морську екосистему, який привносить із суходолу до моря поживні речовини мінеральних та органічних сполук азоту й фосфору, морфофункціональні індикатори автотрофних угруповань є чутливими до коливання метеорологічних умов року, особливостей мінливості характеристик гідрологічного режиму та різних типів антропогенного впливу на морську екосистему, а з 2022 року і наслідків воєнних дій.

Гідроекологічні процеси в північно-західній частині Чорного моря (ПнЗЧМ) та її екологічний стан значною мірою визначаються річковим стоком Дунаю, Дніпра, Південного Бугу та Дністра, який з останнього десятиріччя минулого століття перебуває під відчутним впливом змін клімату (Лобода и Тучковенко 2010; Матыгин и др. 2013; Stagl and Hattermann 2015; Didovets et al. 2020; Тучковенко та ін. 2022; Probst and Mauser 2023).

В останні десятиріччя 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, зумовленої ними зміни 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).

Наявність для ПнЗЧМ багаторічних масивів даних щодо морфофункціональних індикаторів фітопланктону, макро- і мікрофітобентосу, а також показника первинно-продукційного процесу – хлорофілу-*a*, надає можливість здійснити пошукові

дослідження для встановлення їх зв'язку з об'ємом річкового стоку.

Загальна мета першої частини цієї роботи (Діагноз) полягала в отриманні статистично достовірних зв'язків 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 двох останніх десятиріч. У роботі вирішувалися такі завдання:

- визначення наявності статистично значущих кореляційних зв'язків між багаторічною мінливістю об'ємів стоку найбільших річок (Дунай і Дніпро), які впадають у ПнЗЧМ, у весняний період року (максимального стоку) з морфофункціональними індикаторами планктонної, бентосної рослинності і просторовим розподілом хлорофілу-*a*;

- отримання рівнянь регресії, які апроксимують вид визначеної за результатами кореляційного аналізу статистично значущої залежності між стоком Дунаю і Дніпра та морфофункціональними показниками автотрофних угруповань;

- отримання набору рівнянь, які відображають вплив річкового стоку на перебудови структурно-функціональної організації угруповань коротко- і довгоциклічних форм водної рослинності пелагіалі та бенталі для районів впливу річок Дунаю і Дніпра та в подальшому зможуть бути використані для довгострокової прогнозування зміни екологічного статусу морської екосистеми, яку планується отримати у другій частині цієї роботи (Частина 2. Прогноз).

Матеріали та методи досліджень

У роботі використовувалися дані щодо середньомісячних витрат води р. Дунай (гідрологічний пост «Рені – гідроствор, 54 миля», у період 1981–2024 рр.) і р. Дніпро (гідрологічний пост «Каховська ГЕС», у період 1981–2021 рр.) (Державний водний кадастр 2023), а також оперативні дані з АРМ-гідро кафедри гідрології суші Одеського національного університету імені І. І. Мечникова. Указані гідрологічні пости розташовані найближче до гирла річок. Середньомісячні витрати річок у замикальних створах перерахувались у місячні об'єми стоку.

Оцінка взаємозв'язку між сумарним стоком річок Дунай і Дніпро та масштабами цвітіння фітопланктону в ПнЗЧМ виконувалася на основі оброблених даних супутникових спостережень за концентрацією хлорофілу-*a* (*Chl-a*) з набору даних СМЕМС (2025). Як індикатори розвитку цвітіння розглядалися площі акваторії моря з концентраціями хлорофілу-*a*, що перевищують порогове значення $2,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, яке відповідає помірно підвищеному рівню розвитку фітопланктону, та $4,63 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, що вказує на інтенсивні процеси розвитку евтро-

фікації. Поріг $2,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ було вибрано на основі екологічних стандартів для Чорного моря, які асоціюють цей рівень із початком виникнення евтрофних умов (Moncheva et al. 2010). Поріг $4,63 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ визначено як статистичну аномалію, розраховану як середнє значення концентрації хлорофілу-*a* плюс одне стандартне відхилення за період 2000–2020 рр. (Ott and Longnecker 2015). Аналіз охоплював період 2000–2020 рр. і проводився як у щомісячній, так і в агрегованій за весняні місяці (березень – червень) часовій розбивці для врахування як сезонних, так і кумулятивних ефектів впливу стоку на динаміку кількісного розвитку фітопланктону.

Для забезпечення надійності результатів дані було очищено від викидів за допомогою методу міжквартильного розмаху (IQR) із множителем 1,0 для всіх кореляцій, що забезпечує суворішу фільтрацію екстремальних значень порівняно зі стандартним множителем 1,5, зменшуючи вплив аномалій і підвищуючи точність аналізу (Tukey 1977). Ця фільтрація забезпечила включення лише найбільш репрезентативних даних, підвищивши надійність кореляційного аналізу. Тест на чутливість показав стабільність позитивного напрямку кореляції. Без фільтрації: $n = 21$, $r = 0,46\text{--}0,52$ (для *Chl-a* > $2,23$ та > $4,63$). У разі жорсткої фільтрації (IQR $k = 1,0$) вилучається 19–24 % аномалій, r падає до $0,21\text{--}0,28$, але висновок не змінюється. Обробка даних проводилася на основі синтаксису Python із використанням бібліотек Pandas, Numpy, Matplotlib і Scipy, а результати візуалізовано у вигляді діаграм розсіювання з лінійними трендами, коефіцієнтами кореляції Пірсона та p -значеннями для оцінки статистичної значущості.

Для аналізу впливу об'єму стоку річок Дунай та Дніпро на структурно-функціональні показники угруповань фітопланктону були використані масиви даних за період березень – червень 2000–2013 рр. Із загального масиву даних обробки фітопланктону за 2000–2013 рр. (805 проб) цьому періоду відповідали 208 проб фітопланктону, що характеризували десятирічний період досліджень із березня по травень, проведених у 2000–2001 та 2006–2013 рр. До аналізу залучався об'єм стоку річок за аналогічний період. У 2000–2001 рр. відбір проб фітопланктону проводився на полігоні 1, у 2006–2012 рр. – на полігоні 2, а у 2012–2013 рр. – на полігоні 3 (рис. 1).

Відбір проб на полігоні 1 проводився на п'яти станціях, розташованих в акваторії, обмеженій надводними хвилеломами (ст. 1, 2, 3) і за їхніми межами (ст. 4, 5). На полігоні 2 проби відбирали на чотирьох станціях, три з яких розташовані між берегом і підводним хвилеломом (ст. 1, 2, 3), а одна – за ним (ст. 4). На полігоні 3 проби відбирали на одній – відкритій станції (рис. 1). У 2000 і 2012 роках (полігон 2) відбір проб проводили з двотижневим інтер-

валом; у 2001, 2009 і 2011 роках – із тритижневим інтервалом; у 2006–2008 і 2010 роках – щомісяця, у 2012–2013 рр. (полігон 3) – щотижня.

Відбір проб фітопланктону проводили в поверхневому (0,5 м) шарі води. Проби об'ємом від 1,5 до 3 л фіксували 4%-м розчином формаліну й концентрували осадовим методом до об'єму 50–100 мл. У разі потреби додатково концентрували в седиментаційних циліндрах до об'єму 20 мл. Кількісну та таксономічну обробку зразків фітопланктону проводили за допомогою світлового мікроскопа Zeiss Primo Star зі збільшенням 400–1000X. Підрахунок клітин проводили у двох повтореннях у камері Нажотта (Najotta chamber) об'ємом 0,05 мл. Для додаткового підрахунку крупних клітин використовували камеру Седжвіка – Раффера (Sedgwick–Rafter chamber) об'ємом 1 мл. Вологу біомасу (B) розраховували за принципом подібності форми клітин і відповідних геометричних фігур припускаючи, що щільність клітин дорівнює 1 (Utermohl 1958). Розрахунок морфологічних показників одноклітинних водоростей (об'єму, W , і площі поверхні, S) проводили з урахуванням особливостей спеціальних морфологічних досліджень на основі закріплення за видом низки геометричних форм або вільної комбінації геоме-

тричних фігур. Внутрішньо популяційні зміни одноклітинних водоростей враховувалися шляхом виділення в популяціях природних угруповань (проб) морфологічно близьких комплексів – груп однорозмірних клітин. Під час вимірювання морфометричних параметрів клітин залежно від складності їх форми фіксувалися від 1 до 7 лінійних параметрів. На їх підставі в пробах фітопланктону виділялися групи однорозмірних клітин (*uni.c.gr*), кількість фітопланктону для яких варіювала від однієї до декількох тисяч клітин. Значення чисельності (N), біомаси (B), площі поверхні (S) і питомої поверхні (S/W), а також індексу поверхні (SI) для різних ієрархічних рівнів фітопланктону розраховувалися згідно з методикою (Мінічева, Зотов і Косенко 2003).

Матеріали емпіричних даних щодо макрофітобентосу й угруповання мікроепіфітону були отримані на станціях полігону 2 (рис. 1) у період березень – червень 2006–2024 рр. (мікроепіфітон відбирали з 2007 року). Загалом було відібрано 546 проб макрофітів і 176 проб мікроепіфітів. Проби відбиралися на бетонному субстраті берегозахисних споруд різної експозиції, а також на природних кам'янистих і черепашкових субстратах у прибережній зоні з використанням легковолодазного обладнання, перифітон-

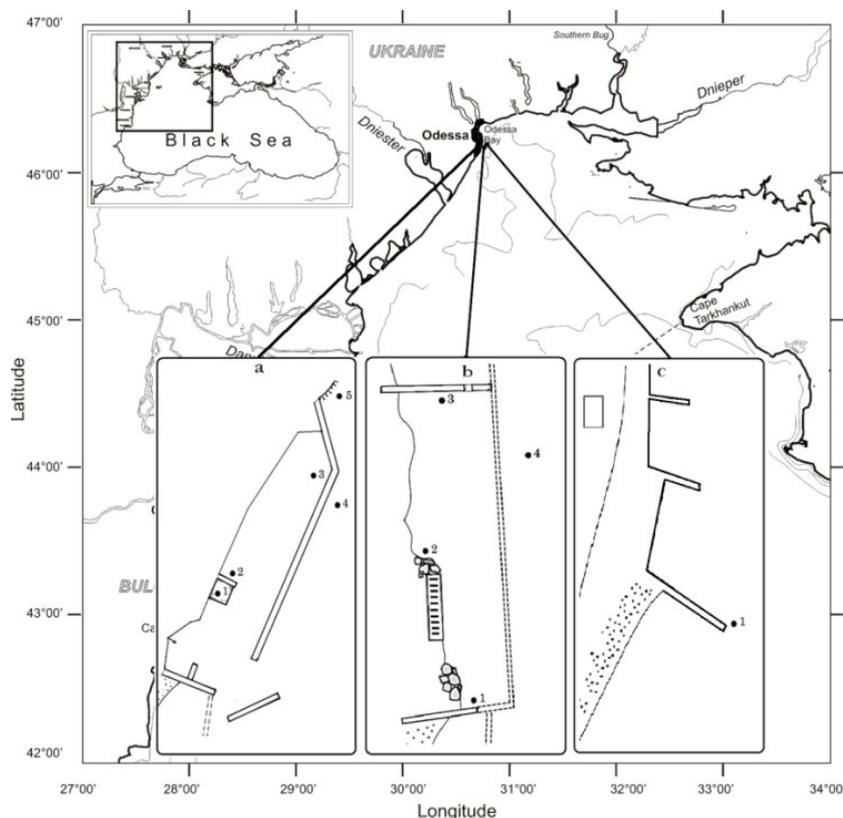


Рис. 1. Схема станцій на полігонах 1 (а), 2 (б) та 3 (с) в прибережній зоні м. Одеси (північно-західна частина Чорного моря)

ної рамки розміром (10 x 10 см), із відеофіксацією проєктивного покриття субстрату багатоклітинними водоростями і структури рослинного покриву.

Для порівняння угруповань макроводоростей, які формуються під впливом різних об'ємів річкового стоку, в роботі були використані дані спеціальних досліджень морфофункціональних індикаторів фітоперифітону штучних субстратів, виконані навесні та восени 2021 року в аванделті Дунаю (17.05, 24.10) і Дніпровсько-Бузькому лимані (21.05, 03.11) в об'ємі 125 рамок кількісного обліку.

Для відбору й аналізу проб альгологічного матеріалу використовувалися класичні методи обліку макрофітів, включно з визначенням флористичного складу, проєктивного покриття, біомаси (Зинова 1967; Громов 1973; Калугина-Гутник 1975; Еременко 1980), та мікрофітів із визначенням флористичного складу, чисельності (Гусяков 1980; Гусяков та ін. 1992).

Крім вищевказаних класичних показників структури донних водоростей, для макро- і мікроугруповань використовувався комплекс морфофункціональних індикаторів, який дає можливість на підставі морфологічних особливостей, розміру талому та клітини оцінювати екологічну активність кожного виду (S/W – питома поверхня популяції, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$) і загальну інтенсивність первинно-продукційних процесів (SI – індекс поверхні), яку реалізує альгоугруповання в конкретних умовах дії абіотичних та антропогенних факторів (Миничева 1987; Миничева, Зотов и Косенко 2003; Калашник 2013). Морфофункціональні індикатори макро- та мікрофітобентосу дають змогу за стандартами Морської стратегії (MSFD 2008) оцінювати категорії еколо-

гічного статусу морської екосистеми (GES – Good Ecological Status або NotGes) (Minicheva 2013; Kalashnik 2018).

Результати та обговорення

Мінливість річкового стоку, що надходить в ПнЗЧМ

Вплив річкових вод на північно-західну частину Чорного моря є комплексним і здебільшого залежить від водного режиму великих річок, зокрема Дунаю, Дніпра, Південного Бугу та Дністра.

На рисунках 2, 3 наведено багаторічний хід загальних річних об'ємів стоку річок Дунай і Дніпро за досліджуваний період.

Так, річний об'єм стоку р. Дунай перевищує стік р. Дніпро в середньому у 5,43 раза. Спостерігаються тенденції до загального зниження річкового стоку як для Дунаю, так і для Дніпра в період з 2000 по 2024 рік, про що свідчать спадаючі тренди. Потрібно зазначити, що в період 1981–1999 рр. такі тенденції не спостерігалися.

Середні значення річного об'єму стоку Дунаю за обидва періоди однакові і дорівнюють 201 км^3 за рахунок більших максимумів у період 2000–2014 рр. Характерно, що коефіцієнт варіації в період 2000–2024 рр. вищий ($Cv_{2000-2024} = 18,1$) за коефіцієнт варіації періоду 1981–1999 рр. ($Cv_{1981-1999} = 15,2$).

Схожа ситуація спостерігається і для р. Дніпро, але в цьому випадку середні значення річних об'ємів стоку за поточний період 2000–2020 рр. ($36,8 \text{ км}^3$) на 10 % менше, ніж за період 1981–1999 рр. ($41,1 \text{ км}^3$). Коефіцієнт варіації поточного періоду $Cv_{2020-2024} = 26,2$ також вищий за відповідний коефіцієнт варіації попереднього періоду $Cv_{1981-1999} = 24,4$.

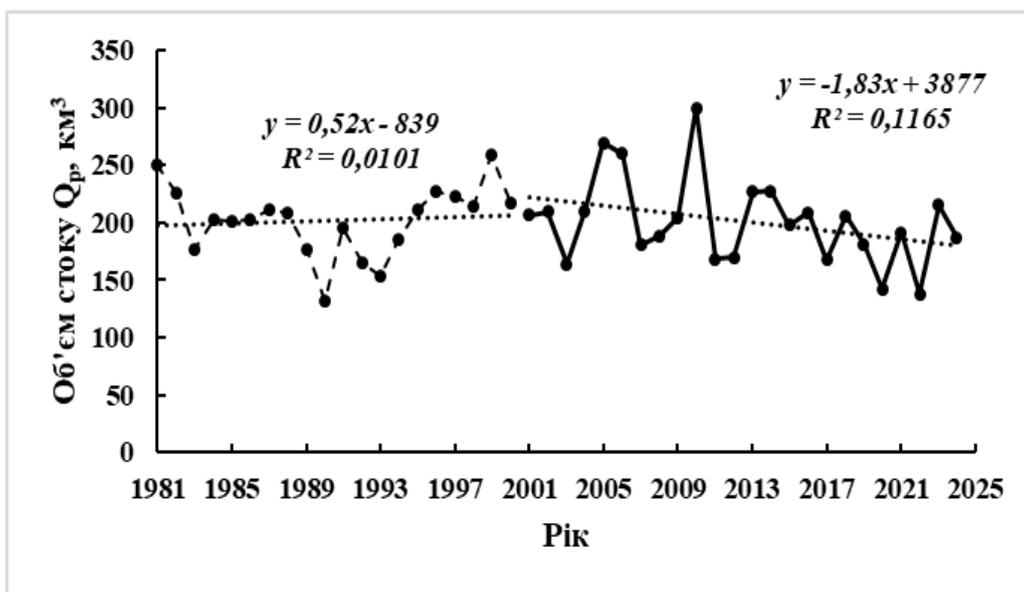


Рис. 2. Мінливість річних об'ємів стоку р. Дунай за період 1981–2024 рр.

Отже, виявлено збільшення мінливості річкового стоку одночасно зі зменшенням річного об'єму стоку кожної з річок за досліджуваний період.

За характером водного режиму р. Дніпро та р. Дунай належать до рівнинного типу річок із переважно сніговим живленням у верхній та середній частинах водозборів, отже, найбільш багатоводною фазою їх стоку є весняне водопілля. Середні дати початку весняного водопілля обох річок припадають на першу-другу декаду березня, а середні дати закінчення водопілля – на другу-третю декаду червня. Об'єм стоку за період весняного водопілля (з березня по червень) 2000–2024 рр. становить 42,8 % від річного об'єму стоку р. Дунай і 40,2 % від річного об'єму стоку р. Дніпро.

З рисунка 4 видно, що в період 2000–2024 рр. найбільші місячні об'єми стоку спостерігаються з березня по червень і припадають на період весняного водопілля для Дунаю (а) та Дніпра (б). Для обох річок характерне різке збільшення стоку в березні, з максимумом у квітні та поступовим зменшенням у травні – червні.

Найбільша мінливість стоку протягом року спостерігається саме в період весняного водопілля для обох річок – з березня по червень, найменша – у період літньо-осінньої межени з серпня по листопад. На р. Дніпро середнє та медіанне значення місячного стоку в травні більше, ніж у квітні й червні. На р. Дунай мінливість стоку в межах середньоводних років менша, ніж у квітні та червні, що, найімовірніше, є проявом регулювання стоку.

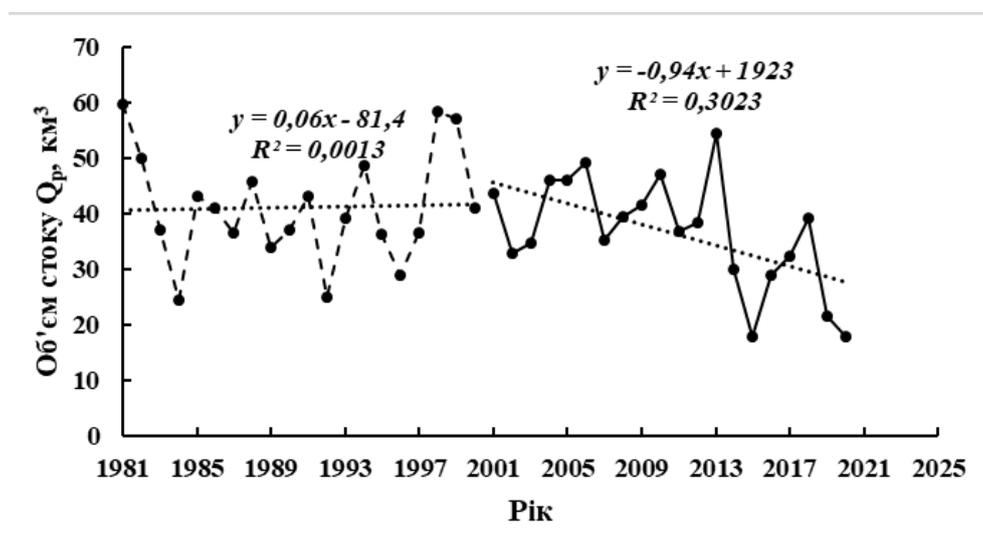


Рис. 3. Мінливість річних об'ємів стоку р. Дніпро за період 1981–2020 рр.

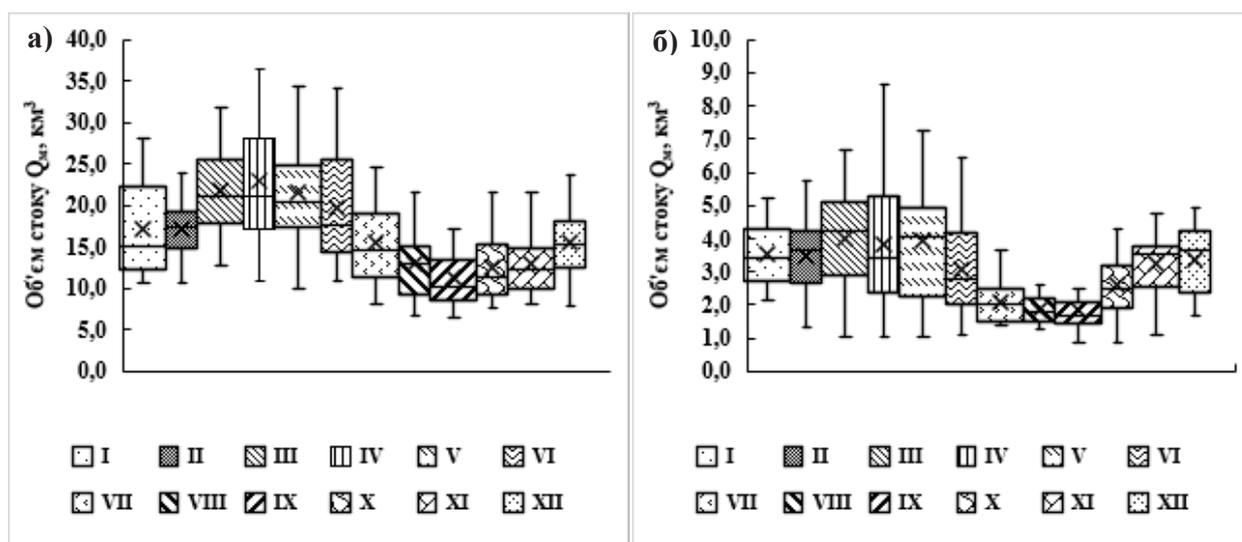


Рис. 4. Багаторічний внутрішньорічний розподіл об'єму стоку за місяцями:

а) р. Дунай – м. Рені (2000–2024 рр.); б) р. Дніпро – Каховська ГЕС (2000–2020 рр.). Наведені мінімальні, максимальні, медіанні та середні (хрестики) значення, а також значення 0,25- та 0,75-квантилей

З представленої на рисунку 5 багаторічної мінливості сумарного за період весняного водопілля об'єму стоку річок Дунай і Дніпро видно, що йому так само, як об'ємам загального за рік стоку, притаманні тенденції до зменшення в період 2000–2024 рр. Сумарний об'єм стоку р. Дунай під час весняного водопілля в цей період року у 5,8 раза більший, ніж для Дніпра. Середній об'єм стоку за весняне водопілля для р. Дунай дорівнює 86 км^3 (з мінімальним значенням $48,2 \text{ км}^3$ у 2020 р. і максимальним $135,3 \text{ км}^3$ у 2006 р.), а для Дніпра – $14,8 \text{ км}^3$ (з мінімальним значенням $4,19 \text{ км}^3$ у 2020 р. і максимальним $28,3 \text{ км}^3$ у 2013 р.).

Варто зазначити, що у всі місяці, крім березня (для р. Дунай), під час весняного водопілля місячні об'єми стоку для обох річок зменшились у період 2000–2024 рр. порівняно з 1981–1999 рр. (рис. 6). Найбільша різниця спостерігається в травні для

р. Дніпро, де місячний стік зменшився в поточний період на 38 % порівняно з попереднім періодом. Лише в одному випадку – у березні, у період 2000–2024 рр. на р. Дунай спостерігається більший місячний об'єм стоку, ніж у минулому періоді. Отже, можна стверджувати, що за поточний період початок водопілля змістився на більш ранні дати лютого – березня.

Вплив річкового стоку на екологічні умови в Одеському районі ПнЗЧМ

Згідно із сучасним районуванням Чорного й Азовського морів (Морська ... 2021) Одеський район ПнЗЧМ обмежений траверсами портів Південний і Чорноморськ, належить до Дніпровсько-Бузького району, що підтверджується низкою попередніх досліджень, оснований на аналізі даних спостережень за океанографічними й гідроекологічними характеристиками морських вод (Тучковенко и др.

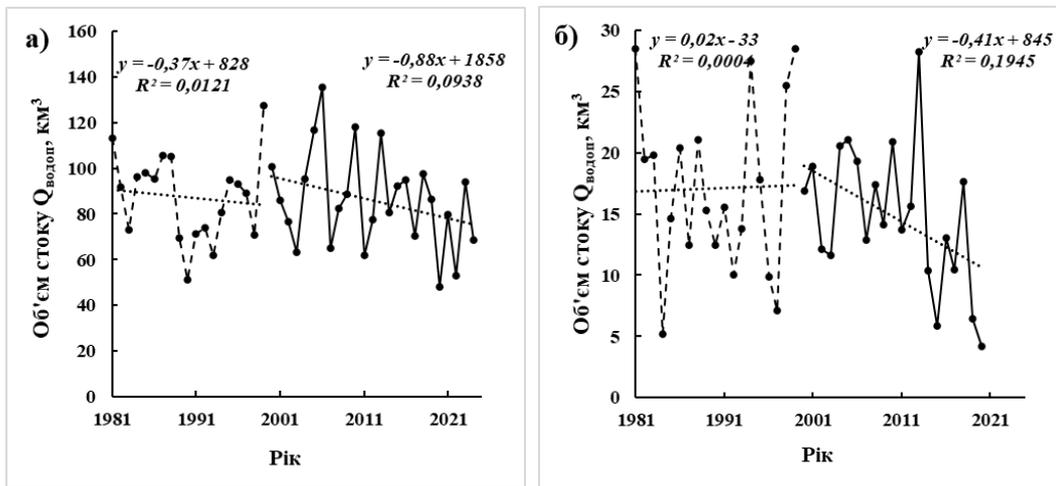


Рис. 5. Мінливість сумарного за період весняного водопілля (березень – червень) об'єму стоку за багаторічний період: а) р. Дунай; б) р. Дніпро

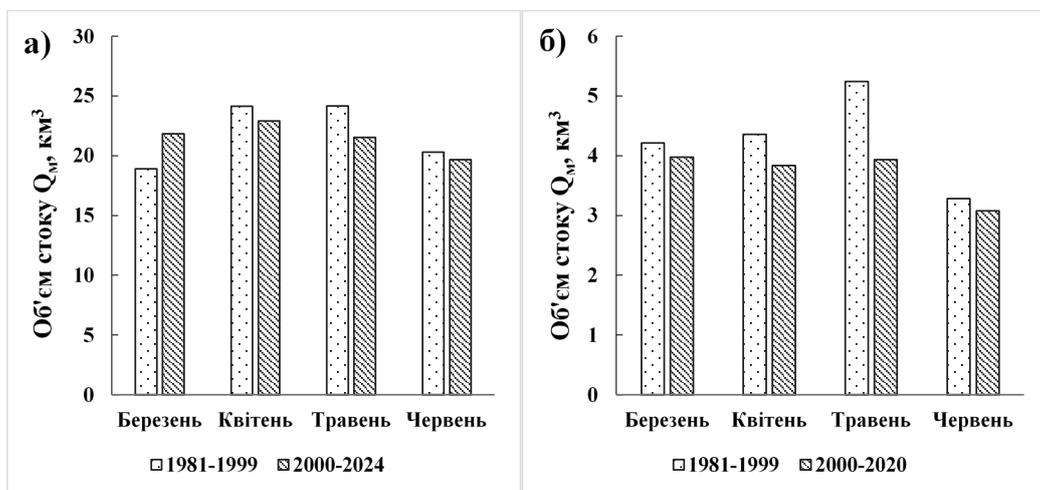


Рис. 6. Мінливість середніх за багаторічний період місячних об'ємів стоку під час весняного водопілля (березень – червень): а) р. Дунай і б) р. Дніпро

2004; Иванов и Тучковенко 2006; Гідрологічні та гідрохімічні показники ... 2008). Це означає, що Одеський район ПнЗЧМ розташований у зоні прямого впливу надходження трансформованих річкових вод Дніпра та Південного Бугу, особливо в багатоводні періоди року. Особливості поширення розпріснених вод із Дніпровсько-Бузького лиману описані в роботах В. С. Большакова (1970), В. О. Иванова та Ю. С. Тучковенка (2006).

Як трасер поширення на акваторії ПнЗЧМ трансформованих річкових вод можна розглядати солоність вод, оскільки на її просторово-часову мінливість не впливають хіміко-біологічні процеси, які відбуваються в морському середовищі. Тому для визначення впливу річкового стоку на формування гідрологічних умов в Одеському районі ПнЗЧМ було застосовано методи кореляційного аналізу між витратами річок і солоністю морської води поблизу м. Одеса.

Так, за період 1948–1982 рр. було встановлено наявність значущого парного кореляційного зв'язку річних стоків Дунаю та Дніпра із середніми річними значеннями солоності вод ($S_{\text{од}}$) на станції «Одеса-порт» (Альтман и др. 1988). Коефіцієнт кореляції солоності вод зі стоком Дніпра ($Q_{\text{дн}}$) дорівнював $-0,75$, а зі стоком Дунаю ($Q_{\text{дун}}$) – $-0,62$. Рівняння синхронної лінійної множинної регресії мало вигляд $S_{\text{од}} = 18,25 - 0,046Q_{\text{дун}} - 0,08Q_{\text{дн}}$. Коефіцієнт множинної кореляції дорівнював $0,84$. У роботі О. Н. Демидова (1991) наводиться кількісна залежність між середньою місячною солоністю води поблизу м. Одеса та середнім місячним об'ємом стоку Дніпра, отримана шляхом спільного аналізу коливань цих параметрів. Рівняння регресії має вигляд: $S_{\text{од}} = 19,67(Q_{\text{дн}} + 1)^{-0,169}e^{-0,01(Q_{\text{дн}}+1)}$. Кореляційне співвідношення зв'язку дорівнює $0,78$. Рівняння можна застосовувати у разі значень стоку Дніпра менших за $19 \text{ км}^3\text{міс}^{-1}$. Так, за даними гідрометеостанції «Одеса-порт», найбільший вплив паводка проявляється дещо пізніше, ніж в інших районах ПнЗЧМ, – у травні.

Закономірності зміни сезонних площ трансформації річкових вод у ПнЗЧМ описані Ю. П. Ільїним (2006). Зокрема, звертається увага на те, що площі опріснення, зумовлені сумарним річковим стоком Дунаю і Дніпра, зростають у березні та квітні, а у травні мають локальний мінімум (незважаючи на те, що це місяць максимального сумарного стоку), після чого зростають у червні й липні, коли сумарний стік зменшується. Пояснюється це тим, що в березні – травні відбувається зміна напрямку вітру із зимового північно-західного (дме на південний схід) на південно-східний (дме на північний захід), тобто опріснені води притискаються до узбережжя і площі зон трансформації зменшуються,

незважаючи на збільшення обсягу річкового стоку. У червні – липні знову посилюються вітри західних румбів (переважно північно-західний), тому опріснені води переносяться на схід, південний схід, а площа опріснення зростає навіть за істотного зниження обсягу прісної води, що надходить із річок.

Також у цій роботі представлені коефіцієнти кореляції солоності води в поверхневому шарі Одеського району ПнЗЧМ у липні – серпні з середньомісячними витратами річок Дунай і Дніпро + Південний Буг. Встановлені значущі коефіцієнти кореляції, які перевищують значення $0,4$, між солоністю води в липні та стоком Дунаю в травні, червні й липні, а також між солоністю води в липні та стоком Дніпро + Південний Буг у травні, червні; у серпні – зі стоком Дніпро + Південний Буг у травні – серпні (помісячно). Висунута гіпотеза, що висока кореляція між солоністю вод в Одеському районі ПнЗЧМ у липні і стоком р. Дунай у травні – липні пояснюється високою кореляцією з квітня по липень стоку річок між собою.

Отже, виникає питання, унаслідок яких гідрофізичних та гідродинамічних процесів стік р. Дунай може впливати на гідроекологічні характеристики екосистеми Одеського району ПнЗЧМ, враховуючи, що шлейф дунайських вод із поширенням уздовж західного узбережжя змішується спочатку зі стоком із Дністровського, а потім Дніпровсько-Бузького лиману. Відстань від Одеської затоки до гирлової частини р. Дунай становить понад 150 км , а до Кінбурнської протоки – близько 60 км . Тож гідродинамічне розбавлення дунайських вод на шляху до Одеського району ПнЗЧМ буде значно більшим, ніж дніпровсько-бузьких. У виняткових випадках води дунайського стоку можуть досягати району Цареградського гирла, але переважно вони не перетинають широту $45^{\circ}50'$ півн. ш. (тобто північну широту лиману Алібей) (Гідрологічні та гідрохімічні показники ... 2008).

За отриманими оцінками на основі аналізу візуальних супутникових знімків (Матвеев и Попов 2012) поширення дунайських вод має переважно південний, південно-східний напрямок у всі сезони року, з повторюваністю від $67,8 \%$ взимку до $74,3 \%$ влітку. Навесні повторюваність течій східного та північно-східного напрямків, які сприяють проникненню дунайських вод на північ, становить $25,5 \%$. Також встановлено, що східні напрямки вихідних струменів дунайської води у разі вітрів із південною складовою виникають за вітрів середньою швидкістю $3,3\text{--}5,3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Спрямовані на північ течії можуть виникати тільки за вітрів зі швидкостями не менше ніж $4,6\text{--}5,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Отримані відносно невеликі величини коефіцієнта кореляції між напрямками поширення дунайських вод і вітру,

що за висновком авторів свідчить про істотний внесок густинної циркуляції вод у динамічно активному районі Придунайського узмор'я та прилеглих районах моря. Водночас наголошується, що тривалі вітри з південною складовою, повторюваність яких є великою у західній половині шельфу Чорного моря в тепле півріччя, можуть бути причиною припинення вздовж берегового поверхневого перенесення дунайських вод у південному напрямку та їх накопичення в центральних та північних районах ПнЗЧМ.

Відповідно до сучасних уявлень про особливості формування циркуляції вод в акваторії ПнЗЧМ, сформованих за результатами гідродинамічного моделювання, вона визначається: по-перше, потоками води через границю шельфу (ступенем проникнення на шельф Основної чорноморської течії – ОЧТ), зумовленими вітром; по-друге, сильною горизонтальною стратифікацією вод (градієнтом густини) біля західного берега, спричиненою річковим стоком. Унаслідок дії вітру поверхневі течії в ПнЗЧМ спрямовані здебільшого на південний захід, що викликає підвищення рівня моря вздовж західного берега й зумовлену цим градієнтну течію спрямовану на південь. Ця поверхнева течія компенсує надходження до ПнЗЧМ вод ОЧТ і визначається ним. Унаслідок сильної горизонтальної стратифікації, викликані стоком річок, у підповерхневому шарі (на горизонті 15–20 м) біля західного берега утворюється протитечія, спрямована на північ, яка через Одеську улоговину досягає Одеського району ПнЗЧМ. У полі середньомісячних кліматичних течій ця підповерхнева протитечія простежується цілий рік. Улітку проникнення вод ОЧТ на північно-західний шельф є мінімальним. Через це значно зменшується внесок у градієнт тиску підвищення рівня моря вздовж західного узбережжя ПнЗЧМ. У цей період року він підтримується переважно стоком річок і також обумовлює спрямовану на південь вздовжберегову течію, але значно слабшу. Водночас наявність біля західного берега прогрітих і опріснених вод (за відсутності прибережного апвелінгу) сприяє формуванню спрямованих на північ густинних течій, тобто в напрямку Одеського району ПнЗЧМ.

Описані вище процеси, що визначають циркуляцію вод в акваторії ПнЗЧМ, сприяють проникненню трансформованих дунайських вод до Одеського району ПнЗЧМ та впливу стоку р. Дунай на його гідроекологічні характеристики.

Зв'язок показників інтенсивності функціонування водної рослинності з об'ємами річкового стоку

Вплив річкового стоку на площі цвітіння фітопланктону за концентрацією хлорофілу-а. Визначалася наявність значущих статистичних зв'язків між об'ємами сумарного річкового стоку Дунаю і Дніпра

за багаторічний період і площами акваторій ПнЗЧМ, на яких середні за весняний сезон (березень – квітень) і щомісячні концентрації хлорофілу-а, визначені за супутниковими даними, перевищують встановлені для них порогові значення. Часові вікна даних уніфіковано для періоду 2000–2020 рр. із фокусом на весняно-літній сезон (березень – червень) через пікові надходження біогенів із повеннями; специфічні підперіоди (наприклад, березень – квітень) використовувалися для аналізу кумулятивного ефекту й обґрунтовані нижче. Результати аналізу представлені на рисунках 7–9.

Як і очікувалося, виявлено наявність значущого статистичного зв'язку з помірно позитивною кореляцією ($r > 0,5$, $p < 0,05$, де p – рівень статистичної значущості) (Field 2013) між середніми за сезон місячними обсягами річкового стоку в період 2000–2020 рр. і площею зон в акваторії ПнЗЧМ, на яких концентрація хлорофілу-а (*Chl-a*) перевищує обидва порогові значення – $2,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ та $4,63 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 7).

Пояснюється це домінуючим впливом річкового стоку на продукцію фітопланктону в ПнЗЧМ через привнесення ним до моря значної кількості мінеральних форм біогенних речовин, які стимулюють первинне продукування органічної речовини на фоні підвищення температури води. Зауважимо, що аналогічний аналіз, обмежений періодом 2010–2020 рр., показує більш тісні кореляційні зв'язки між вказаними характеристиками ($r > 0,7$), що в першому припущенні пояснюється збільшенням прояву кліматичних змін, які відбуваються, а також підвищенням точності супутникових вимірювань і удосконаленням алгоритмів їх обробки.

Хоча і меншою мірою ($r = 0,38$, $p < 0,05$), ніж у попередньому випадку, але простежується (рис. 8а) також зв'язок між максимальними у весняний сезон кожного року значеннями місячного стоку та середньою за сезон площею перевищення аномальних значень концентрації хлорофілу-а ($> 4,63 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$). Тобто максимальний місячний об'єм стоку в один із весняних місяців року значною мірою впливає на площу цвітіння фітопланктону в акваторії ПнЗЧМ загалом за весь сезон.

Аналіз наявного зв'язку між щомісячними обсягами річкового стоку і площами зон перевищення порогових значень хлорофілу-а за багаторічний період 2000–2020 рр. показав, що найбільше він проявляється у квітні та червні (рис. 9). У травні зв'язок менш виражений через гідрологічні особливості поширення трансформованих річкових вод уздовж узбережжя, які спричинені зміною вітрових умов, що детально пояснюється в попередньому розділі цієї статті згідно з іншими даними (Ільїн 2006).

На рисунку 8б продемонстровано зв'язок між середніми місячними обсягами річкового

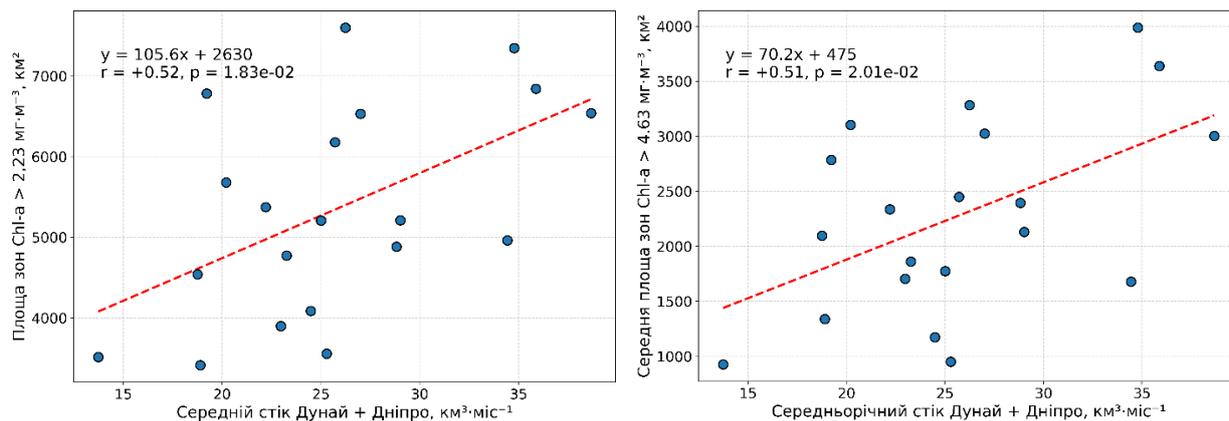


Рис. 7. Статистичний зв'язок між середніми за весняний сезон (березень – квітень) місячними об'ємами річкового стоку в період 2000–2020 рр. і площею акваторії ПнЗЧМ, на якій концентрації хлорофілу-а перевищували порогове значення 2,23 мг·м⁻³ (ліворуч) і 4,63 мг·м⁻³ (праворуч)

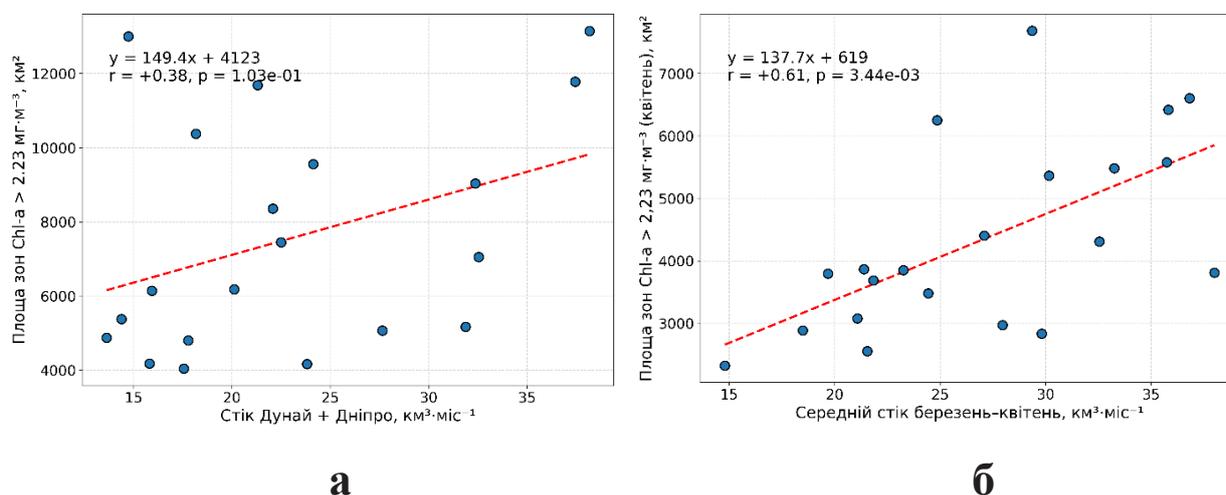


Рис. 8. Статистичний зв'язок між: а) максимальними у весняний сезон об'ємами місячного стоку та середньою за сезон площею перевищення аномально високих значень концентрації хлорофілу-а (> 4,63 мг·м⁻³); б) середніми місячними обсягами річкового стоку Дунаю і Дніпра в період березень – квітень із площею ділянок ПнЗЧМ, на яких концентрації хлорофілу-а перевищували порогове значення 2,23 мг·м⁻³ у квітні за період 2000–2020 рр.

стоку Дунаю і Дніпра в період березень – квітень за багаторічний період 2000–2020 рр. із площею ділянок ПнЗЧМ, на яких концентрації хлорофілу-а перевищували порогове значення 2,23 мг·м⁻³ у квітні. Отримана залежність із позитивним значущим коефіцієнтом кореляції $r = 0,61$ демонструє кумулятивний вплив річкового стоку за декілька місяців.

Результати проведеного аналізу свідчать, що річковий стік є значним чинником евтрофікації вод ПнЗЧМ, особливо у весняний період (з березня по червень), коли надходження з ним до моря поживних речовин досягає максимуму через весняні повені. Середні багаторічні площі зон евтрофованих вод ста-

новили приблизно 5900 км² для $Chl-a > 2,23$ мг·м⁻³ та 2300 км² для $Chl-a > 4,63$ мг·м⁻³.

У середньому збільшення сумарного річкового стоку Дунаю та Дніпра на 1 км³ у ранньовесняний період року асоціюється з розширенням площі евтрофних вод ($Chl-a > 2,23$ мг·м⁻³) на 150–200 км².

Отримані помірні значення коефіцієнтів лінійної кореляції зумовлені впливом інших, окрім об'ємів річкового стоку, природних і антропогенних чинників, які визначають швидкість продукування органічної речовини фітопланктоном у весняні місяці: наприклад, зміни температури води внаслідок прогріву вод, коливання вмісту в річковому стоці біогенних речовин, мінеральної і органічної зависі та інші.

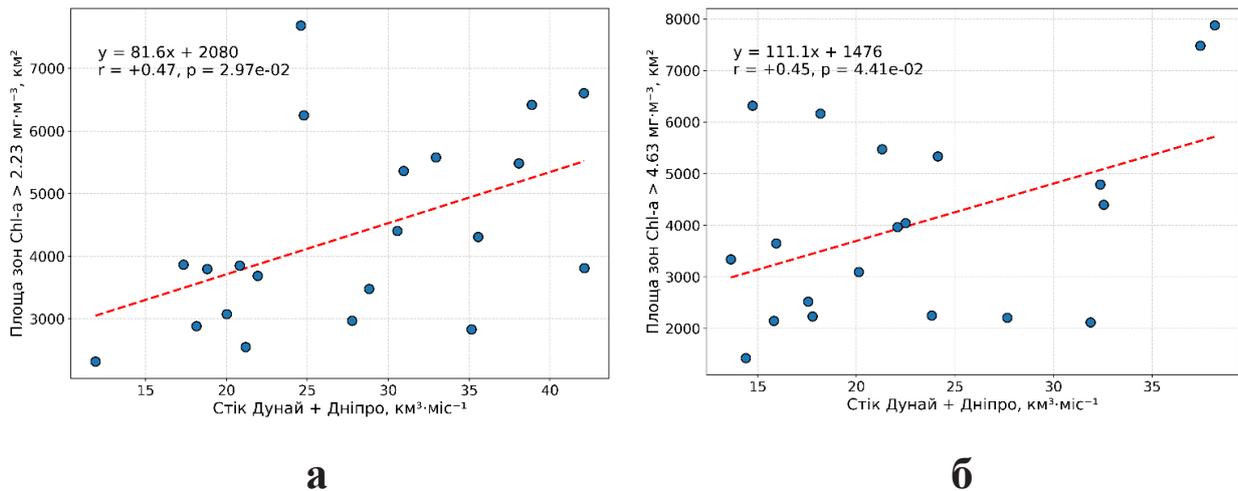


Рис. 9. Статистичний зв'язок між середніми місячними обсягами сумарного річкового стоку Дунаю і Дніпра у квітні (а) і червні (б) та площею ділянок ПнЗЧМ, на яких концентрації хлорофілу-а перевищували порогове значення 2,23 мг·м⁻³ у квітні (а) і 4,63 мг·м⁻³ у червні (б) за період 2000–2020 рр.

Вплив річкового стоку на часову мінливість угруповань фітопланктону. Мінливість середньомісячних значень показників фітопланктону Одеського регіону відповідає літературним даним про характер річної сукцесії ПнЗЧМ, пов'язаної з весняно-літньою, осінньо-зимовою і зимовою стадіями розвитку (Виноградова, Маштакова и Дерезюк 1986). Одним із головних чинників, які визначають зимову стадію сукцесії, є відсутність сезонного термокліну та збагачення вод фотичного шару біогенними речовинами внаслідок інтенсивної щільнісної конвекції і вітрового перемішування вод у період осінньо-зимових штормів. Найвищий рівень розвитку фітопланктону під час весняно-літньої стадії значною мірою визначається надходженням біогенних речовин із максимальним стоком річок у період весняного водопілля та паводків на фоні зростання температури води. При цьому на початку весни зберігається суттєвий вплив запасу біогенних речовин у фотичному шарі, сформованого внаслідок зимових гідродинамічних процесів.

Як прояв зимової стадії сукцесії із січня по березень спостерігається поступове зростання біомаси (B), площі поверхні (S) та індексу поверхні (SI) угруповань фітопланктону з незначним спадом у квітні (у період максимального стоку р. Дунай) (рис. 10). У квітні – червні в ПнЗЧМ формується активна весняна стадія сукцесії з різким зростанням показників N , B , S та SI , які в червні досягають максимуму, з подальшим поступовим спадом до вересня.

Квітневе зниження й різке травневе зростання S/W угруповань також відповідає уявленням про весняно-літню стадію сукцесії фітопланктону в ПнЗЧМ. Під час неї, на відміну від інших стадій, розвиток починається крупними формами, з низькою питомою

швидкістю росту та фотосинтезу, і закінчується дрібноклітинними високо функціональними формами (Виноградова, Маштакова и Дерезюк 1986). Запізнювання розвитку фітопланктону відносно максимумів стоку річок дає змогу припустити, що вплив цього чинника може характеризуватися поступовістю й затримкою максимальних проявів, тобто інерційністю системи. Це свідчить про доцільність аналізу не тільки синхронних, а й «віддалених» впливів. Крім того, можна припустити, що характеристики березневого стоку не матимуть визначального впливу на розвиток фітопланктону в цьому місяці внаслідок як інерційності реакції фітопланктону, так і наявності прояву інших чинників, що визначали попередню (зимову) стадію сукцесії.

Залежності, отримані для синхронних рядів даних місячного стоку річок і показників угруповань фітопланктону, відповідають теоретичним уявленням про вплив весняного водопілля на розвиток сукцесії фітопланктону. В березні, до початку активної повені, виявлені від'ємні кореляції між об'ємами стоку обох річок і сукупністю показників фітопланктону (табл. 1). Найбільш сильний обернений зв'язок у цьому місяці ($r_n = -0,78$) відзначається між $Q_{\text{Дніпро}}$ і S . Ця залежність описується степеневу регресією $S = 674127Q_{\text{Дніпро}}^{-1,214}$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,66$, де S в мкм²м⁻³ і Q в км³міс⁻¹. Коефіцієнт кореляції оберненої степеневу залежності (r_n) між $Q_{\text{Дунай}}$ і S менший і дорівнює $-0,68$ зі значенням $R^2 = 0,57$ (табл. 1).

У квітні виявлено сильний або помірний прямий нелінійний зв'язок місячного об'єму стоку річки Дунай ($Q_{\text{Дунай}}$) з усіма показниками фітопланктону, крім S/W , позитивний зв'язок з яким є слабким (табл. 1). Максимальні значення кореляції з $Q_{\text{Дунай}}$

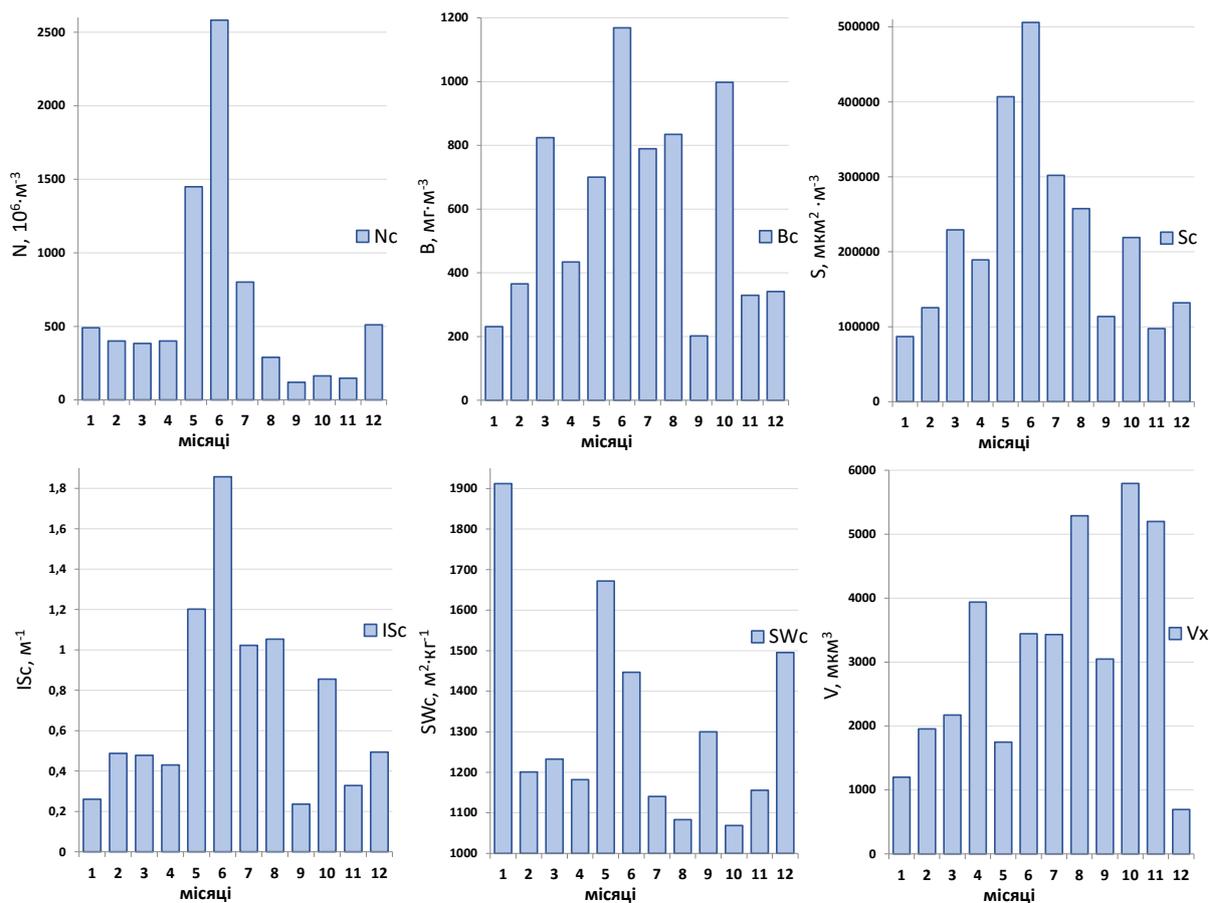


Рис. 10. Внутрішньорічна мінливість значення чисельності (N), біомаси (B), площі поверхні (S), індексу поверхні (SI), питомої поверхні (S/W) та середнього об'єму клітин (V) угруповань фітопланктону в Одеському районі ПнЗЧМ (за даними 2000–2001, 2006–2013 рр.)

Таблиця 1
Коефіцієнти нелінійної кореляції чисельності (N), біомаси (B), площі поверхні (S), індексу поверхні (SI), питомої поверхні (S/W) угруповань фітопланктону з об'ємами місячного стоку річок Дунай ($Q_{\text{Дунай}}$) та Дніпро ($Q_{\text{Дніпро}}$) в березні – червні (за даними 2000–2001, 2006–2013 рр.)

Стік річки	Місяць	N	B	S	IS	S/W
$Q_{\text{Дунай}}$	Березень	-0,58	-0,34	-0,68	-0,33	-0,49
	Квітень	0,55	0,35	0,51	0,76	0,23
	Травень	0,13	-0,03	-0,10	-0,54	-0,47
	Червень	-0,21	0,11	-0,07	0,26	0,45
$Q_{\text{Дніпро}}$	Березень	-0,37	-0,48	-0,78	-0,40	-0,33
	Квітень	0,14	0,61	0,44	0,72	-0,29
	Травень	-0,20	-0,21	-0,09	-0,50	-0,42
	Червень	0,17	0,32	0,27	0,38	0,51

виявлені для показника SI ($r = 0,76$). Квітневий об'єм стоку $Q_{\text{Дніпро}}$ також має найбільшу пряму кореляцію з SI ($r_n = 0,72$) (значення коефіцієнта нелінійної кореляції з біомасою B $r_n = 0,61$), що вказує на зростання біомаси та структурної складності угруповань. Як і обернені кореляційні залежності, цей прямий зв'язок також описується степенною регресією зі значеннями коефіцієнта детермінації (R^2) 0,59 і 0,51 для Дунаю і Дніпра відповідно (табл. 1). Ці позитивні

(прямі) зв'язки можуть бути пояснені як остаточним нівелюванням впливу фактора зимового гідрологічного перемішування, так і потужним впливом максимального квітневого паводка.

У травні об'єми стоку як Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$), так і Дніпра ($Q_{\text{Дніпро}}$) демонструють переважно слабкі обернені або близькі до нуля кореляції з показниками фітопланктону. Виняток становить SI , від'ємний коефіцієнт кореляції оберненого зв'язку якого

з $Q_{\text{Дунай}}$ дорівнює $-0,54$, а з $Q_{\text{Дніпро}}$ – $-0,50$ (табл. 1). Як прояв запізнення впливу стоку річок, це узгоджується зі зростанням значень показників фітопланктону у разі зниження об'ємів стоку, тоді як внесені квітневим паводком біогенні речовини продовжують стимулювати розвиток водоростей. Крім того, у цей період стрімко зростає температура води. Вплив цього чинника на показники фітопланктону може домінувати над впливом змін річкового стоку.

У червні продовжується прояв ефекту запізнення реакції фітопланктону на вплив весняного паводка, що зумовлює слабку кореляцію стоку річок з усіма показниками фітопланктону, крім S/W . Помірна позитивна (пряма) кореляція S/W з $Q_{\text{Дніпро}}$ ($r_n = 0,51$) і $Q_{\text{Дунай}}$ ($r_n = 0,45$) може бути пов'язана зі зниженням функціональної активності водоростей на фоні нормалізації стоку річок після завершення весняної стадії сукцесії фітопланктону.

Таким чином, незважаючи на відмінності водного режиму Дніпра та Дунаю, а також значну міжрічну варіативність об'єму стоку у весняний період різних років, реакція структурно-функціональної організації фітопланктону на зміни стоку цих річок має спільні особливості (табл. 1). Це може бути пов'язано із закономірностями розвитку сукцесійних змін на етапах перебудови структури угруповань, а також із відзначеними раніше особливостями впливу зміни вітрових умов на розповсюдження шлейфа трансформованих річкових вод уздовж узбережжя ПнЗЧМ.

Для перевірки припущення, що стік річок надає тривалий вплив на фітопланктон, були проаналізовані кореляційні зв'язки об'єму стоку певного місяця з біологічними показниками наступних місяців.

Під час сумісного аналізу березневого річкового стоку Дунаю та Дніпра і квітневих показників фітопланктону було виявлено сильний прямий зв'язок з B ($r_n = 0,71$ і $0,77$ відповідно), а для Дунаю також із SI ($r_n = 0,62$) (табл. 2).

Ці нелінійні кореляційні залежності описуються графіками поліноміальної регресії зі значеннями коефіцієнта детермінації (R^2) $0,53$ і $0,68$ відповідно (рис. 11).

Вплив березневого стоку (Q) на показники фітопланктону в травні характеризувався оберненими кореляціями: помірними для Дунаю і сильними для Дніпра (табл. 2). Максимальні кореляції з $Q_{\text{Дніпро}}$, що описуються поліноміальною регресією зі значеннями R^2 відповідно $0,72$, $0,80$ та $0,94$, були виявлені для SI ($r_n = -0,73$), S ($-0,76$) та N ($-0,75$) фітопланктону (табл. 2). Помірний обернений зв'язок з $Q_{\text{Дніпро}}$ виявлений також для S/W_c ($r_n = -0,57$).

Вплив березневого стоку Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$) на значення показників фітопланктону в червні був слабким, тоді як зберігався сильний обернений зв'язок $Q_{\text{Дніпро}}$ з N ($r_n = -0,71$, $R^2 = 0,85$) і помірний – з SI ($r_n = -0,61$) і S/W ($r_n = -0,64$) (табл. 2).

Таким чином, спільною рисою «віддаленої» реакції фітопланктону на вплив березневого місячного стоку $Q_{\text{Дунай}}$ і $Q_{\text{Дніпро}}$ був сильний прямий зв'язок із біомасою у квітні й обернені зв'язки з показниками у травні: помірні для $Q_{\text{Дунай}}$ і сильні для $Q_{\text{Дніпро}}$ (табл. 2). Зв'язок $Q_{\text{Дніпро}}$ з питомою поверхнею S/W характеризувався поступовим зростанням оберненої кореляції від квітня до червня зі слабкими оберненими зв'язками з $Q_{\text{Дунай}}$. Зв'язок між березневим стоком $Q_{\text{Дунай}}$ і показниками фітопланктону в червні був фактично відсутній. Для $Q_{\text{Дніпро}}$ зберігалися виражені, але недостатньо достовірні обернені зв'язки.

Зв'язок квітневого стоку $Q_{\text{Дунай}}$ і $Q_{\text{Дніпро}}$ з показниками угруповань фітопланктону в травні був слабким оберненим. Для $Q_{\text{Дніпро}}$ ця тенденція зберігалася і в червні (табл. 3). Зв'язки квітневого стоку $Q_{\text{Дунай}}$ з показниками фітопланктону в червні були прямими й досягали $0,60$ для B .

Місячний травневий стік $Q_{\text{Дунай}}$ мав помірний прямий зв'язок із червневими показниками фітопланктону (крім N і S/W) за максимальної кореляції з B ($r_n = 0,62$). Вплив травневого стоку $Q_{\text{Дніпро}}$ на показники фітопланктону в червні був слабким, окрім N і S/W , для яких зв'язок був сильнішим ($r_n = 0,40$ і $0,46$) (табл. 4).

Таким чином, стік Дунаю і Дніпра ($Q_{\text{Дунай}}$ і $Q_{\text{Дніпро}}$) надавав не тільки синхронний, але й «віддалений» вплив на розвиток фітопланктону, забезпеченість

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції стоку річок Дунай ($Q_{\text{Дунай}}^{-3}$) і Дніпро ($Q_{\text{Дніпро}}^{-3}$) в березні та показників угруповань фітопланктону (чисельності (N), біомаси (B), площі поверхні (S), індексу поверхні (SI), питомої поверхні (S/W)) у квітні – червні (за даними 2000–2001, 2006–2013 рр.)

Стік річки в березні	Місяць впливу	N	B	S	SI	S/W
$Q_{\text{Дунай}}^{-3}$	Квітень	0,37	0,71	0,47	0,62	-0,04
	Травень	-0,34	-0,45	-0,58	-0,43	-0,19
	Червень	-0,28	0,38	0,14	0,08	-0,28
$Q_{\text{Дніпро}}^{-3}$	Квітень	-0,18	0,77	0,25	0,42	-0,41
	Травень	-0,75	-0,54	-0,76	-0,73	-0,57
	Червень	-0,71	-0,19	-0,44	-0,61	-0,64

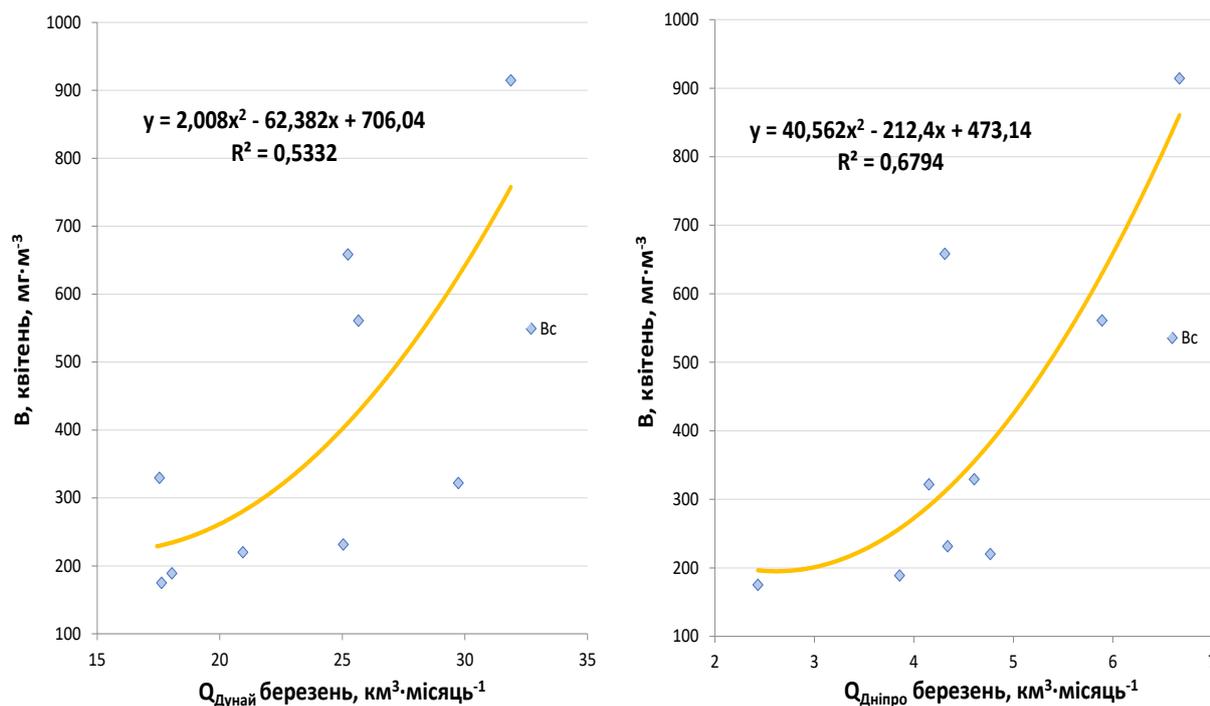


Рис. 11. Поліноміальні регресійні залежності між місячними об'ємами стоку Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$) і Дніпра ($Q_{\text{Дніпро}}$) у березні та індексом SI у квітні (за даними 2000–2001, 2006–2013 рр.)

Таблиця 3

Коефіцієнти кореляції стоку річок Дунай ($Q_{\text{Дунай}}^{-4}$) і Дніпро ($Q_{\text{Дніпро}}^{-4}$) у квітні та показників угруповань фітопланктону (чисельності (N), біомаси (B), площі поверхні (S), індексу поверхні (SI), питомої поверхні (S/W)) у травні – червні (за даними 2000–2001, 2006–2013 рр.)

Стік річки у квітні	Місяць впливу	N	B	S	SI	S/W
$Q_{\text{Дунай}}^{-4}$	травень	-0,00	-0,12	-0,19	-0,21	-0,15
	червень	0,07	0,60	0,50	0,46	0,07
$Q_{\text{Дніпро}}^{-4}$	травень	-0,07	-0,02	-0,17	-0,17	-0,42
	червень	-0,09	-0,01	-0,08	0,04	0,06

Таблиця 4

Коефіцієнти кореляції стоку річок Дунай ($Q_{\text{Дунай}}^{-5}$) і Дніпро ($Q_{\text{Дніпро}}^{-5}$) у травні та показників угруповань фітопланктону (чисельності (N), біомаси (B), площі поверхні (S), індексу поверхні (SI), питомої поверхні (S/W)) у червні (за даними 2000–2001, 2006–2013 рр.)

Стік річки у травні	Місяць впливу	N	B	S	SI	S/W
$Q_{\text{Дунай}}^{-5}$	червень	0,10	0,62	0,50	0,53	0,13
$Q_{\text{Дніпро}}^{-5}$	червень	0,40	-0,06	0,12	0,26	0,46

кореляційних зв'язків якого зіставна із синхронізованими (на місячному часовому масштабі) впливами. Це відповідає припущенню про «запізнення» реакції фітопланктону на вплив весняного паводка, що пов'язано як із поступовим поширенням насичених біогенними речовинами річкових вод на акваторії ПнЗЧМ, так і з поступовим розвитком процесів сукцесії фітопланктону. Загалом реакція фітопланктону на вплив обох річок мала спільні риси за складного розвитку структурно-функціональних перебудов.

Аналіз наведених результатів дає змогу розглядати весняний період розвитку фітопланктону (з березня по червень) як результат переходу від домінування чинників, пов'язаних із зимовою штормовою активністю до впливу, зумовленого збільшенням паводкового стоку річок Дунай та Дніпро і особливостями їх поширення. Аналіз показників фітопланктону Одеської затоки свідчить про можливість запізнення ефектів впливу річкового стоку на показники фітопланктону в цьому регіоні, який може проявлятися в наступні місяці.

Визначені за результатами аналізу регресійні залежності, які пов'язують місячні об'єми стоку Дунаю і Дніпра з морфофункціональними показниками фітопланктону в Одеському районі ПнЗЧМ і в подальшому можуть бути використані для отримання прогнозних оцінок зміни показників, викликаних кліматичними чинниками, наведені в таблиці 5.

Таким чином, стік Дунаю і Дніпра ($Q_{\text{Дунай}}$ і $Q_{\text{Дніпро}}$) надавав не тільки синхронний, але й «віддалений» вплив на розвиток фітопланктону, забезпеченість кореляційних зв'язків якого зпівставна із синхронізованими (на місячному часовому масштабі) впливами. Це відповідає припущенню про «запізнення» реакції фітопланктону на вплив весняного паводка, що пов'язано як із поступовим поширенням насичених біогенними речовинами річних вод по акваторії ПнЗЧМ, так і з поступовим розвитком процесів сукцесії фітопланктону. Загалом реакція фітопланктону на вплив обох річок мала спільні риси за складного розвитку структурно-функціональних перебудов.

Зв'язок об'єму річкового стоку з морфофункціональними індикаторами водоростей бентосу та перифітону. Серед різних життєвих форм морської рослинності макрофіти бентосу та перифітону є найбільш зручним біологічним об'єктом оцінки екологічного стану морської системи, оскільки вони мають досить тривалий життєвий цикл, є закріпленними формами, тому їх можна розглядати як найбільш надійний «біологічний прилад», що відображає інформацію про інтегральну якість морського середовища за певний проміжок часу для певної акваторії.

Також важливою складовою фітобентосу є мікроепіфітон, який розвивається на макрофітах і швидко реагує на зміни в навколишньому середовищі. На погіршення умов у водоймі епіфітний компонент реагує інтенсивним розвитком, що призводить до переважаючого його внеску. Ця закономірність дає змогу визначати екологічний стан водоймом.

Автотрофна функція створення первинної органічної речовини морською рослинністю є першим етапом у трансформації речовино-енергетичних потоків, які з часом трансформуються в наступних

трофічних ланках морських екосистем. Отже, інтенсивність функціонування автотрофних угруповань бенталі та інших твердих природних чи антропогенних субстратів, розташованих у морському середовищі, дає можливість отримувати інформацію про загальну швидкість екологічних процесів та екологічний статус акваторії. Ці особливості закріплених водоростей роблять використання їх функціональних індикаторів пріоритетними під час проведення моніторингової та прогнозної оцінки. Однак найбільш складним і відповідальним методологічним завданням є пошук та опис закономірностей впливу різних абіотичних факторів на значення морфофункціональних показників угруповань фітобентосу й фітоперифітону.

На швидкість первинно-продукційного процесу насамперед впливають такі кліматичні фактори, як фотосинтетично активна радіація, температурний режим, а також концентрація мінеральних та органічних сполук азоту й фосфору, більша частина яких надходить до морського середовища з водозбірною басейну з річковим стоком. Потік сонячної радіації і пов'язаний із ним температурний режим є досить стабільними циклічними внутрішньорічними регіональними факторами в межах кліматичного періоду та можуть розглядатися як сезонна кліматична константа для певного географічного розташування морської системи. Порівняно з потоком сонячної радіації і температурою, алохтонна поживна речовина, яка істотно інтенсифікує функцію автотрофних угруповань, є більш динамічним фактором на міжрічному часовому масштабі, оскільки залежить від антропогенних навантажень на прилеглих територіях і метеорологічних умов. Отже, якість і обсяг річкового стоку, який привносить поживні речовини в морське середовище, можна розглядати як провідний кліматично-антропогенний фактор, який формує інтенсивність функціонування морської рослинності та пов'язану із цим процесом певну категорію ESC.

Попередні дослідження свідчать (Kvach et al. 2025), що водність року, яка вимірюється річним об'ємом стоку (Q), достовірно впливає на індикатори морфофункціональної організації макрофітів

Таблиця 5

Регресійні залежності кореляційного зв'язку між стоком Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$) та Дніпра ($Q_{\text{Дніпро}}$) ($\text{км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}$) і показниками фітопланктону ПнЗЧМ (біомаса (B , $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$), індекс поверхні (SI , м^1), питома поверхня (S/W , $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$))

Місячний об'єм стоку – предиктор	Показники фітопланктону (предиктори 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	$SI = 0,0007Q_{\text{Дунай}}^2 - 0,0232Q_{\text{Дунай}} + 0,451$ $SI = 0,0045Q_{\text{Дніпро}}^2 - 0,0031Q_{\text{Дніпро}} + 0,273$	$B = 5,3024Q_{\text{Дунай}}^2 - 175,58Q_{\text{Дунай}} + 1789,4$
Травень	–	$B = 2,7771Q_{\text{Дунай}}^2 - 37,238Q_{\text{Дунай}} + 247,52$
Червень	–	$S/W = -72,894Q_{\text{Дніпро}}^2 + 753,25Q_{\text{Дніпро}} - 586,68$

(питому поверхню популяції (S/W), індекс поверхні (SI) тощо) у районах безпосереднього впливу стоку. Особливо чітка картина впливу об'єму стоку на інтенсивність функціонування макрофітів спостерігається тоді, коли на морському узбережжі зменшується антропогенне навантаження, а метеорологічні умови, які визначають річковий стік, стають головним чинником формування швидкості первинно-продукційного процесу. Така ситуація виникла під час воєнного стану в Україні, коли в найбільш маловодний за останнє десятиріччя 2022 рік (з річним об'ємом стоку Дунаю $Q = 137 \text{ км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$) було заборонено будь-яке цивільне використання морських акваторій через їх мінування. У цей рік значення SI фітоценозів на одеському узбережжі скоротилися практично у три рази – з 35 до 12 (од.), а категорії ESC зросли із середньої (Moderate) до високої (High) (Kvach et al. 2025). Таку залежність підтверджує зв'язок річного стоку найбільшої для північно-західної частини Чорного моря річки Дунай з морфофункціональним індикатором S/W , який відображає середню функціональну активність флористичного складу макрофітів (рис. 12). У цій залежності найбільш показовим є 2022 р., коли маловодність року і зняття антропогенного навантаження стали причиною підняття категорії ESC до високої (High). Починаючи з 2023 р., після руйнування греблі Каховського водосховища, абсолютні значення індикатора середньої питомої поверхні флористичного складу макрофітів (S/W_x) почали зростати, а категорія ESC знизилася

до середньої (Moderate) (див. рис. 12). Це є проявом хронічних наслідків Каховської екологічної катастрофи, коли поживні речовини надходять у морську екосистему не лише з водами річкового стоку, а й з донних осадових, що кваліфікується як вторинне евтрофування.

Аналіз багаторічного зв'язку морфофункціональних показників угруповань макроперифітону, що зростають на навігаційних буях підхідного каналу судового ходу «Дунай – Чорне море», зі стоком р. Дунай дав можливість отримати прогностичний зв'язок, що пов'язує річні обсяги річкового стоку ($Q_{\text{річ}}$) з 5 категоріями ESC через значення морфофункціонального індикатора макрофітів SI – індекс поверхні фітоценозів. Дані моніторингу SI показали, що в період 2004–2021 рр. в авандельті Дунаю з переходом від маловодних до багатоводних років у різні сезони року категорії ESC можуть коливатися від високої (High) до недостатньої (Poor) (Minicheva and Marinets 2023).

Пошук прогностичних зв'язків ускладнюється, коли йдеться про регіон, на який одночасно впливають кілька річкових систем. Така ситуація має місце під час оцінки українського сектора Чорного моря, включно з прибережними та відкритими районами шельфу, де на глибинах 15–50 м також масово розвиваються угруповання червоної макроводорості з роду філофора (*Phyllophora* Greville). Із чотирьох великих річок ПнЗЧМ найбільшій та вагомий річний стік мають річки Дунай та Дніпро (у середні за

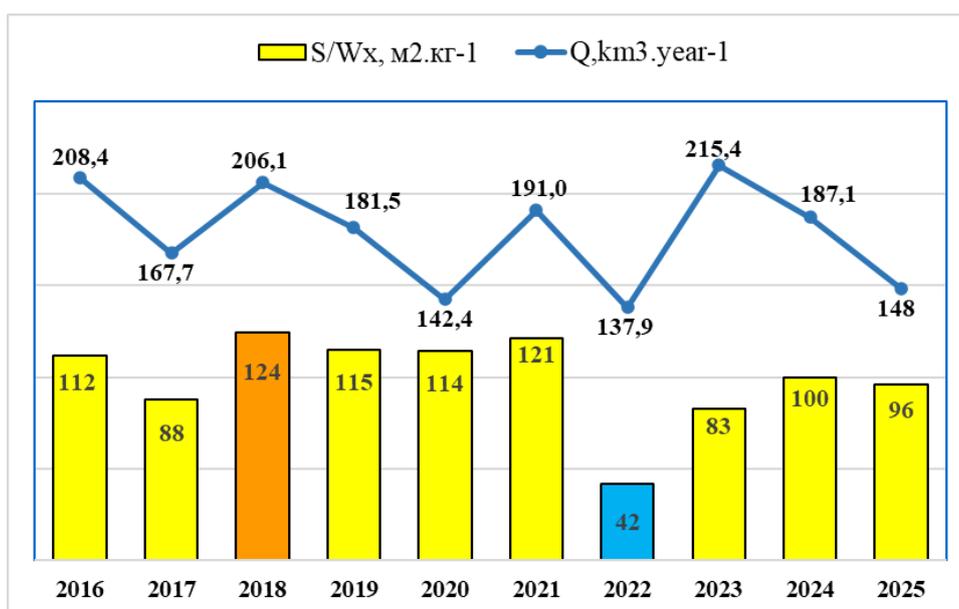


Рис. 12. Залежність середньої питомої поверхні угруповань макрофітів (S/W_x , $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$) прибережної зони Дунай-Дніпровського міжріччя і відповідності цього індикатора категорії екологічного статусу (ESC) від річного об'єму стоку (Q , $\text{км}^3 \cdot \text{рік}^{-1}$) р. Дунай: М – (Moderate) середній, жовтий; Р – (Poor) недостатній, помаранчевий; Н – (High) високий, блакитний

водністю роки за період 1981–2020 рр.: 207 км³ – для Дунаю, 40,7 – для Дніпра, 7,85 – для Дністра і 2,7– для Південного Бугу). Вочевидь, що зони впливу річок Дунай і Дніпро в українському секторі Чорного моря залежать від загального об’єму стоку та змінюються в часі та просторі залежно від особливостей формування стоку на водозборах річок, чинників, які визначають адвекцію та дифузійне розсіювання річкових вод у морському середовищі, зокрема вітрових умов, просторових градієнтів густини води.

Для з’ясування впливу стоку річок із різною інтенсивністю розвантаження у весняний та осінній періоди 2021 року було проведено спеціально змодельований експеримент із вимірами зміни морфологічних індикаторів макрофітів, які розвиваються на штучних субстратах у зоні з практично однаковим ступенем гідродинамічного розведення (трансформації) дунайських і дніпровських вод. Такі зони визначалися за схожими значеннями солоності. З’ясувалося, що річковий стік, який протягом місяця омивав субстрати з фітоперифітоном, у декілька разів змінював значення морфологічних індикаторів макрофітів залежно від місячного об’єму стоку. У весняний період 2021 року об’єм місячного стоку р. Дунай ($Q_{\text{Дунай}}$) у період із середини квітня до середини травня був у 3,9 раза вищим порівняно зі стоком р. Дніпро і сформував ценози фітоперифітону, для яких значення індикатора середньої питомої поверхні флористичного складу (S/W) було у 2,2 раза вищим. Восени (у жовтні) відповідні показники були вищими щодо Q – у 3,5 раза, а для S/W – у 3,3 раза (табл. 6).

Ці дані свідчать, що за інших сезонних регіональних факторів (освітлення, температурний режим), які впливають на формування первинно-продукційного процесу, річковий стік, який визначає інтенсивність потоків поживних речовин, стає домінуючим чинником у формуванні морфологічної організації

угруповань макрофітів і пов’язаних із нею категорій ESC морської екосистеми.

З огляду на вищенаведені факти реакції морфофункціональної організації угруповань макрофітів на об’єми стоку найбільших річок, які надходять до ПнЗЧМ, уперше було проведено спробу сумісного аналізу багаторічних даних щодо місячних об’ємів стоку річок Дунай і Дніпро та функціональних індикаторів угруповань бентосної рослинності, отриманих протягом перших десятиріччя нинішнього сторіччя (2000–2024 рр.), із метою виявлення зв’язку між ними. Для підвищення достовірності зв’язків аналізувалися дані щодо річкового стоку в березні – червні – місяцях найбільш високої біологічної активності угруповань фітобентосу (макрофітів і мікроепіфітів), які збігаються з весняним водопіллям. Для отримання прогностичних залежностей розглядалися морфологічні індикатори угруповань макрофітів і мікроепіфітів, які зростають уздовж одеського узбережжя на глибинах до 5 м.

Питома поверхня флористичного складу макроводоростей (S/W), яка відображає функціональну активність автотрофних угруповань, виявилася найбільш чутливим індикатором відгуку на надходження поживних речовин із річковим стоком. Для неї були побудовані діаграми розсіювання та визначені коефіцієнти апроксимаційних рівнянь, які відображають наявний статистичний зв’язок між середніми значеннями S/W флористичного складу макрофітів і величинами місячного стоку річок Дунай і Дніпро за багаторічний період (рис. 13).

Для визначення наявності тенденцій у змінах основних морфологічних показників макрофітів за зміни місячних об’ємів стоку річок у період весняного водопілля застосовувалась апроксимація лінійною кореляційною залежністю виду $y = bx$ (регресія $y = bx + a$ з $a = 0$, без вільного члена). У цьому випадку коефіцієнт детермінації R^2 показує частку мінливості залежної змінної (морфологічно-

Таблиця 6

Порівняльна характеристика впливу показників річкового стоку Дунаю і Дніпра на морфологічний індикатор (S/W) угруповань фітоперифітону штучних субстратів, розташованих у зонах розвантаження стоку в морську екосистему

Показник	Весна 2021 р.		Осінь 2021 р.	
	Авандельта Дунаю (17.05)	Дніпровсько-Бузький лиман (21.05)	Авандельта Дунаю (24.10)	Дніпровсько-Бузький лиман (03.11)
Солоність (S), ‰	0,4	0,34	0,43	0,4
Температура (T), °C	18,3	20	13,5	12,6
Об’єм річкового стоку (Q), км ³ (середина квітня – середина травня 2021 р.)	18,7	4,79	–	–
Об’єм річкового стоку (Q), км ³ (жовтень, 2021 р.)	–	–	9,16	2,62
Функціональна активність флористичного складу фітоперифітону (S/W), м ² ·кг ⁻¹	261,3	118,2	910,7	277,7

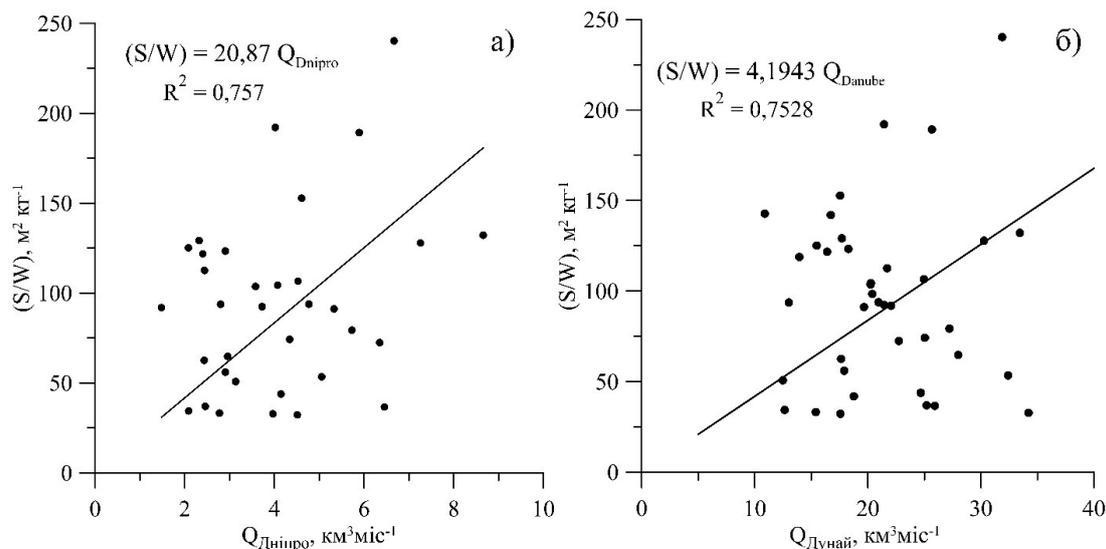


Рис. 13. Розсіювання і статистичний зв'язок між функціональною активністю флористичного складу угруповань макрофітів (S/W), $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$, з об'ємами місячного стоку Дніпра ($Q_{\text{Дніпра}}$) (а) і Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$) (б), $\text{км}^3 \cdot \text{міс}^{-1}$, у період весняного водопілля (березень – червень, 2000–2024 рр.)

нального параметру) від місячного стоку, яка пояснюється вибраним видом регресійної залежності. Він розраховується в інший спосіб, ніж для загального випадку лінійної регресії (Bartels 2015). Цей прогностичний зв'язок свідчить, що у разі збільшення річкового стоку, який привносить мінеральні й органічні речовини азоту та фосфору, забезпечується домінування видів із найбільш високою питомою поверхнею поглинання поживних речовин із морського середовища. Висока концентрація поживних речовин забезпечує перевагу розвитку видів водоростей із розгалуженими талломами, невеликими розмірами слані та коротким життєвим циклом, здатних до забезпечення більш високої швидкості первино-продукційного процесу.

Зауважимо, що значний розкид точок відносно ліній регресії (рис. 13) свідчить, що на морфофункціональні показники макрофітів впливають і інші природні й антропогенні чинники, крім обсягів річкового стоку, але тенденції зміни цих показників у широкому діапазоні визначаються саме річковим стоком. Більш чітко виражені прямо пропорційні лінійні залежності вказаного типу зі значно меншим розкидом точок відносно апроксимаційної прямої, отримані для інтегральної залежності питомої поверхні флористичного складу макроводоростей (S/W) у травні від об'ємів місячного стоку річок у березні – травні, тобто включно з місяцями, які передували травню. Також було встановлено добрий статистичний зв'язок у вигляді прямо пропорційної лінійної залежності між індексом поверхні фітоценозу макрофітів (SI) і стоком Дніпра у відповідні

місяці весняного водопілля (квітень – червень). Зі збільшенням об'ємів стоку Дніпра у весняні місяці SI також зростає.

Внесок епіфітного компонента (C_e) – показника, який відображає інтенсивність розвитку мікрофітів, виявився чутливим індикатором мікроепіфітону на надходження поживних речовин із річковим стоком. Для нього також були побудовані діаграми розсіювання та визначені коефіцієнти апроксимаційних рівнянь, які відображають наявний статистичний зв'язок між середніми значеннями C_e і величинами місячного стоку річок Дунай і Дніпро за багаторічний період (рис. 14).

Цей зв'язок полягає в тому, що зі збільшенням місячних обсягів річкового стоку у весняний період відбувається інтенсивніший розвиток водоростей мікроепіфітону, які таким чином реагують на відповідне збільшення трофності морських вод через надходження поживних речовин.

Висновки

За результатами аналізу даних спостережень за витратами річок Дунай і Дніпро в замикальних створах (гідропости «Рені – гідроствор 54 миля» та «Каховська ГЕС» відповідно) встановлено, що в період 2000–2024 рр. спостерігаються наявні тенденції до загального зниження об'ємів стоку обох річок як загалом за рік, так і у весняний період (березень – червень). Виявлено зростання амплітуди коливань величин річного стоку в період 2000–2024 рр. порівняно з 1981–1999 рр., що свідчить про вплив сучасних кліматичних змін, які проявляються в нерівномірному розподілі опадів упродовж року,

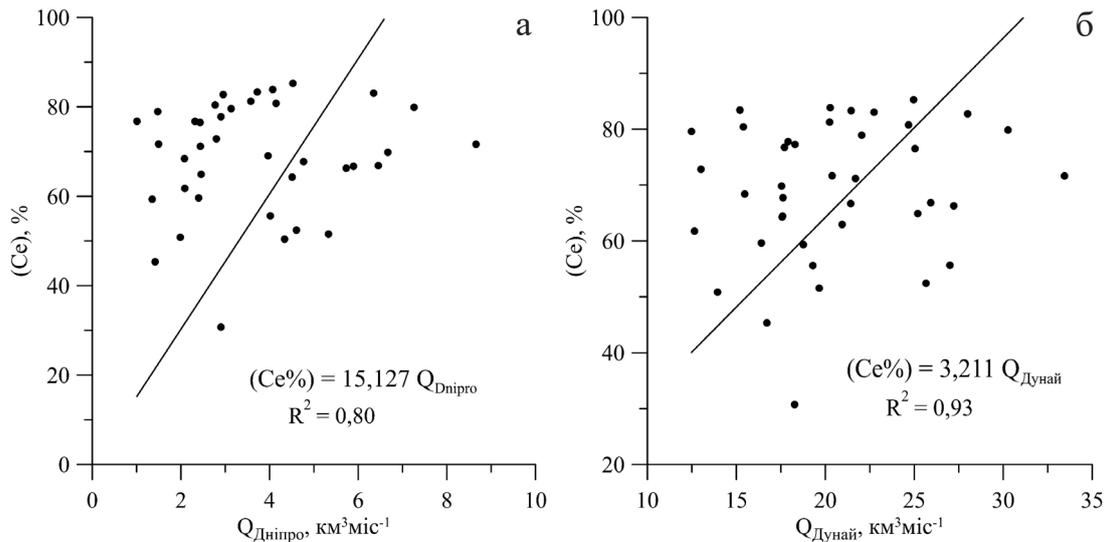


Рис. 14. Розсіювання і статистичний зв'язок між внеском епіфітного компонента (C_e , %) і об'ємами місячного стоку Дніпра ($Q_{\text{Дніпра}}$) (а) і Дунаю ($Q_{\text{Дунай}}$) (б), $\text{км}^3 \text{міс}^{-1}$, у період весняного водопілля (березень – червень, 2007–2024 рр.)

збільшенні частоти інтенсивних паводків і водночас посушливих періодів. Для Дунаю і Дніпра весняне водопілля залишається основною фазою формування стоку, на яке припадає 40–43 % річного об'єму стоку.

На підставі аналізу літературних джерел надано наукове обґрунтування механізмів впливу річкового стоку Дунаю і Дніпра на морфофункціональні показники автотрофних угруповань в Одеському районі ПнЗЧМ.

Результат аналізу статистичних зв'язків між об'ємами сумарного річкового стоку Дунаю і Дніпра за період 2000–2020 рр. і площами акваторій ПнЗЧМ з концентрацією хлорофілу-*a* у весняний сезон (березень – квітень), які перевищують встановлені для них порогові значення ($2,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ – для помірного рівня евтрофікації, $4,63 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ – для високого рівня), показав, що вони можуть бути описані рівняннями прямої лінійної регресії. Середні багаторічні площі зон із високою концентрацією хлорофілу-*a* становили приблизно 5900 км^2 для $Chl-a > 2,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ та 2300 км^2 для $Chl-a > 4,63 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ в період 2000–2020 рр. Збільшення сумарного річкового стоку Дунаю та Дніпра на 1 км^3 у ранньовесняний період року асоціюється з розширенням площі евтрофних вод ($Chl-a > 2,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) на $150\text{--}200 \text{ км}^2$. Зв'язок між щомісячними обсягами річкового стоку і площами зон перевищення порогових значень хлорофілу-*a* в період 2000–2020 рр. найбільше проявляється у квітні та червні. Отримані регресійні залежності можуть бути використані в подальшому для діагнозу та прогнозу розвитку процесу евтрофікації вод ПнЗЧМ.

Аналіз синхронних впливів місячного стоку річок на показники фітопланктону у весняний період (березень – червень) виявив схожий характер зв'язків як для Дунаю, так і для Дніпра, рівень яких був максимальним для показників площі поверхні (*S*). Березневий стік обох річок формував сильні оборнені зв'язки із *S*, що узгоджується з домінуючим впливом зимового типу гідродинамічних процесів до початку інтенсивного паводка. У квітні виявлено сильний прямий зв'язок з індексом поверхні *SI* угруповань фітопланктону, пов'язаний із впливом максимального паводка. Помірний зворотний зв'язок стоку обох річок з *SI*, виявлений у травні, може бути пояснений як продовженням трансформації фітопланктоном надлишкових концентрацій біогенних елементів на фоні зниження інтенсивності паводка, так і домінуючим впливом на цей процес зростання температури води. Вплив обох річок у червні проявляється в помірному прямому зв'язку з питомою поверхнею *S/W*, що може бути пов'язано зі зниженням функціональної активності водоростей після завершення весняної стадії сукцесії.

Аналіз «віддаленого» впливу обсягів місячного стоку (*Q*) річок Дунай і Дніпро на показники фітопланктону в Одеському районі ПнЗЧМ підтвердив наявність «запізнення» позитивного (прямого) впливу у випадках, коли цей вплив не проявлявся в той же місяць. Також виявлено сильну пряму кореляцію березневого стоку обох річок із квітневою біомасою фітопланктону (*B*), а для Дунаю – і з індексом поверхні угруповань (*SI*). Для квітневого і травневого стоку Дунаю виявлено прямий зв'язок з біомасою (*B*) у червні. Для квітневого і травневого стоку

Дніпра таких зв'язків не виявлено. Це може свідчити як про прямий вплив стоку Дніпра, що продовжує зростати у квітні – травні, так і про його нівелювання травневим зростанням температури. Таким чином, зміни стоку річок у березні «віддалено» впливали на біомасу фітопланктону в квітні. Цей зв'язок посилювався безпосереднім впливом максимального квітневого стоку Дунаю на індикатори SI угруповань фітопланктону. Місячний стік Дунаю у квітні та травні мав прямий (позитивний) зв'язок з V у червні. Синхронізований вплив червневого стоку річок проявився в позитивному зв'язку з S/W , що був максимальним для стоку Дніпра.

Для морфофункціональних показників (питома поверхня флористичного складу макрофітів (S/W) і внесок епіфітного компонента (C_e) в Одеському районі ПнЗЧМ) були отримані діаграми розсіювання та визначені коефіцієнти апроксимаційних рівнянь, які відображають наявний статистичний зв'язок між тенденціями зміни середніх значень цих індикаторів і об'ємами місячного стоку Дунаю і Дніпра у весняні місяці багаторічного періоду 2000–2024 рр. Показано, що зі збільшенням місячних об'ємів стоку значення вказаних показників теж зростають. Це

дає можливість використовувати отримані рівняння для проведення прогностичної оцінки зміни структурно-функціональної організації макро- і мікрокомпонентів бентосної рослинності, яка пов'язана з категоріями екологічного статусу (ESC) морської екосистеми, залежно від прогностичних сценаріїв зміни стоку річок Дунаю і Дніпра.

У наступній статті, яка є другою частиною дослідження і буде опублікована найближчим часом, будуть представлені результати застосування встановлених статистичних зв'язків та їх апроксимацій для надання прогностичних оцінок очікуваних категорій екологічного стану для українського сектора Чорного моря в найближчому майбутньому кліматичному періоді (до 2070 року), пов'язаних із можливою зміною об'ємів річкового стоку у весняний період року під впливом кліматичних чинників.

Робота виконана в рамках теми «Методологічні підходи оцінки та прогнозу екологічного стану морських екосистем України на підставі морфофункціональної організації рослинних угруповань» (постанова Бюро ВЗБ НАН України від 29.09.2020 № 5, № держ. реєстр. 0121U109932).

Список використаних джерел

1. Альтман Э.Н., Гертман И.Ф., Голубева З.А. Многолетние тенденции солёности и температуры вод Чёрного моря в связи с изменением стока рек (по данным натурных наблюдений). *Труды ГОИН*. 1988. 189. С. 39–53.
2. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Чёрном море : монография. Киев : Наукова думка, 1970. 328 с.
3. Виноградова Л.А., Маштакова Г.П., Дерезюк Н.В. Сукцессионные изменения в фитопланктоне северо-западной части Чёрного моря. *Исследования экосистемы пелагиали Чёрного моря*. Москва : Наука, 1986. С. 170–179.
4. *Гідрологічні та гідрохімічні показники стану північно-західного шельфу Чорного моря* : довідковий посібник / І.Г. Орлова та ін. ; відп. ред. І.Д. Лоева. Київ : КНТ, 2008. 616 с.
5. Громов В.В. Методика подводных фитоценологических исследований. *Гидробиологические исследования северо-восточной части Чёрного моря*. Ростов. унив., 1973. С. 69–72.
6. Гуляков Н.Е. Микрофитобентос. *Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений* / под ред. А.В. Цыбань. Ленинград : Гидрометеоздат, 1980. С. 166–170.
7. Гуляков Н.Е., Закордоонец О.А., Герасимюк В.П. *Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Чёрного моря и прилегающих водоемов*. Киев : Наукова думка, 1992. 109 с.
8. Демидов А.Н. Температура воды и солёность. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Чёрное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 1991. С. 373–397.
9. 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. 294 с.
10. 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. 465 с.
11. Еременко Т.И. Макрофитобентос. *Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений* / под ред. А.В. Цыбань. Ленинград : Гидрометеоздат, 1980. С. 170–177.
12. Зинова А.Д. *Определитель зелёных, бурых и красных водорослей южных морей СССР*. Москва-Ленинград : Наука, 1967. 397 с.
13. Иванов В.А., Тучковенко Ю.С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем : монография. Севастополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
14. Ильин Ю.П. Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Чёрного моря. *Научные труды УкрНИИММ*. 2006. 255. С. 242–251.
15. Калашник Е.С. Принципы расчета индексов поверхности эпифитного компонента альгосистемы

- «базифит-эпифит». *Pontus Euxinus – 2013* : тезиси VIII Междунар. научн.-практ. конф. молодых ученых по проблемам водных экосистем. Севастополь, 1–4 октября 2013 г. Севастополь, 2013. С. 67–69.
16. Калугина-Гутник А.А. *Фитобентос Чёрного моря*. Киев : Наукова думка, 1975. 248 с.
17. Лобода Н.С., Тучковенко Ю.С. Дослідження впливу змін річкового стоку за кліматичними сценаріями на гідроекологічний стан північно-західної частини Чорного моря. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія*. 2010. № 3 (44). С. 143–145.
18. Матвеев А.В., Попов Ю.И. Распространение дунайских вод в западной части северо-западного шельфа Черного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. № 11. С. 241–249.
19. Матыгин А.С., Сытов В.Н., Попов Ю.И., Ковалишина С.П. Изменчивость климатических характеристик морских вод в северо-западной части Черного моря. *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. 2013. Вип. 27. С. 97–105.
20. Миничева Г.Г. Методические рекомендации по определению комплекса показателей, связанных с поверхностью водорослей-макрофитов. АН УССР. Одесское отд. Ин-та биологии южных морей. Препр. Одесса, 1987. 22 с.
21. Миничева Г.Г. Морфофункциональные основы формирования морского фитобентоса : дис. ... д-ра биол. Наук : 03.00.17. Севастополь, 1998. 353 с.
22. 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.
23. Морська природоохоронна стратегія України. Додаток 1. Райони, ділянки та масиви Чорного та Азовського морів. 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1240-2021-%D1%80#Text> (дата звернення: 31.07.2025 р.).
24. Тучковенко Ю.С., Доценко С.А., Дятлов С.Е., Нестерова Д.А., Скрипник И.А., Кирсанова Е.В. Влияние гидрологических условий на изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик вод Одесского региона северо-западной части Черного моря. *Морской экологический журнал*. 2004. № 3 (4). С. 75–85.
25. Тучковенко Ю.С., Хохлов В.М., Лобода Н.С., Кушнір Д.В., Серга Е.М. Вплив змін клімату на гідрологічний і гідроекологічний режими лиманів північно-західного Причорномор'я : монографія / за ред. Ю.С. Тучковенка. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2022. 202 с.
26. Bartels R. *Re-interpreting R2, regression through the origin, and weighted least squares*. University of Sydney Business School. Australia. 2015. 22 p.
27. CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). (2025). Black Sea – Ocean Colour Plankton MY L4 (Version 009_134) [Data set]. Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00277> (дата звернення: 23.05.2025).
28. Didovets I., Krysanova V., Hattermann F.F., Lo'pez M.R., Snizhko S., Schmied H.M. Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. Vol. 32. 100761. DOI:10.1016/j.ejrh.2020.100761.
29. 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).
30. 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).
31. Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M. et al. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*. 2014. Vol. 14 (2). P. 563–578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
32. Kalashnik E.S. Indices of the basiphyte–epiphyte algal system as indicators of the ecological status of marine coastal ecosystems. *International Journal on Algae*. 2018. Vol. 20 (3). P. 265–276. DOI: 10.1615/InterJAlgae.v20.i3.50.
33. Kok K., Hesselbjerg C.J., Sloth M.M., Pedde S., Gramberger M., Jäger J., Carter T. 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>.
34. Krysanova V., Hattermann F., Wechsung F. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Process*. 2005. Vol. 19. P. 763–783. DOI: 10.1002/hyp.5619.
35. Kvach Yu., Stepien C., Minicheva G., Tkachenko P. Biodiversity effects of the Russia–Ukraine War and the Kakhovka Dam destruction: ecological consequences and predictions for marine, estuarine, and freshwater communities in the northern Black Sea. *Ecological Processes*. 2025. Vol. 14. 22. 25. DOI: 10.1186/s13717-025-00577-1.
36. 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. P. 362–377. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.046.
37. Minicheva G., Marinets A. Periphyton morphofunctional indicators in the Danube's Avandelta: Long-term assessment of Ecological Status. *Tackling present and future environmental challenges of a European riverscape: IAD Proceedings*. 2023. Vol. 1. 8417620. P. 1–14. DOI: 10.5281/zenodo.8417620.
38. Minicheva G.G. Use of the macrophytes morphofunctional parameters to assess ecological status class in accordance with the EU WFD. *Морской экологический журнал*. 2013. Vol. XII (3). P. 5–21.

39. Moncheva S., Gotsis-Skretas O., Pagou K., Krastev A. Phytoplankton blooms in the Black Sea: Impact of nutrient enrichment and climate variability. *Marine Ecology Progress Series*. 2010. Vol. 405. P. 117–130.

40. Ott R.L., Longnecker M. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis* (7th ed.). Boston, MA : Cengage Learning, 2015.

41. 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. Vol. 15 (1). 8. DOI: 10.3390/w15010008.

42. Schmied M.H. 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.

43. 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. Vol. 7. P. 6139–6172. DOI: 10.3390/w7116139.

44. Tukey J.W. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley, 1977.

45. Utermohl H. Zur Ver vollkommung der quantitativen phytoplankton-methodik. *Mitteilung Internationale Vereinigung Fuer Theoretische unde Amgewandte Limnologie*. 1958. Vol. 9. 39 p.

46. 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.

47. Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *PNAS*. 2013. Vol. 111. P. 3228–3232. DOI: 10.1073/pnas.1312330110.

References

1. Altman, E.N., Gertman, I.F., & Golubeva Z.A. (1988). Mnogoletnie tendentsii solenosti i temperaturi vod Chernogo morya v svyazi s izmeneniem stoka rek (po dannim naturnikh nablyudenii) [Long-term trends in salinity and temperature of Black Sea waters in connection with changes in river runoff (based on in situ observations)]. *Trudi Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta – Proceedings of the State Oceanographic Institute*, 189, 39–53 [in Russian].

2. Bolshakov, V.S. (1970). *Transformacija rechnyh vod v Chernom more [Transformation of river waters in the Black Sea]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].

3. Vinogradova, L.A., Mashtakova, G.P., & Derezyuk N.V. (1986). Successional changes in phytoplankton of the northwestern Black Sea. *Studies of the Black Sea pelagic ecosystem* (pp. 170–179). Moscow: Nauka [in Russian].

4. Orlova, I.G., Pavlenko, M.Yu., Ukrainsky, V.V., Popov, Yu.I., Matsokin, L.V., Komorin, V.M., et al. (2008). *Hidrolohichni ta hidrokhimichni pokaznyky stanu pivnichno-zakhidnoho shel'fu Chornoho morya [Hydrological and hydrochemical indicators of the state of the northwestern shelf of the Black Sea: a reference manual]*. I.D. Loeva (Ed.). Kyiv: KNT [in Ukrainian].

5. Gromov, V.V. (1973). Metodika podvodnyh fitocenoticheskikh issledovanij [Methodology of underwater phytocenotic research]. *Gidrobiologicheskie issledovaniya severo-vostochnoj chasti Chyornogo moria – Hydrobiological studies of the north-eastern part of the Black Sea* (pp. 69–72). Rostov. univ. [in Russian].

6. Gusliakov, N.E. (1980). Mikrofitobentos [Microphytobenthos]. *Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoi vody i donnykh otlozhenii – Guide to Methods for the Biological Analysis of Seawater and Bottom Sediments*. A.V. Ciban (Ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].

7. Guslyakov, N.E., Zakordonec, O.A., & Gerasimyuk, V.P. (1992). *Atlas diatomovyh vodoroslej*

bentosa severo-zapadnoj chasti Chyornogo morya i priliegayushih vodoyomov [Atlas of benthic diatoms of the north-western part of the Black Sea and adjoining reservoirs]. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].

8. Demidov, A.N. (1991). Temperatura ta solonist vody [Water temperature and salinity]. *Hidrometeorolohiya ta hidrokhiimiya moriv SRSR. T. IV. Chorne more. Vypusk 1. Hidrometeorolohichni umovy Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume IV Black Sea, Issue 1. Hydrometeorological conditions*. Sankt-Peterburh: Gidrometeoizdat [in Russian].

9. 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). Part 1. Rivers. Issue 2. Dnieper Basin: reference edition. Kyiv [in Ukrainian].

10. 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). Part 1. Rivers. Issue 1. Basin of the Vistula, Danube, Dniester, Southern Bug, rivers of the Black Sea Region: Reference edition. Kyiv [in Ukrainian].

11. Eremenko, T.I. (1980). Makrofitobentos [Macrophytobenthos]. *Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoi vody i donnykh otlozhenii – Guide to Methods for the Biological Analysis of Seawater and Bottom Sediments*. A.V. Ciban (Ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].

12. Zinova, A.D. (1967). *Opredelitel zelyonyh, buryh i krasnyh vodoroslej yuzhnyh morej SSSR [Identification manual of green, brown and red algae of the Southern Seas of the USSR]*. Moskva-Leningrad: Nauka [in Russian].

13. Ivanov, V.A., & Tuchkovenko, Yu.S. (2006). *Prikladnoe matematicheskoe modelirovanie kachestva vod shel'fovykh morskikh ekosistem [Applied mathematical*

water-quality modeling of shelf marine ecosystems]. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika [in Russian].

14. Ilyin, Yu.P. (2006). Gidrologicheskii rezhim rasprostraneniya rechnykh vod v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [Hydrological regime of river waters distribution in the Black Sea North-Western part]. *Scientific papers of UkrNIGMI – Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute*, 255, 242–251 [in Russian].

15. Kalashnik, E.S. (2013). Printsipy rascheta indeksov poverkhnosti epifitnogo komponenta algosistemy “bazifit-epifit” [Principles of calculating the surface indices of the epiphytic component of the algosystem “basiphyte-epiphyte”]. *Proceedings VIII Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaya konferentsiia molodykh uchenykh po problemam vodnykh ekosistem “Pontus Euxinus – 2013” – VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists on Problems of Aquatic Ecosystems “Pontus Euxinus – 2013”* (pp. 67–69). Sevastopol [in Russian].

16. Kalugina-Gutnik, A.A. (1975). *Fitobentos Chyornogo morya [Phytobenthos of the Black Sea]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].

17. Loboda, N.S., & Tuchkovenko, Ju.S. (2010). Doslidzhennia vplyvu zmin richkovoho stoku za klimatychnymi stsenariiami na hidroekolohichniy stan pivnichno-zakhidnoi chastyny Chornoho moria [Research of river run-off changes impact according to climate scenarios on hydroecological condition of north-western part of Black Sea]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biologhiia – Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, 3 (44), 143–145.

18. Matvieiev, A.V., & Popov, Y.I. (2012). Rasprostranenie dunaiskikh vod v zapadnoi chasti severo-zapadnogo shelfa Chernogo morya [Distribution of the Danube waters in the western part of north-western shelf Black Sea]. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal – Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 11, 241–249. [in Russian].

19. Matygin, A.S., Sytov, V.N., Popov, Ju.I., & Kovalishina, S.P. (2013). Izmenchivost klimaticheskikh kharakteristik morskikh vod v severo-zapadnoy chasti Chernogo morja [Variability of climate characteristics of sea waters in the northwestern Black Sea]. *Ekolohichna bezpeka pryberezhnoi ta shelfovoi zon ta kompleksne vykorystannia resursiv shelfu – Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 27, 97–105 [in Russian].

20. Minicheva, G.G. (1987). *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu kompleksa pokazatelej, svyazannykh s poverkhnostyu vodoroslej-makrofitov* [Guidelines for determining a set of indicators associated with the surface of macrophyte algae]. AN USSR. Odesskoe otd. In-ta biologii yuzhnykh morej. Prepr. Odessa [in Russian].

21. Minicheva, G.G. (1998). Morfofunktsionalnye osnovy formirovaniia morskogo fitobentosa [Morpho-

functional bases of the formation of marine phytobenthos]. Doctor’s thesis. Sevastopol [in Russian].

22. Minicheva, G.G., Zotov, A.B., & Kosenko, M.N. (2003). *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu 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].

23. Mors’ka pryrodookhoronna stratehiya Ukrainy. Dodatok 1. Rayony, dilyanky ta masyvny Chornoho ta Azovskoho moriv [Marine Environmental Strategy of Ukraine] (2021). Appendix 1. Areas, sections and massifs of the Black and Azov Seas. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1240-2021-%D1%80#Text> (Accessed: 31.07.2025) [in Ukrainian].

24. Tuchkovenko, Y.S., Docenko, S.A., Dyatlov, S.E., Nesterova, D.A., Skripnik, I.A., & Kirsanova E.V. (2004). Vliyanie gidrologicheskikh uslovij na izmenchivost gidrohimiicheskikh i gidrobiologicheskikh kharakteristik vod Odesskogo regiona severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [Influence of hydrological conditions on variability of hydrochemical and hydrobiological characteristics of waters in Odessa region in northwestern part of the Black Sea]. *Morskoj ekologicheskij zhurnal – Marine Ecological Journal*, 3 (4), 75–85 [in Russian].

25. Tuchkovenko, Yu.S., Khokhlov, V.M., Loboda, N.S., Kushnir, D.V., & Serga, E.M. (2022). *Vplyv zmin klimatu na hidrolohichniy i hidroekolohichniy rezhymy lymaniv pivnichno-zakhidnoho Prychornomorja: monohrafiia [Climate change impact on hydrological and hydroecological regimes of lagoons on the North-Western Black Sea coast: monograph]*. Yu.S. Tuchkovenko (Ed.). Odesa: Odessa State Environmental University [in Ukrainian].

26. Bartels, R. (2015). *Re-interpreting R2, regression through the origin, and weighted least squares*. University of Sydney Business School. Australia.

27. CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). (2025). Black Sea – Ocean Colour Plankton MY L4 (Version 009_134) [Data set]. Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00277>.

28. 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.

29. 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).

30. 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).

31. 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.
32. Kalashnik, E.S. (2018). Indices of the basiphyte–epiphyte algosystem as indicators of the ecological status of marine coastal ecosystems. *International Journal on Algae*, 3, 265–276.
33. Kok, K., Hesselbjerg, C.J., Sloth, M.M., Pedde, S., Gramberger, M., Jäger, J., & Carter, T. (2015) Evaluation of existing climate and socio-economic scenarios. Deliverable 2.1 from EU FP7 IMPRESSIONS project. URL: <http://www.impressions-project.eu/documents/1>.
34. Krysanova, V., Hattermann, F., Wechsung, F. (2005). Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Process*, 19, 763–783.
35. Kvach, Yu., Stepien, C., Minicheva, G., & Tkachenko, P. (2025). Biodiversity effects of the Russia–Ukraine War and the Kakhovka Dam destruction: ecological consequences and predictions for marine, estuarine, and freshwater communities in the northern Black Sea. *Ecological Processes*, 14, 22, 25.
36. 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. *J. Hydrol.*, 376, 362–377.
37. Minicheva G., & Marinets A. (2023). Periphyton morphofunctional indicators in the Danube’s Avandelta: Long-term assessment of Ecological Status. Proceedings: *Tackling present and future environmental challenges of a European riverscape* (pp. 1–14).
38. Minicheva, G.G. (2013). Use of the macrophytes morphofunctional parameters to assess ecological status class in accordance with the EU WFD. *Marine Ecological Journal*, 3, 5–21.
39. Moncheva, S., Gotsis-Skretas O., Pagou K., & Krastev A. (2010). Phytoplankton blooms in the Black Sea: Impact of nutrient enrichment and climate variability. *Marine Ecology Progress Series*, 405, 117–130.
40. Ott, R.L., & Longnecker, M. (2015). *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis* (7th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. Tukey, J.W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.
45. Utermohl, H. (1958). Zur Ver vollkommung der quantitativen phytoplankton-methodik. *Mitteilung Internationale Vereinigung Fuer Theoretische unde Angewandte Limnologie*, 9.
46. Van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (Eds.). (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES*. Project. Met Office Hadley Centre, Exeter.
47. 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 1. DIAGNOSIS)

¹ *Minicheva G.G.*, Corr. member of NAS of Ukraine, Dr. Sci., Senior Researcher

¹ *Tuchkovenko Yu.S.*, Dr. Sci., Senior Researcher

¹ *Zotov A.B.*, PhD, Senior Researcher

¹ *Sokolov Y.V.*, PhD

¹ *Martyniuk M.O.*, PhD

¹ *Kalashnik K.S.*, PhD

¹ *Marinets G.V.*, Junior Researcher

² *Ovcharuk V.A.*, Dr. Sci., Professor

¹ Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine

² Odessa I.I. Mechnikov National University

In this study, for the first time for the northwestern part of the Black Sea (NWBS), an analysis was conducted of statistically significant relationships between the mean monthly volumes of the spring river runoff of the Danube

and the Dnipro (March–June) and the morphofunctional indicators of phytoplankton, macro- and microphytobenthos, as well as the primary production indicator – chlorophyll-*a* based on long-term datasets from 2000–2024.

The main objective of the research is to obtain the coefficients of regression equations that reflect the influence of the annual river runoff of the Danube and the Dnipro on the restructuring of the structural and functional organization of communities of short- and long-cycle forms of aquatic vegetation in the pelagic and benthic zones of the marine ecosystem. These coefficients can subsequently be used to provide a long-term predictive assessment of changes in the ecological state of the sea in regions of freshwater influence, which is planned to be obtained in the second part of this work (Part 2. Forecast).

It was established that during the period 2000–2024, there are observable trends toward a general decrease in the volumes of river runoff from the Danube and the Dnipro, both on an annual scale and during the spring period (March–June). An increase in the amplitude of fluctuations in annual runoff volumes was identified for 2000–2024 compared to the previous period, 1981–1999, indicating the influence of the climate changes, manifested in the uneven distribution of precipitation through the year, as well as an increase in the frequency of both intense floods and drought periods.

During the period 2000–2020, the long-term average areas of zones with high chlorophyll-*a* (*Chl-a*) concentration were approximately 5900 km² for *Chl-a* > 2.23 mg·m⁻³ and 2300 km² for *Chl-a* > 4.63 mg·m⁻³. An increase of 1 km³ in the combined early-spring river runoff of the Danube and the Dnipro is associated with an expansion of moderately eutrophic waters (*Chl-a* > 2.23 mg·m⁻³) by 150–200 km².

Analysis of the synchronous effects of monthly river runoff on phytoplankton indicators during the spring period (March–June) revealed similar patterns of relationships for both the Danube and the Dnipro, with the strongest effects observed for surface area indicators (*S*). The March runoff of both rivers formed strong inverse relationships with *S*, which is consistent with the dominant influence of winter-type hydrodynamic processes prior to the onset of the intensive flood phase.

In April, a strong direct relationship was identified between river runoff and the surface index (*SI*) of phytoplankton communities, associated with the influence of the peak flood. Analysis of the “delayed” effect of the monthly runoff volumes of the Danube and the Dnipro on phytoplankton indicators in the Odesa region of the NWBS confirmed the presence of a lagged positive (direct) influence in cases where this effect did not manifest within the same month. For the morphofunctional indicators of benthic vegetation – the specific surface area of the macrophyte floristic composition (*S/W_y*) and the contribution of the epiphytic component (*C_e*) in the Odesa region of the NWBS scatter plots were obtained and the coefficients of approximation equations were determined. These coefficients reflect the existing statistical relationship between the trends in the mean values of these indicators and the monthly river runoff volumes of the Danube and the Dnipro during the spring months of the long-term period 2000–2024.

It has been shown that with an increase in monthly runoff volumes, the values of these indicators also increase. This makes it possible to use the obtained equations to provide predictive assessments of changes in the structural and functional organization of the macro- and microcomponents of benthic vegetation, which are linked to categories of the ecosystem’s environmental status class (ESC). The conducted assessment of the quantitative relationships between the river runoff volumes of the largest rivers in the NWBS and the functional activity and intensity of functioning of autotrophic communities creates a basis for further developing predictive evaluations of possible long-term changes in the ESC categories of the marine ecosystem in the Ukrainian sector of the Black Sea, in accordance with existing scenarios of river runoff changes driven by climate change.

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

Дата першого надходження рукопису до видання: 14.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025