

РЕАКЦІЯ МОРСЬКОЇ ЕКОСИСТЕМИ НА НАСЛІДКИ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Мінічева Г.Г. – чл.-кор., д.б.н., с.н.с., *Бондаренко О.С.* – к.б.н., *Богатова Ю.І.* – к.геогр.н., с.н.с., *Большаков В.М.* – к.геогр.н., с.н.с., *Бушуєв С.Г.* – к.б.н., *Гаркуша О.П.* – к.б.н., *Дятлов С.Є.* – к.б.н., доц., *Калашнік К.С.* – к.б.н., *Кошелев О.В.* – к.б.н., *Кудренко С.А.* – к.б.н., *Кулакова І.І.* – к.б.н., с.н.с., *Маринєць Г.В.* – м.н.с., *Мігас Р.В.* – м.н.с., *Мартинюк М.О.* – д.філос., *Ніконова С.Є.* – м.н.с., *Рибалко О.А.* – м.н.с., *Синьогуб І.О.* – с.н.с., *Соколов Є.В.* – к.б.н., *Стадніченко С.В.* – к.б.н., с.н.с., *Хуторной С.О.* – к.б.н., *Виноградов О.К.* – д.б.н., с.н.с., *Квач Ю.В.* – д.б.н., с.н.с., *Демченко В.О.* – д.б.н., с.д., *Сон М.О.* – д.б.н.

ДУ «Інститут морської біології НАН України»

minicheva@ukr.net

У роботі представлені результати досліджень ДУ «Інститут морської біології НАН України» щодо впливу наслідків руйнування греблі Каховського водосховища на екосистему чорноморського шельфу України. Експедиційні дослідження проводилися в червні–серпні 2023 р. на 11 станціях морського узбережжя від с. Коблево до мису Великий Фонтан. Були проаналізовані гідролого-гідрохімічні показники, токсичність води, стан біотичних угруповань (мікропсамон, мейобентос, макрозобентос, фітобентос, фітопланктон, зоопланктон) та водних біоресурсів. За допомогою супутникових даних були отримані показники концентрації хлорофілу «а». Для оцінки масштабів відгуку екосистеми на наслідки потрапляння вод Каховського водосховища для абіотичного та біотичного компонентів були визначені аномалії, які розраховувались як відсоток відхилення значення показника в червні–серпні 2023 р. від регіональної норми за визначений період. Встановлено, що «вибухова» фаза впливу мала тривалість близько трьох місяців з моменту початку катастрофи – 6 червня 2023 р. У серпні 2023 р. більшість показників повернулася до середньо регіонального рівня.

Потрапляння вод Каховського водосховища до морської екосистеми призвело до опріснення моря на одеському узбережжі до 3,95‰, зниження насичення поверхневого шару моря киснем менше ніж 75 %, підвищення концентрації амонійного азоту до 13,8 ГДК та виникнення гострої летальної токсичності. Зареєстроване підвищення концентрації хлорофілу «а» та масовий розвиток синьо-зелених планктонних водоростей. У донних угрупованнях спостерігалося пригнічення розвитку макрофітобентосу, аномальні зміни значень індексів поверхні макрофітів, значні зміни у структурі угруповань зообіоростання. Відзначені загибель прісноводних видів риби, що потрапили в морські води, та масова загибель чорноморської мідії, яка дорівнювала близько 3,7 тис. т біомаси.

Узагальнена оцінка аномалій абіотичних та біотичних показників упродовж перших трьох місяців «вибухової» фази дозволила виділити чотири етапи: I – гідролого-гідрохімічний та фізичний залповий вплив з пріоритетами значних аномалій зростання об'єму річкового стоку та зниження солоності (6–11 червня); II – вибухова реакція біоти з пріоритетами гострих реакцій фіто- та зоокомпонента (12 червня – 10 липня); III – високий рівень продукційно-деструкційних процесів (11 липня – 10 серпня); IV – повернення до регіонального рівня (11–31 серпня).

Ключові слова: воєнні дії, Каховська ГЕС, Чорне море, катастрофа, абіотичні показники, біота, аномалії.

Вступ

Морські екосистеми українського сектору Чорного моря перебувають під значним тиском різних типів антропогенної діяльності, яка істотно впливає на екологічний стан. Вторгнення РФ та розгортання повномасштабних воєнних дій на території України та акваторії національного шельфу призвело до виникнення низки нових чинників впливу на морські екосистеми України, які викликають критичні реакції біологічного компонента та зміну екологічного статусу екосистем.

Увага вчених усього світу прикута до наслідків російсько-української війни і вже проведені оглядово-аналітичні дослідження, що демонструють значний прямий вплив воєнних дій на біорізноманіття,

екосистемні послуги та природоохоронну діяльність. Ці факти дають можливість говорити про екоцид у контексті міжнародного права (Pereira et al. 2022; Sousa et al. 2022).

Головною подією для Чорного моря під час воєнних дій стала одна з найбільш масштабних екологічних катастроф ХХІ століття – підірив греблі Каховського водосховища 6 червня 2023 року (Афанасьєв 2023; Мінічева та ін. 2023; Tuchkovenko et al. 2023; Vyshnevskiy et al. 2023). У цій катастрофі Чорне море стало останньою зупинкою на шляху вивільнених річкових вод, які пройшли скрізь русло р. Дніпро та Дніпровсько-Бузький лиман. Приблизно через дві доби після підриву клин прісної води дістався морського узбережжя і розпочалась

найбільш важка, ударна фаза впливу цієї екологічної катастрофи на чорноморську екосистему.

З 6 червня ДУ «Інститут морської біології НАН України» (ІМБ НАН України) розпочала експедиційні виїзди, щоб зафіксувати «нульовий» стан – точку відліку Каховської катастрофи у морі. Був створений оперативний штаб, який успішно здійснював комунікацію та надавав інформацію до Кабінету Міністрів України, Міндовкілля, Спеціалізованої екологічної прокуратури, Державного агентства меліорації та рибного господарства, Одеської обласної воєнної адміністрації та інших державних структур, а також забезпечував висвітлення ситуації для всеукраїнських, міжнародних та місцевих ЗМІ.

Каховська катастрофа стала приводом для кримінального впровадження та доказу екоциду в Україні з боку російських загарбників. Офіс Генерального прокурора України визначив ІМБ НАН України провідним експертом у галузі дослідження морських екосистем та залучив до судового розслідування. В рамках офіційних процедур кримінального впровадження та під наглядом військових від Тилігульського до Сухого лиманів була проведена серія берегових експедицій з використанням професійного водолазного обладнання, що дозволило отримати емпіричний матеріал та зафіксувати на відео стан угруповань. Це

дало змогу вперше з початку війни отримати цілісне уявлення про стан морської екосистеми та розпочати експертний аналіз щодо масштабів завданої шкоди.

Метою цієї роботи є комплексна оцінка аномальних відхилень абіотичних факторів та структури угруповань гідробіонтів чорноморської екосистеми упродовж перших трьох місяців після залпового потрапляння опріснених та забруднених вод внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища.

Матеріал та методи досліджень

Дослідження проводилися в прибережній зоні північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) з 6 червня 2023 р. (день підриву Каховської ГЕС) по 24 серпня 2023 р. на 11 станціях (рис. 1).

Всього відібрано 593 проби за 9 показниками (табл. 1).

Гідрологічні показники. Для отримання гідрологічних характеристик зазначеного району використовувались дані спостережень за величиною стоку річок за 2023 р., які надані метеостанцією м. Очаків (Україна). Дані про температуру та солоність морської води за три тижні до надходження забрудненої води (15.05.2023–06.06.2023 р.) та за три тижні після повернення значень солоності води до нормальних (24.06.2023–15.07.2023 р.) надані МГС «Одеса-порт».

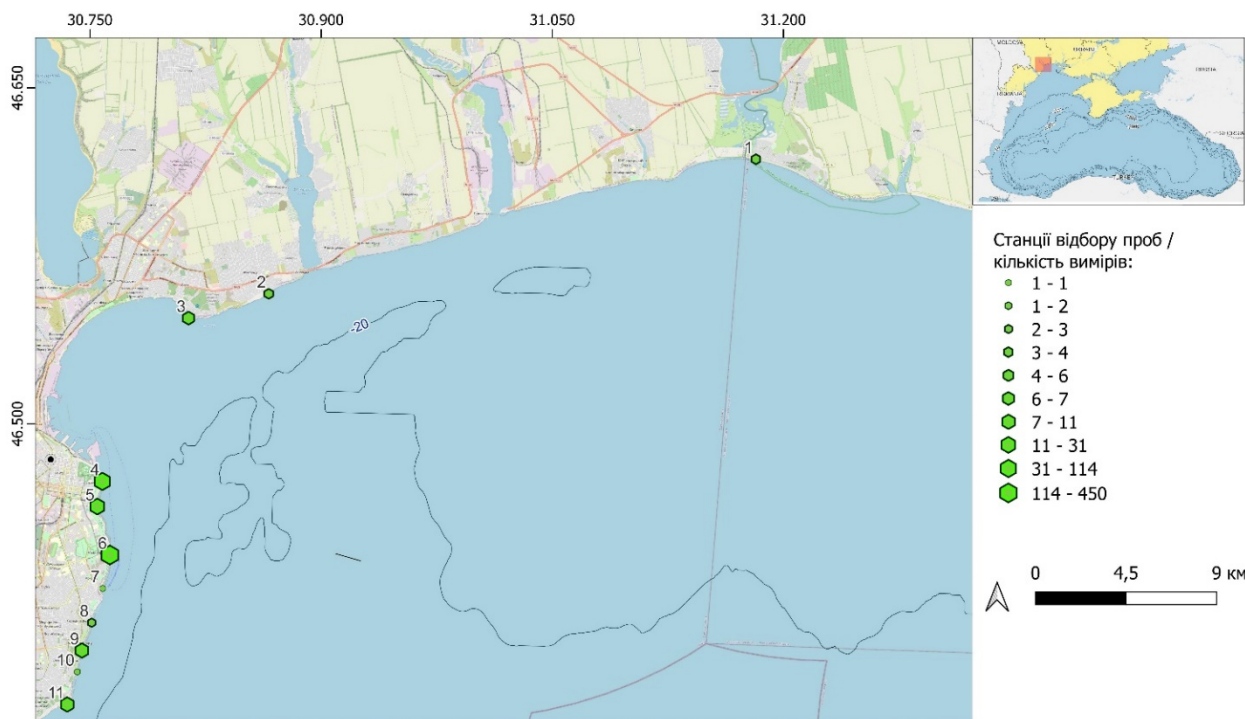


Рис. 1. Карта району досліджень зі станціями: 1 – с. Коблево; 2 – с. Фонтанка; 3 – мис Північний Одеський; 4 – мис Ланжерон; 5 – пляж «Відрода»; 6 – мис Малий Фонтан; 7 – пляж «Аркадія»; 8 – 10-та станція Великого Фонтана; 9 – 13-та станція Великого Фонтана; 10 – 16-та станція Великого Фонтана; 11 – мис Великий Фонтан

Таблиця 1

Кількість проб, які відібрані у північно-західній частині Чорного моря в період 06.06.2023–24.08.2023 р.

Показник	Станція	Кіл-ть проб за станціями (нумерація згідно з рис. 1)											Загальна кіл-ть проб за показником
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Температура та солоність		1	1	2	40	16	13	1	1	2	1	2	80
Кисень		–	–	1	2	–	8	–	–	–	–	2	13
Біогенні речовини		1	1	2	11	–	13	–	–	2	–	2	32
Мікропсамон		–	–	–	–	–	18	–	–	–	–	–	18
Мейобентос		–	–	–	–	–	61	–	–	–	–	–	61
Макрозообентос		–	–	–	–	–	87	–	–	–	–	–	87
Фітобентос		–	–	–	–	–	252	–	–	–	–	–	252
Фітопланктон		1	1	2	9	3	10	–	1	2	–	2	31
Зоопланктон		1	1	–	15	–	–	–	–	2	–	–	19
Загальна к-ть проб за станціями		4	4	7	77	19	450	1	2	8	1	8	593

Гідрохімічні показники. Проби води на вміст розчинених біогенних речовин аналізувалися упродовж 24 год. після їх відбору (Руководство ... 1993). Солоність (‰) і температура (°C) води визначалися за допомогою портативного солеміру Nash sensIONTM+EC5. Концентрації розчиненого кисню (мг·дм³) та насиченості води киснем (%) визначалися за допомогою портативного оксиметра Horiba LAQUAast-DO110.

Токсичність. Для токсикологічного аналізу використано проби морської води, які були відібрані відповідно до ДСТУ ISO 5667-9:2005 (2006). Визначення гострої токсичності проведено на адаптованій до умов підвищеної солоності (5–7‰) лабораторній культурі *Daphnia magna* Straus (ДСТУ 4173-2003 2004). Експозиція дослідів становила 96 год., критерієм гострої летальної токсичності була загибель ≥ 50 % тест-об'єктів порівняно з контролем.

Супутникові дані. Показники концентрації хлорофілу «а» були отримані на основі міжнародних платформ: «Copernicus Marine Service – CMEMS» (CMS 2023), з набору даних «Black Sea Ocean Colour Plankton MY L4» (Kajiyama et al. 2018), продуктів обробки супутників Sentinel 3 (OLCI) та Aqua (MODIS) в оптичних діапазонах зйомки, а також розраховувалися з використанням біооптичного нейромережевого процесору C2RCC (Brockmann et al. 2016), програмного комплексу Sentinel Application Platform (SNAP; version 9.0).

Біотичний компонент. У рамках досліджень були відібрані проби мікропсамону, мейобентосу, макрозообентосу, фітобентосу, фітопланктону та зоопланктону. Мікропсамон відібрано з верхнього шару донних відкладів (до 2 см) на глибині 0,5 м на піщаній субліторалі. Мейобентос відбирався за допомогою ручного керна (діаметр 3,8 см, висота 50 см) або рамкою (розмір 10 см × 10 см із заглибленням у ґрунт 5 см) у трьох повторах на кожній станції. Проби макрозоо-

та фітобентосу збирали рамкою кількісного обліку розміром 10 см × 10 см на кам'янистому субстраті. Для дослідження фітопланктону використано воду з поверхневого шару об'ємом 1 л. Проби зоопланктону відбиралися шляхом фільтрування 100 л води з поверхневого шару крізь сітку з вічком 100 μ m або тотальним вертикальним ловом сіткою Джеді вічком 100 μ m.

Показники чисельності та біомаси бентосних організмів розраховували на 1 м², планктонних – на 1 м³. Біомасу гетеротрофних флагелат у пробах інтерстиціальної води проводили без попереднього згущення, консервації та фільтрації з подальшим перерахунком кількісних показників на 1 см³ ґрунту (Sonntag et al. 2000; Брянцева и др. 2005). Біомасу видів нематод визначали за номограмами (Численко 1968), а трофічні типи – за морфологією кишкових порожнин (Wieser 1953).

Камеральна обробка проб мейофауни, макрозообентосу, фітопланктону, зоопланктону та фітобентосу проводилася у відповідності до методик (Vincx 1996; Воробьева 1999; Цибань 1980; Alexandrov et al. 2014; Moncheva, and Paq 2010; Гусяков 1980; Еременко 1980). Розрахунки індексу поверхні макрофітів проводилися за методичними рекомендаціями (Миничева и др. 2003). Номенклатура водоростей наведена за AlgaeBase (Guiry, and Guiry 2023), а тварин – за World Register of Marine Species (WoRMS 2023).

З метою оцінки обсягів загибелі мідії середземноморської (*Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819), як ресурсного виду в регіоні, були проведені окремі дослідження. Розміри мідій (довжина, висота та ширина черепашок) визначали штангенциркулем з точністю до 0,1 мм за поширеною схемою вимірів (Марикультура ... 2007). Зокрема, в пробах визначали кількість загиблих особин, для розрахунку загальної маси яких використовували алометричне рівняння (Закономірності ... 2021). Загальна маса моллюска включає масу м'яких тканин, масу міжстулкової рідини та масу черепашки.

Для розрахунку загальних чисельності та біомаси загиблих мідій була визначена (за даними супутника Landsat 8-9) площа ПЗЧМ, яка потрапила під інтенсивний вплив прісної води. Для визначення площі штучних твердих субстратів враховували загальну довжину гідротехнічних споруд у межах м. Одеса (разом з берегозахисними спорудами та спорудами Одеського порту), яка становить близько 30 км (Оценка ... 1994; Реєстр ... 2023).

Розрахунок аномалій показників. Для можливості кількісного співставлення відгуку абіотичних факторів і різних життєвих форм гідробіонтів на наслідки потрапляння вод Каховського водосховища за принципом «вплив-реакція» в універсальних одиницях виміру була використана формула розрахунку відсоткового відхилення значення показника у конкретний час (червень–серпень 2023 р.) від регіональної норми за визначений період (за наявності баз даних за декілька попередніх десятиліть) для кожного з розглянутих у роботі абіотичних та біотичних елементів:

$$A = (P_i - P_x) \times 100 / P_x,$$

де: A – аномалія (%); P_x – значення регіональної норми для північно-західної частини Чорного моря; P_i – значення для періоду червень–серпень 2023 р.

Результати та обговорення

Абіотичні фактори

Гідрологічні показники

Після руйнування греблі Каховської ГЕС, враховуючи зниження та підйом солоності води за даними МГС «Одеса-порт», загальна тривалість періоду надходження води з водосховища становила 17 діб. Об'єм Каховського водосховища до підриву греблі становив 18,2 км³. За оцінкою Міндовкілля водосховище було спустошене на 73 %, що відповідно становить 13,3 км³ (Промова ... 2023). Середній багаторічний об'єм стоку за червень як місяць, впродовж якого спостерігалось безпосереднє надходження води з Каховського водосховища, дорівнює 3,42 км³. Середній за багаторічний період (з 1977 по 2020 рр.) річний об'єм стоку Дніпровсько-Бузького лиману становив 43,4 км³. Отже, за період з 07.06.2023 р. по 24.06.2023 р. до моря надійшло 31 % середньобагаторічного об'єму річного стоку. Таким чином, аномалія об'єму річкового стоку Дніпровсько-Бузького лиману за період надходження води з водосховища становила +425 %, зокрема, на етапі гідрологічного та фізичного залпового впливу +650 %, а на етапі вибухової реакції біоти – +170 %.

До надходження забрудненої води з Каховського водосховища температура поверхневого шару води, за даними МГС «Одеса-Порт», становила 19,3°C. На рисунку 2 наведений хід температури поверхневого шару води, у якому можна виділити такі періоди: з 6 червня по 24 червня – середня температура води біля узбережжя м. Одеса під час безпосеред-

нього впливу забрудненої води становила +21,6°C; з 25 червня по 15 липня – середня температура води після повернення солоності води до нормальних значень (10,2 ‰) становила +20°C. У ході температури поверхневого шару води значних аномалій не спостерігалось і показники слідували за річним ходом температур повітря.

Різке зниження температури води з +22°C до мінімуму +12,2°C і наступне повернення до +22°C у період з 28.06.2023 р. по 03.07.2023 р. (рис. 2) може бути пояснене сильним згоном.

Щоденні спостереження з 6 червня за солоністю морської води на станції 4 показали такі результати. Прісна та тепла вода Каховського водосховища за 4 доби після підриву греблі досягла досліджуваної ділянки узбережжя. Так, солоність поверхневого шару води значно знизилася – з 13 ‰ 6 червня до 7,4 ‰ 9 червня, мінімальні значення – 3,95 ‰ – були зафіксовані 11 червня. Солоність на рівні 4 ‰, в 3 рази менше мінімальних значень гранично допустимих концентрацій (ГДК) – 12 ‰, трималась у районі деякий час і лише за рахунок перемішування та згінно-нагінних явищ поступово зросла 26 червня до 15 ‰ (рис. 2).

Упродовж червня аномалія солоності поверхневого шару води становила 35 ‰, з максимальними значеннями з 07.06.2023 р. по 11.06.2023 р. – 71 ‰. Надалі в липні–серпні 2023 р. солоність води на Одеському узбережжі була на рівні багаторічних значень, змінювалася в межах 10–17 ‰, що пов'язано із згінно-нагінними явищами, які характерні для літнього періоду року.

Гідрохімічні показники

Надходження в море забруднених річних вод Каховського водосховища призвело до того, що в поверхневому шарі вод Одеського узбережжя (зона моря до глибин 5 м) при солоності 4 ‰ було зафіксовано насичення води киснем менш 75 %. Це може бути пояснено високим вмістом завислих речовин у забруднених водах, що надходили з Дніпровсько-Бузького лиману.

Рівень мінеральних речовин азоту (нітриту та нітрату) не перевищував ГДК для забруднюючих речовин у внутрішніх морських водах та територіальному морі України і був на рівні середньобагаторічних значень. У поверхневому шарі води Одеського узбережжя (на станціях 2, 4, 6) при солоності 4–5 ‰ (9–13 червня) спостерігались високі концентрації амонійного азоту – 1,2–2,6 ГДК. Максимальна концентрація була зафіксована 11 червня на станції 4, де і потім (25–26 червня) при солоності 7–10 ‰ вміст амонійного азоту становив 1,2–1,3 ГДК. Максимально зафіксована у морській воді концентрація амонійного азоту за період спостережень становила 13,8 ГДК. Її відзначали 9 червня на станції 1, яка розташована

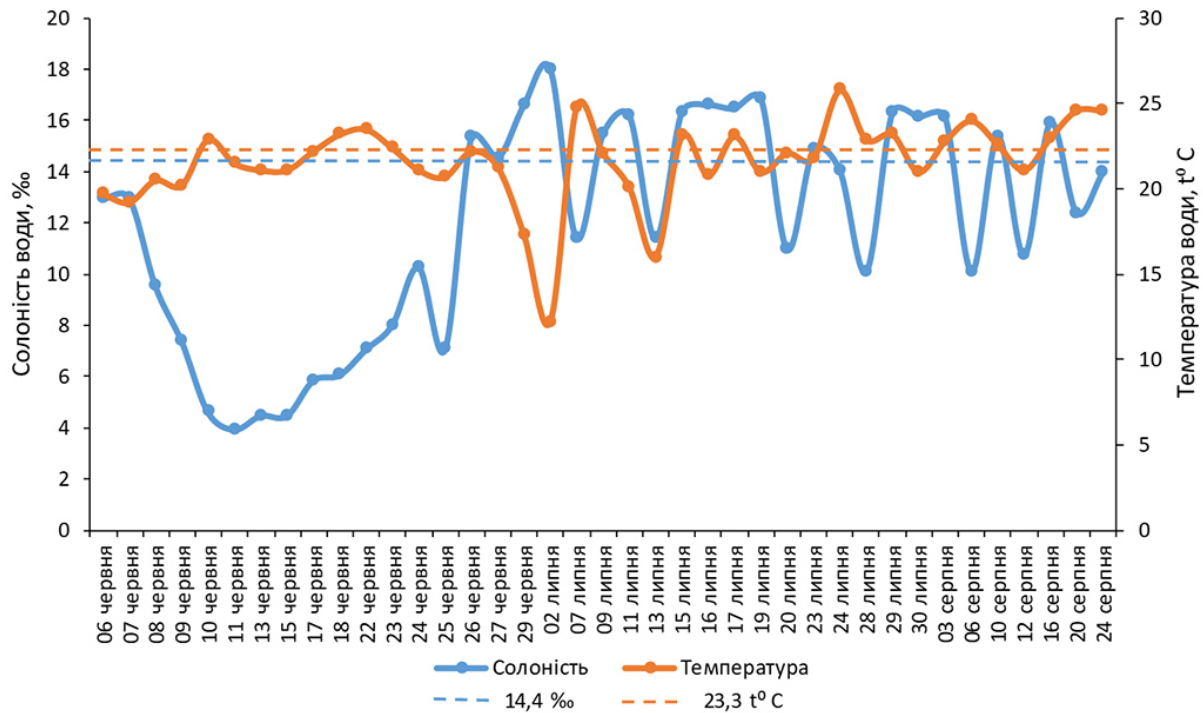


Рис. 2. Динаміка солоності (%) та температури (°C) води біля узбережжя м. Одеса (станція 4) в червні–серпні 2023 р. (середньо-регіональні значення вказані пунктирними лініями)

за 25 км від гирла Дніпровсько-Бузького лиману, при солоності морської води 5 ‰. Концентрації амонійного азоту у морській воді більше ГДК (дорівнює 0,5 мг/дм³) свідчать про надходження в море каналізаційних стічних вод і вод з різних колекторів, тваринницьких ферм. Слід також відзначити, що азот-амонійний – це форма мінерального азоту, якому віддають перевагу мікро-і макроводорості у разі створення нової органічної речовини. Наприкінці серпня після стабілізації солоності та концентрації мінеральних та органічних речовин азоту і вміст розчиненого у воді кисню повернулись на рівень середньобагаторічних значень.

Концентрації фосфатів і кремнекислоти на Одеському узбережжі в червні при солоності морської води 4 ‰ в 2–3 рази перевищували середні багаторічні значення, але максимальні концентрації фосфатів не перевищували ГДК. Високі концентрації фосфатів також відзначали у липні 2023 р. у районах мисів Північний, М. Фонтан та В. Фонтан, що може бути пов'язано з деструкцією та розкладанням відмерлої органічної речовини фітопланктону в період його масового розвитку. Після стабілізації солоності у серпні 2023 р. концентрації фосфатів і кремнекислоти, як і концентрації мінеральних та органічних речовин азоту та вміст кисню, також повернулись на рівень сезонних середньобагаторічних значень.

Токсичність

Аналіз проб морської води, що були відібрані 9 червня в прилеглий до північної частини Одесь-

кої затоки акваторії (станція 2), показав наявність токсичних ефектів за показником летальності тест-об'єктів (27,8±1,1 % порівняно з контролем). За встановленою токсикологічною характеристикою проби води були віднесені до таких, що мали помірну токсичність, тобто підвищену порівняно з фоновою, але нижчою, ніж загрозливий рівень гострої летальної токсичності.

Аналіз проб води 11 червня, які були відібрані на станції 4, показав уже наявність гострої летальної токсичності, оскільки показники летальності тест-об'єктів становили 82,4±2,4 %, що перевищувало 50-відсотковий бар'єр, який є критерієм токсичності. Під час аналізу проб морської води, відібраних 13 червня на цій же станції, показники летальності тест-об'єктів становили 74,6±3,1 % порівняно з контролем, що також свідчило про наявність гострої токсичності води. У подальших дослідженнях летальність тест-об'єктів не виявлялась, що вказувало на відповідність прибережних мас морської води Одеської затоки встановленим нормативам токсикологічної якості.

Супутникові дані

Супутникові дані дали можливість оцінити просторову динаміку та часові тенденції «цвітіння» за показниками концентрації хлорофілу «а», який відзеркалює інтенсивність «цвітіння» та щільність фітопланктону у морському середовищі. У червні основні площі «цвітіння» розташовувались у прибережній

частині морських акваторій, Дніпровсько-Бузькому лимані та Одеському регіоні, куди безпосередньо надходили водні маси Каховського водосховища. В липні процеси перемішування та згинно-нагінні явища поширили забруднені водні маси практично на весь північно-західний шельф. Фітопланктон як автотрофний компонент, однією з функцій якого є «спалювання» розчинених органічних та мінеральних сполук (Minicheva et al. 2014), є біологічним елементом, за інтенсивністю «цвітіння» якого можна спостерігати за «вигоранням» поживного ресурсу. Лише наприкінці серпня була відзначена стабілізація процесів «цвітіння» і припинилися нетипові для цього регіону процеси, які спостерігались у червні та липні 2023 року (рис. 3).

До кінця червня інтегрально просторова аномалія концентрації хлорофілу «а» в північно-західній частині Чорного моря досягла +170 %. Максимальне значення – +280 % – було зафіксоване на початку липня, а потім почалось поступове зниження до регіонального рівня, який притаманний північно-

західній частині Чорного моря для середньоводних років (рис. 4).

Біотичний компонент

Фітопланктон

Загалом, за три місяці спостережень за прибережним фітопланктоном пік розвитку ціанопрокариот (синьо-зелені водорості) припав на 18 червня, тобто через два тижні після підриву греблі (рис. 5).

Так, регіональна аномалія чисельності *Aphanizomenon flosaquae* Ralfs ex Bornet & Flahault становила +2000 %, *Jaaginema kisselevii* (Anisimova) Anagnostidis & Komárek – +70 %. Максимальні значення діатомових водоростей зареєстровані трохи раніше – 11 червня, вже приблизно через тиждень після катастрофи. Відзначена позитивна аномалія чисельності *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve – +80 %, *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J.C.Lewin – +50 %. Починаючи з липня і до 20 серпня стан фітопланктону поступово нормалізувався до рівня регіональних показників і тих значень, які були до моменту потрапляння води з Каховського водосховища.

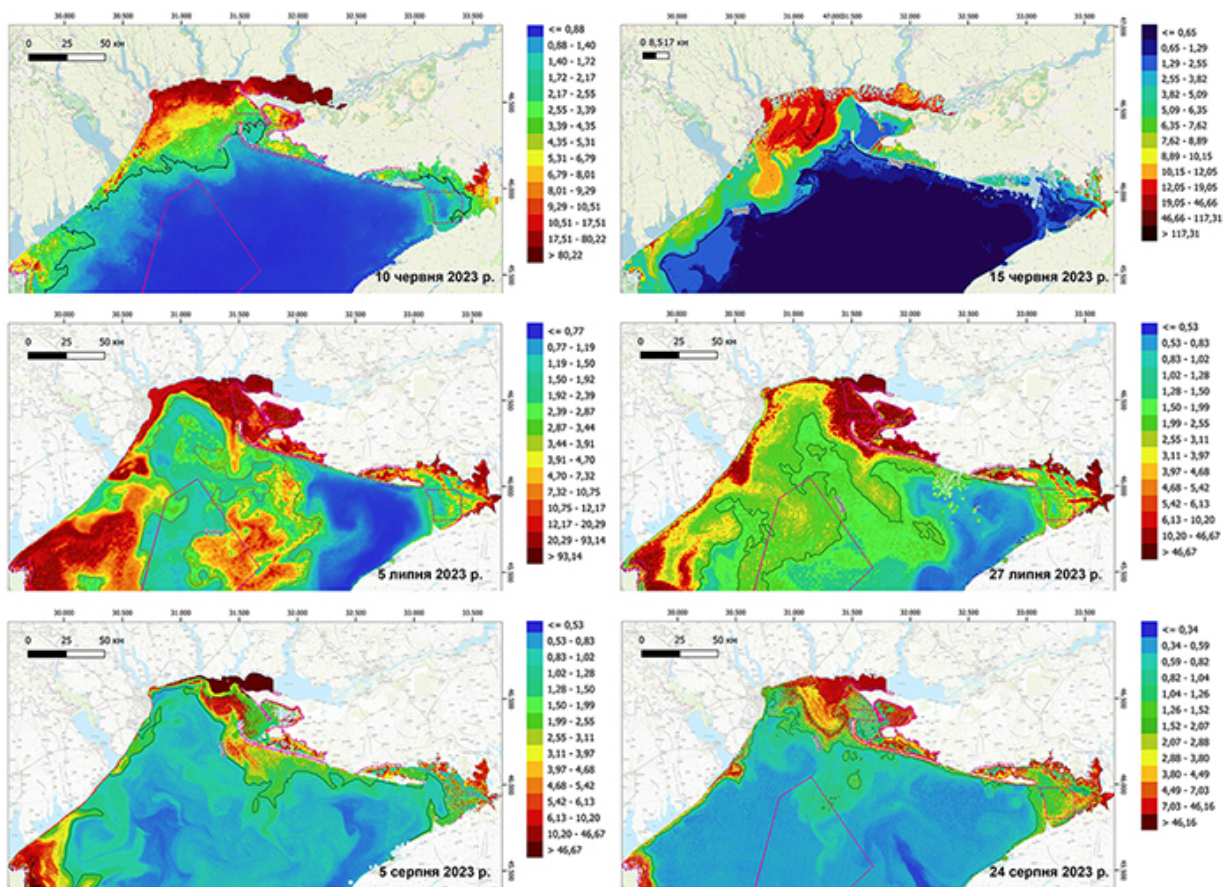


Рис. 3. Просторово-часова динаміка концентрації хлорофілу «а» в північно-західній частині Чорного моря в червні–серпні 2023 р.

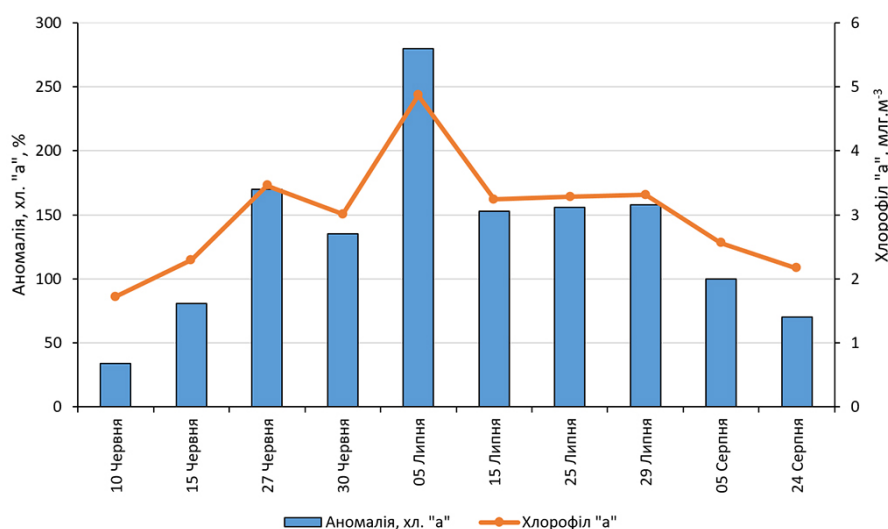


Рис. 4. Динаміка середніх значень концентрації хлорофілу «а» в північно-західній частині Чорного моря у червні–серпні 2023 р. та аномалії перевищення цього показника від регіональних значень середньорічного року

Максимальні позитивні регіональні аномалії чисельності фітопланктону спостерігалися упродовж 10–12 діб, у період 11–22 червня, і досягали рекордних значень близько +1400 %. Такі високі показники аномалії чисельності клітин водоростей в одиниці об'єму водного середовища можуть бути пояснені тим, що реакція фітопланктону у відповідь на залпове надходження в морську екосистему великих об'ємів органічних і мінеральних речовин супроводжувалась перевагою розвитку дрібноклітинних, екологічно активних видів, представників синьо-зелених водоростей. Таке припущення підтверджує той факт, що в пік «цвітіння» фітопланктону (18 червня) позитивна регіональна аномалія біомаси фітопланктону за абсолютною величиною була практично в 5 разів нижчою порівняно з аномалією чисельності і становила +300 % (див. рис. 5 а, б). Вочевидь, що дрібноклітинні види фітопланктону, які мають невеликі об'єми клітин і відповідно біомаси, дають більш виражене збільшення аномалії за чисельністю порівняно з аномалією біомаси.

Мікросамон

Надходження до морської екосистеми значних об'ємів поживних речовин призвело до значного підвищення показників розвитку гетеротрофних флагелат в Одеській затоці. На 10 добу (15 червня) після катастрофи їх угруповання характеризувалося високими показниками чисельності (1797 екз·см⁻³) та біомаси (1667·10⁻⁶ мг·см⁻³). В результаті порівняння з даними, отриманими в літній період 2017–2020 рр., була зареєстрована позитивна аномалія за показниками чисельності +300 % та біомаси – +1220 % (див.

рис. 5 в, г). Надалі упродовж двох тижнів спостерігалися підвищення позитивних аномалій чисельності (224 %) та біомаси (337 %). Вочевидь, алохтонні органічні речовини, що надійшли внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища, поряд з автохтонними речовинами, що осідають на дно, забезпечували активне функціонування бактеріобентосу та його споживачів – гетеротрофних флагелат.

Зміни відбувалися також і в їхній таксономічній структурі. Зафіксовано збільшення кількості видів (на 86 %), у тому числі за рахунок прісноводних, які раніше не відзначалися в північно-західній частині Чорного моря. В липні кількісна структура угруповань гетеротрофних флагелат повернулася до норми.

Фітобентос

Під час спостережень за реакцією макро- та мікробентосу бенталі у складі угруповань фітобентосу було зафіксовано 13 видів макроводоростей і 12 видів епіфітних мікробентосів. Переважали види із відділів Bacillariophyta (10 видів), Chlorophyta (6 видів), Rhodophyta (6 видів). У червні–серпні в бентосі домінували такі види багатоклітинних водоростей – *Cladophora vagabunda* (Linnaeus) Hoek, *Ceramium siliquosum* var. *elegans* (Roth) G. Furnari, *Ulva intestinalis* Linnaeus, *Cocconeis scutellum* var. *scutellum* Ehrenb., *Rhicosphenia abbreviata* (C. Agardh) Lange-Bert., *Tabularia fasciculata* (C. Agardh) D.M. Williams & Round.

У зв'язку з тим, що розвиток фітопланктону пригнічує розвиток фітобентосу за рахунок екранування фотосинтетичної активної радіації, закономірно, що в період активного «цвітіння» фітопланктону у червні 2023 р. у морській прибережній частині на кам'яни-

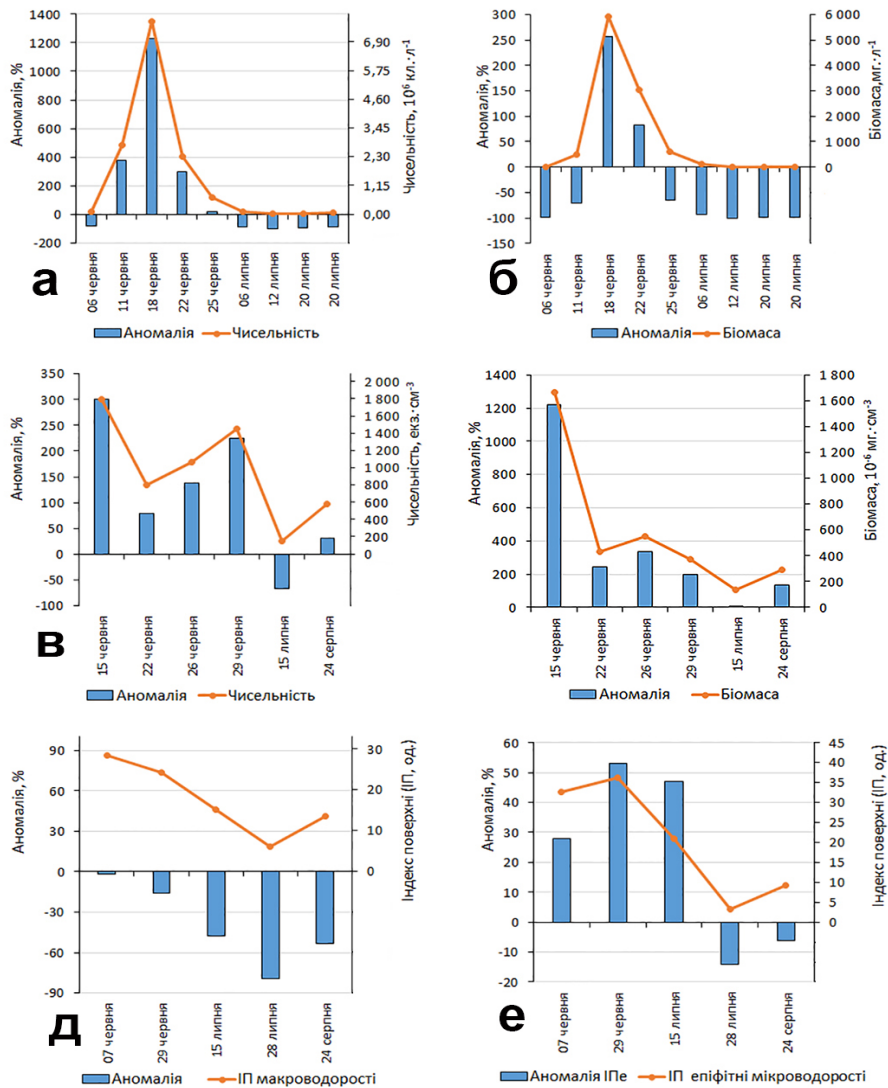


Рис. 5. Аномалії показників рослинних угруповань та мікроресамону (станція б): чисельності (а) та біомаси (б) фітопланктону; чисельності (в) та біомаси (г) гетеротрофних флагелатів; індексів поверхні макроводоростей (д) та епіфітних мікрowodоростей (е)

стих субстратах спостерігалось пригнічення розвитку макрофітобентосу. Відповідно, значення аномального регіонального відхилення індексу поверхні (ІП) фітоценозів, які відображають інтенсивність продукційного процесу донної рослинності, набули від'ємних значень та досягли значення до 83 % лише наприкінці липня (див. рис. 5 д). Більш тривалий період реакції макрофітів у відповідь на зовнішній вплив, порівняно з фітопланктоном, пояснюється тим, що багатоклітинні макрофіти мають значно довший життєвий цикл розвитку, значно більші розміри талому і відповідно нижчу екологічну активність (Миничева 1997), що потребує більшого часу на прояв реакції підвищення чи зниження швидкості первинно-продукційної функції.

Максимальні позитивні регіональні аномалії індексів поверхні епіфітних мікрowodоростей спостерігалися упродовж 16–18 діб, у період з 29 червня по 15 липня, і досягли значень +50 % (див. рис. 5 е). Реакція епіфітних мікрowodоростей у відповідь на надлишкове надходження в морську екосистему органічних і мінеральних речовин проявилася у нехарактерному для такого сезону року масовому розвитку цього екологічно активного компонента фітобентосу. Мікроепіфіти за часом прояву і тривалістю реакції на погіршення екологічної ситуації у водоймі займають проміжну позицію між фітопланктоном і макрофітами.

Зоопланктон

Під час спостережень загальні показники чисельності та біомаси зоопланктону мали невелику

негативну аномалію в межах 78–99,5 % та 82–100 % відповідно порівняно із середніми показниками по регіону за цей період. Лише 26 червня показники зоопланктону мали максимальну регіональну позитивну аномалію за чисельністю (+457 %) та біомасою (+817 %) (рис. 6 а, б). Такі показники були пов'язані з масовим розвитком нативної для регіону “*Acartia clausi+tonsa*” complex (чисельність – 58900 екз.·м⁻³, біомаса – 1332,5 мг·м⁻³) та нещодавнього вселенця *Oithona davisae* Ferrari F.D. & Orsi, 1984 (чисельність – 460 екз.·м⁻³, біомаса – 7,1 мг·м⁻³).

Разом із виносом прісних вод відбувся перенос нетипових для Одеського регіону видів зоопланктону. Так, 9 червня на станції 1 був відзначений спалах розвитку *Podonevadne trigona* (G.O. Sars, 1897) (чисельність сягала 27400 екз.·м⁻³) – виду, який характерний для прісноводних і солонуватих водоемів; з 15 червня такий вид у невеликій кількості відзначений також на станції 4 (від 20 до 240 екз.·м⁻³). Також 11 червня на цій станції були зафіксовані нетипові для прибережної частини Чорного моря личинки *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), що притаманно для прісних та солонуватих вод басейну р. Дніпро.

Макрозообентос

Для оцінки реакції донних безхребетних на вплив опрісненої води було вибрано модельне угруповання обростання, яке сформоване в основному видами, що ведуть прикріплені до субстрату або малорухливий спосіб життя та не можуть уникати дії факторів навколишнього середовища. Всього за період досліджень у зообростанні на глибині до 5 м зареєстровано 56 таксонів макрозообентосу, з них Annelida – 16 таксонів, Mollusca – 8,

Crustacea – 26, Varia – 6. За чисельністю в угрупованні переважав *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791), при цьому найбільші його скупчення були на глибині до 3 м, за біомасою домінувала *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819. Після тривалого перебування в умовах критичної для існування солоності нижче 8 ‰ з червня до середини липня на глибині до 3 м в угрупованні зареєстрована масова загибель мідії (до 1067 екз.·м⁻² загиблих особин), зростання чисельності більш стійкого до стресових дій факторів *M. lineatus* (від 72952 екз.·м⁻² ± 26814 екз.·м⁻² до 132616 екз.·м⁻² ± 30552 екз.·м⁻²), аномально висока щільність дрібних ракоподібних (від 4807 екз.·м⁻² ± 1388 екз.·м⁻² до 75053 екз.·м⁻² ± 9327 екз.·м⁻²). Як наслідок, наприкінці червня на цій глибині зареєстровано зниження загальної біомаси та підвищення загальної чисельності угруповання. Останнє фіксувалось до середини липня. В діапазоні глибини 4–5 м у цей період змін стану угруповання не зареєстровано (рис. 7).

Однією з вибухових реакцій безхребетних на залповий вплив опрісненої води стали зміни в трофічній структурі угруповання в період з червня до середини липня. Це збіглося з біологічним періодом розмноження, яке сприяло стрімкому зростанню до аномально високого рівня чисельності дрібних детритофагів (від 5885 екз.·м⁻² ± 2414 екз.·м⁻² до 42031 екз.·м⁻² ± 3841 екз.·м⁻²) та рослинно-детритоїдних безхребетних (від 1188 екз.·м⁻² ± 315 екз.·м⁻² до 29788 екз.·м⁻² ± 13020 екз.·м⁻²) на глибині до 3 м. Максимальні аномальні відхилення їх чисельності від регіональної норми перевищували 660 % та 1400 % відповідно (див. рис. 7).

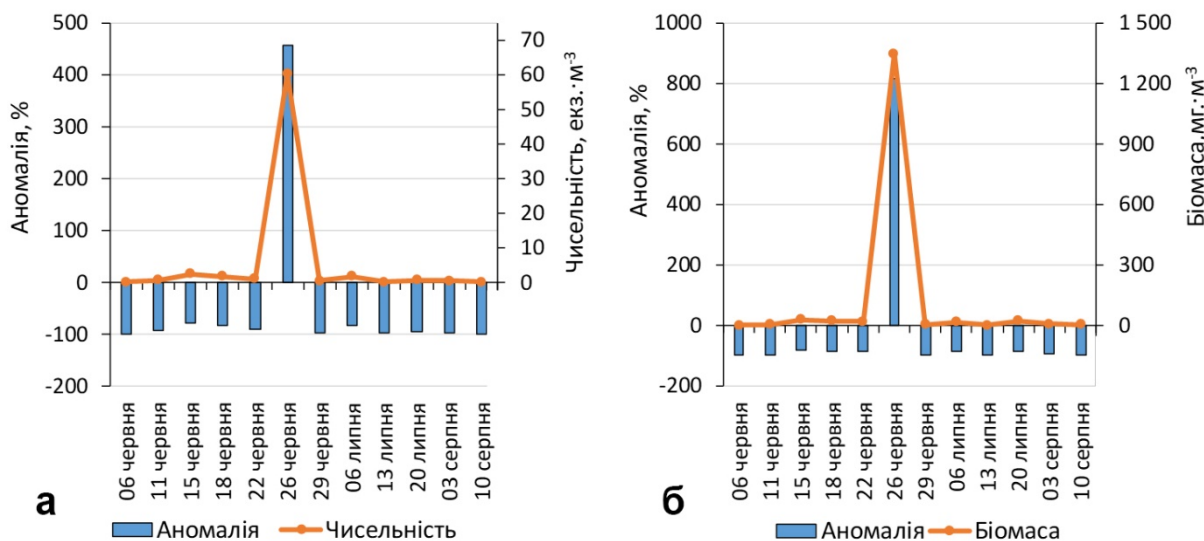


Рис. 6. Аномалії чисельності (а) та біомаси (б) зоопланктону (станція 4)

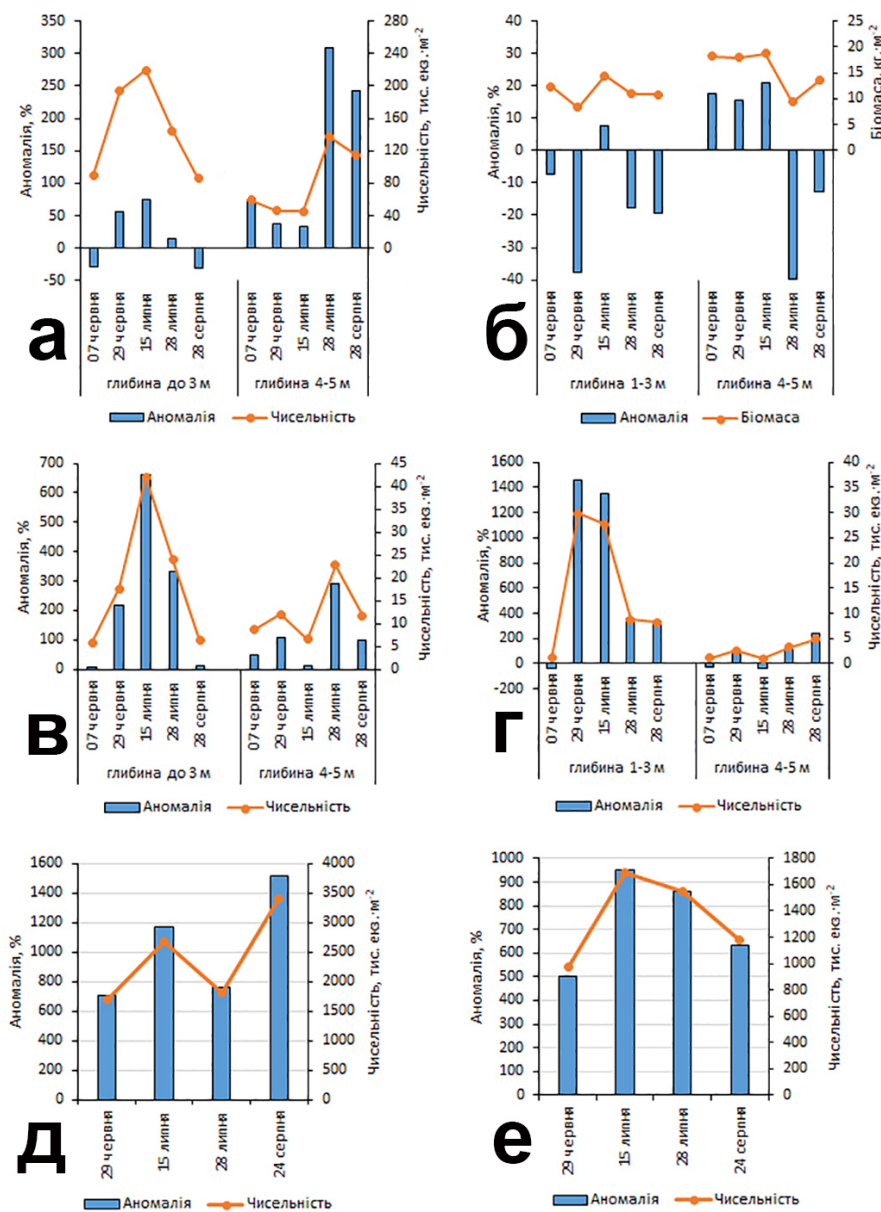


Рис. 7. Аномалії показників донних угруповань (станція 6): чисельність (а) та біомаса (б) макрозообентосу (тверді субстрати); чисельність детритофагів (в) та рослинно-детритоїдних макробезхребетних (г); чисельність мейобентосу на пухких (д) та твердих (е) субстратах

Мейобентос

Мейобентос у зоні субліторалі на глибині 1–5 м був представлений 10 групами організмів – Foraminifera, Nematoda, Harpacticoida, Halacarida, Turbellaria, Kinoryncha, Oligochaeta, Polychaeta, Bivalvia, Amphibalanus. Особливістю стану мейобентоса в цьому районі була підвищена щільність всіх його представників упродовж періоду спостережень. Домінували в емейобентосі за кількістю нематоди (56 %), гарпактикоїди (10 %), в псевдомейобентосі – молодь двостулкових моллюсків (10 %), поліхет (8 %). Щільність мейобентоса зміню-

валася від 1336163 до 2083333 екз·м⁻², а біомаса від 15261,4 мг·м⁻² до 23828,5 мг·м⁻². Середні щільність та біомаса становили 1736027 екз·м⁻² та 19815,6 мг·м⁻² відповідно. Аномальні відхилення чисельності від регіональної норми змінювалися від 503 % до 1513 % (див. рис. 7).

Формування показників щільності мейобентоса (особливо нематод) здійснювалося водночас в умовах зменшення рекреаційного навантаження на прибережну зону (закриття пляжів у воєнний період) та збільшення евтрофності в зоні субліторалі (1–5 м), викликаного наслідками катастрофи.

Спостерігалось збільшення щільності відносно чутливих гарпактикоїдів і представників псевдомейобентоса в період останньої зйомки (24.08.2023 р.), яке може бути результатом відновлення.

Водні біологічні ресурси

У червні 2023 р. спостерігалось масове винесення прісноводних риб з Каховського водосховища та нижнього Дніпра до північно-західної частини Чорного моря. До будівництва греблі Каховської ГЕС вихід прісноводних риб у море із весняними паводковими водами спостерігався практично щороку з різною інтенсивністю (Амброз 1956). У таких випадках прісноводних риб (коропа, судака, тараню, карася) нерідко ловили навіть у Одеській затоці, де переважно мешкають види, що виживають у разі коливань солоності від 5–6 ‰ до 17–18 ‰. Різка зниження солоності призводить до відходу від берегів типово морських риб – пелагічних мігрантів. Придонно-пелагічні і донні риби, які розмножуються навесні і влітку, припиняють нерест або залишають донну ікру без охорони, внаслідок чого ембріони риб та пелагічна ікра у разі опріснення осідає на дно і теж гине. Одночасне опріснення і забруднення води погіршує на деякий час загальні умови існування і харчування риб як у товщі води, так і на дні.

Особливість масового винесення риби в море в червні 2023 р. полягає у його значних масштабах, а також у тому, що воно сталося пізніше, після завершення основного періоду нересту більшості цінних промислових видів.

На Одещині, на ділянці від пересипу Тилігульського лиману до м. Южне, 08.06.2023 р. спостерігалися перші викиди на берег мертвих товстолобиків масою 3–4 кг. З 09.06.23 р. по 12.06.23 р. у ще не знятих ятерях (каравках), встановлених у прибережній смузі Тилігульського пересипу, поряд із морськими видами (атерина, бички) відзначалися прилови тарані, поодинокі карася сріблястого та сонячного окуня. Улови прісноводних риб сягали 3,5 кг на один ятір. Надалі всі офіційні знаряддя лову в морі було знято. Очевидно, частина прісноводних риб продовжувала залишатися в опрісненій морській воді ще не менше місяця, оскільки 05.07.2023 р. у районі гирла Тилігульського каналу спостерігався викид мертвих особин коропа, сріблястого карася і поодинокі судака.

Усього після прориву греблі та виносу дніпровської води в море вдалося зафіксувати 6 видів прісноводних риб: товстолобик (гібрид?) *Hypophthalmichthys sp.*, плітка (тарань) *Rutilus rutilus*, карась сріблястий *Carassius gibelio*, короп *Cyprinus carpio*, сонячний окунь *Lepomis gibbosus*, судак *Sander lucioperca*. Можна вважати, що зрештою вся прісноводна риба, що вийшла в море, загинула.

Іншим аспектом впливу на біологічні ресурси була загибель донних безхребетних, які ведуть малорухливий або прикріпленний до субстрату спосіб життя та не були здатні уникнути негативної дії клину прогрітої та опрісненої води. Саме оцінка такого впливу була проведена для чорноморської мідії в рамках експертного висновку на виконання постанови Офісу Генерального прокурора у кримінальному впровадженні.

Було показано, що на твердих субстратах на глибині до 3 м відбулася масова загибель популяції мідії. Лінійні розміри загиблених особин переважно перевищували 20 мм довжини, що свідчить про загибель найбільш цінної репродуктивної частини популяції виду.

На кам'яному субстраті середня довжина загиблених особин мідії становила $43,5 \text{ мм} \pm 1,18 \text{ мм}$ та змінювалась від 18,8 мм до 60,5 мм. Середня загальна маса загиблених особин становила $5,928 \text{ г} \pm 0,364 \text{ г}$ та змінювалась у діапазоні від 0,546 г до 13,241 г. На гідротехнічних спорудах середня довжина загиблених особин мідії становила $48,53 \text{ мм} \pm 2,24 \text{ мм}$ та варіювала в межах від 25,9 мм до 61,4 мм, а їх загальна маса становила $7,891 \text{ г} \pm 0,842 \text{ г}$ і варіювала в діапазоні від 1,309 г до 13,785 г.

Середня чисельність загиблених особин *M. galloprovincialis* у зоні впливу опрісненої води на твердих субстратах становила $583 \text{ екз} \cdot \text{м}^2 \pm 115 \text{ екз} \cdot \text{м}^2$, біомаса – $4089,5 \text{ г} \cdot \text{м}^2 \pm 973,7 \text{ г} \cdot \text{м}^2$. Сумарна біомаса загиблої частини популяції *M. galloprovincialis* на твердих субстратах на глибині до 3 м становить 39,6 % від сумарної біомаси живих та загиблених особин.

За даними Open Geospatial Consortium (OSG 2023) встановлено площу природних твердих субстратів (каменів, валунів) у зоні впливу прісної води на глибині до 3 м, яка становить $0,9 \text{ км}^2$. Загальна біомаса загиблої популяції мідії на сумарній площі природних та штучних твердих субстратів у зоні впливу прісної води (до 3 м глибини) в північно-західній частині Чорного моря становила близько 3680 т.

Узагальнюючи комплексну оцінку наслідків руйнування греблі Каховського водосховища на абіотичний складник та угруповання різних життєвих форм гідробіонтів морської екосистеми можна стверджувати, що «вибухова» фаза впливу мала тривалість близько трьох місяців з моменту початку катастрофи – 6 червня 2023 р. Своєю чергою в цьому періоді можна виділити чотири етапи, для кожного з яких був притаманний певний рівень аномалій у відхиленні значень параметрів від середнього регіонального рівня показників екосистеми північно-західної частини Чорного моря, визначений у відсотках (табл. 2).

У зв'язку із сезонною динамічністю морської екосистеми для абіотичних факторів та біологічних

Аномалії значень показників абіотичних факторів та індикаторів угруповань гідробіонтів на різних етапах вибухової фази впливу руйнування греблі Каховського водосховища на екосистему північно-західної частини Чорного моря у 2023 р.

Тривалість	Аномалія, %					
	Абіотичні фактори		Угруповання гідробіонтів			
	Річковий стік	Солоність	Фітопланктон	Зоопланктон	Фіто-бентос	Зообентос
I етап – Гідролого-гідрохімічний та фізичний залповий вплив						
6–11 червня	650	71	450	<10	<10	<10
II етап – Вибухова реакція біоти						
12 червня – 10 липня	170	15	1400	900	>10	1600
III етап – Високий рівень продукційно-деструкційних процесів						
11 липня – 10 серпня	<10	<10	>10	>10	90	900
IV етап – Повернення до регіонального рівня						
11–31 серпня	<10	<10	<10	<10	<10	400

угруповань завжди спостерігається декілька десятків відсотків аномальних відхилень від середньо регіонального рівня. І лише значні зовнішні впливи можуть збільшити аномальні відхилення до декілька сотень, а у екстраординарних випадках до тисячі і більше відсотків. Приклад Каховської катастрофи є таким випадком, за умов якого на I етапі – *гідролого-гідрохімічний та фізичний залповий вплив* – у перший тиждень подій аномалії збільшення об'єму річкового стоку і падіння солоності зросли до сотень відсотків. Фітопланктон, як короткоциклічний і найбільш мобільний компонент біоти, першим відреагував на кардинальні зміни параметрів водного середовища і його аномальний розвиток почався вже на першому тижні. На II етапі – *вибухова реакція біоти* – аномалія у показниках чисельності клітин, яка супроводжувала масове «цвітіння» фітопланктону, досягала 1400 %. На III етапі – *високий рівень продукційно-деструкційних процесів* – практично всі життєві форми гідробіонтів досягли максимального відсотка аномалії, за виключенням фітобентосу, тому що інтенсивне «цвітіння» фітопланктону обмежувало доступ світла і стримувало розвиток макрофітів. У зв'язку з тим, що представники зообентосу мають довший цикл розвитку порівняно, наприклад, з фітопланктоном, їх аномальна реакція на наслідки Каховської катастрофи відповідно мала більш повільну та пролонговану реакцію. Навіть на IV етапі – *повернення до регіонального рівня* – індикатори угруповань зообентосу мали ще досить високий відсоток аномалії.

Підтвердженням того, що у серпні 2023 р. більша кількість елементів морської екосистеми після аномальних реакцій на вибухову фазу впливу Каховської катастрофи повернулась до середньо регіонального рівня, є факт рішення Державної санітарно-епідемі-

ологічної служби про відкриття з 12 серпня 2023 р. більшості міських пляжів м. Одеса.

Висновки

1. Аномалія об'єму прісної забрудненої води, яка потрапила до морської екосистеми в перший тиждень після руйнування греблі Каховського водосховища, становила 650 % від середньо регіонального рівня річкового стоку р. Дніпро. Мінімальні значення солоності – 3,95 ‰ були зафіксовані на Одеському узбережжі 11 червня. Солоність на рівні 4 ‰ (в 3 рази менше від мінімальних значень ГДК – 12 ‰) трималась з 10 по 17 червня, що відповідає 71 % аномалії від середньо регіонального рівня. Згодом, за рахунок перемішування водних мас, поступово зросла і вже 26 червня дорівнювала притаманному для регіону рівню – 15 ‰. Надалі в липні–серпні 2023 р. солоність води в регіоні коливалася в межах 10–17 ‰, що зумовлювалось згинно-нагінними явищами в літній період.

2. Основними змінами гідрохімічного режиму після надходження води з водосховища стало зниження насичення поверхневого шару моря киснем менше ніж 75 % та збільшення концентрації біогенних речовин. Високі концентрації амонійного азоту – 1,2–2,6 ГДК – реєстрували на 6-й день катастрофи в районі Одеського узбережжя, а максимальні показники (13,8 ГДК) зафіксовані 9 червня на станції 1. Також зафіксовані аномально високі концентрації фосфатів і кремнієвої кислоти, які в 2–3 рази перевищували середньобогаторічні значення, при цьому максимальні концентрації фосфатів не перевищували ГДК.

3. За результатами біотестування водного середовища було встановлено, що з 11 по 13 червня морські води регіону характеризувалися гострою летальною токсичністю, показники летальності

тест-об'єктів коливалися від $74,6 \pm 3,1$ % до $82,4 \pm 2,4$ %. Це перший випадок реєстрації гострої токсичності морської води Одеської затоки у ХХІ сторіччі. Надалі ці показники не мали таких критичних значень.

4. Дані спостережень, які отримані із супутників Sentinels, свідчать, що до кінця червня інтегрально просторова аномалія концентрації хлорофілу «а» в північно-західній частині Чорного моря досягла +170 %. Максимальне значення +280 % було зафіксоване на початку липня, потім почалось поступове зниження, яке до кінця серпня досягло регіонального рівня.

5. Пік масового розвитку синьо-зелених планктонних водоростей, з домінантами *Aphanizomenon flosaquae*, *Jaaginema kisselevii*, припав на 18 червня 2023 р. Максимальна регіональна аномалія чисельності фітопланктону спостерігалась у період 11–22 червня і досягла рекордних значень близько +1400 %.

6. Активне «цвітіння» фітопланктону в червні 2023 р. екранувало надходження фотосинтетичної активної радіації в придонні горизонти, внаслідок чого на кам'янистих субстратах прибережної зони спостерігалось пригнічення розвитку макрофітобентосу. Аномалія значень індексів поверхні макрофітів наприкінці липня досягла 90 %. Більш довгий життєвий цикл макрофітів порівняно з короткоциклічними клітинами пелагічних водоростей є причиною більш повільного відгуку макрофітобентосу на зміну умов розвитку порівняно з фітопланктоном.

7. Найбільш виражені зміни у структурі угруповань зообростання відбувалися в прибережній зоні на глибині до 3 м. З червня до середини липня в горизонті 0–3 м зареєстрована масова загибель мідії (*M. galloprovincialis*), яка досягала значень до 1067 загиблих особин на 1 м^2 твердого субстрату. Водночас відбулося зростання чисельності більш стійких до стресу видів, зокрема моллюска мітілястра

(*M. lineatus*), чисельність якого досягла більш ніж 130 тис. екз. $\cdot\text{м}^{-2}$. Також екологічні умови сприяли стрімкому зростанню чисельності дрібних детритофагів та рослинно-детритоїдних безхребетних, максимальні значення аномалій чисельності яких перевищували 660 % та 1400 % відповідно.

8. Наслідки Каховської екологічної катастрофи мали значний негативний вплив на водні біологічні ресурси регіону. З водними масами до морської екосистеми потрапила значна кількість прісноводних видів риб (товстолобик, судак, карась сріблястий, плітка та ін.), які мають промислове значення в пониззі Дніпра та Дніпровсько-Бузькому лимані, але більшість з них загинула в наступні декілька тижнів після трагедії. Окрім цього, в морській прибережній частині на твердих природних та штучних субстратах на глибинах до 3 м під впливом опрісненої води чисельність загиблих особин *M. galloprovincialis* становила до $583 \text{ екз}\cdot\text{м}^{-2} \pm 115 \text{ екз}\cdot\text{м}^{-2}$, біомаса – $4090 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2} \pm 974 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$. За розрахунками загальна біомаса загиблої частини популяції мідії була оцінена у розмірі близько 3,7 тис. т біомаси, що становить близько 40 % природної прибережної популяції моллюска північно-західної частини Чорного моря.

9. Узагальнена оцінка аномальних показників абіотичних факторів та індикаторів різних типів угруповань гідробіонтів, які були зафіксовані у фазі вибухової реакції на наслідки руйнування греблі Каховського водосховища, дозволяє виділити чотири етапи: I – *гідролого-гідрохімічний та фізичний залповий вплив* – з пріоритетами впливу значних аномалій зростання об'єму річкового стоку та зниження солоності (6–11 червня); II – *вибухова реакція біоти* – з пріоритетами гострих реакцій фіто- та зоокомпонента (12 червня – 10 липня); III – *високий рівень продукційно-деструкційних процесів* (11 липня – 10 серпня); IV – *повернення до регіонального рівня* (11–31 серпня).

Список використаних джерел

1. Амброз А.И. Рыбы Днепра, Южного Буга и Днепро-Бугского лимана. Киев : Изд-во АН УССР, 1956. 407 с.
2. Афанасьев С.О. Про екологічні наслідки руйнування греблі Каховської ГЕС: Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 6 вересня 2023 року. *Вісник НАН України*. 2023. Т. 11. С. 71–80.
3. Брянцева Ю.В., Лях А.М., Сергеева А.В. Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря. Севастополь : Институт биологии южных морей НАН Украины, 2005. 25 с. (Препринт. НАН Украины, Институт биологии южных морей).
4. Воробьева Л.В. Мейобентос украинского шельфа Черного и Азовского морей. Киев : Наукова думка, 1999. 300 с.
5. Гусяков Н.Е. Микрофитобентос. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / под ред. А.В. Цыбань. Л. : Гидрометеиздат, 1980. С. 166–170.
6. ДСТУ 4173-2003. Якість води. Визначання гострої летальної токсичності на *Daphnia magna* Straus та *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD). Київ : Держстандарт України, 2004. 17 с.
7. ДСТУ ISO 5667-9: 2005. Якість води. Відбирання проб. Частина 9. Настанови щодо відбирання

- проб морської води (ISO 5667-9: 1992, IDT). Київ : Держстандарт України, 2006. 9 с.
8. Еременко Т.И. Макрофитобентос. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / под ред. А.В. Цыбань. Л. : Гидрометеиздат, 1980. С. 170–177.
9. Закономірності формування продукційного потенціалу Азово-Чорноморських екосистем під впливом природних та антропогенних змін : науковий звіт фундаментальних досліджень / В.О. Демченко та ін. ДУ «ІМБ НАН України», Одеса, 2021. 201 с.
10. Марикультура мидий на Чёрном море / Ред. В.Н. Иванов. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. 314 с.
11. Миничева Г.Г. Морфофункциональные аспекты разнообразия формы тела водорослей. *Альгология*. 1997. Т. 7, № 3. С. 241–250.
12. Миничева Г.Г., Зотов А.Б., Косенко М.Н. Методические рекомендации по определению морфофункциональных показателей одноклеточных и многоклеточных форм водной растительности. Одесса : ЦНТЕП ООН, 2003. 32 с.
13. Мінічева Г.Г., Соколов Є.В., Гаркуша О.П., Сон М.О., Большаков В.М., Богатова Ю.І., Бондаренко О.С., Сильбогуб І.А. Вплив воєнних дій на морські екосистеми України. *Євроінтеграція екологічної політики України* : матеріали 5 Всеукр. наук.-практ. конф., м. Одеса, 23 жовтня 2023 р. Одеса, 2023. С. 60–64.
14. Оценка влияния берегозащитного и противооползневоего строительства в г. Одессе на экосистему береговой зоны и побережья : Отчет о НИР / ОФИНБИОМ НАН Украины; шифр темы: 7/90. Одесса, 1994. 123 с.
15. Промова Міністра Руслана Стрільця на офіційній робочій зустрічі Міністрів довілля Європейського Союзу на засіданні Ради країн ЄС з довілля. / Міністерство захисту довілля та природних ресурсів України : вебсайт. URL: <https://merp.gov.ua>.
16. Реєстр гідротехнічних споруд України, ДП «АМПУ». URL: <https://www.uspa.gov.ua/reyestr-gts> (дата звернення: 18.10.2023).
17. Руководство по химическому анализу морских вод. С.-П. : Гидрометеиздат, 1993. 263 с.
18. Цыбань А.В. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений. Л. : Гидрометеиздат, 1980. 190 с.
19. Численко Л.Л. Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела. М. : Наука, 1968. 105 с.
20. Alexandrov B., Arashkevich E., Gubanova A., Korshenko A. Black Sea Monitoring Guidelines Meso zooplankton. EMBLAS. Project Activity 3: October 2014. 31 p.
21. Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. *Living Planet Symposium*. 2016. Vol. 740. P. 54.
22. CMS. Copernicus Marine Service – CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), 2023. URL: <https://marine.copernicus.eu/> (дата звернення: 18.10.2023).
23. Guiry M.D, Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <http://www.algaebase.org> (дата звернення: 18.10.2023).
24. Kajiyama T., D’Alimonte D., Zibordi G. Algorithms merging for the determination of chlorophyll-a concentration in the Black sea. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018. Vol. 16(5). P. 677–681.
25. Minicheva G.G., Zotov A.B., Kalashnik E.S. Comparison of «bloom» and fire on the example of algaesystem phytoplankton-macrophytes. *International Journal on Algae*. 2014. 16 (3). P. 263–270.
26. Moncheva S., Parr B. Manual for phytoplankton sampling and analysis in the Black Sea. Istanbul. Turkey, 2010. 68 p.
27. Open Geospatial Consortium. URL: <https://emodnet.ec.europa.eu/en/emodnet-web-service-documentation#data-download-services> (дата звернення: 18.10.2023).
28. Pereira P., Zhao W., Symochko L., Inacio M., Bogunovic I., Barcelo D. The Russian-Ukrainian armed conflict impact will push back the sustainable development goals. *Geography and Sustainability*. 2022. Vol. 3(3). P. 277–287.
29. Sonntag B., Posch T., Psenner R. Comparison of three methods for determining flagellate abundance, cell size, and biovolume in cultures and natural freshwater samples. *Archiv für Hydrobiologie*. 2000. Vol. 149(2). Pp. 337–351.
30. Sousa R.G., Silva J.P.D., Douda K., Mammola S. The cost of war for biodiversity: a potential ecocide in Ukraine. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2022. Vol. 20(7). P. 394–396.
31. Tuchkovenko Y.S., Kushnir D.V., Ovcharuk V.A., Sokolov A.V., Komorin V.N. Characteristics of Black Sea dispersion of freshened and polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary after destruction of the Kakhovka Reservoir dam. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2023. Vol. 32. P. 95–114.
32. Vincx M. Meiofauna in marine and freshwater sediments. *Methods for the examination of organismal diversity in soils and sediments* / in ed. Hall G.S. Cambridge : University Press, 1996. Pp. 187–195.
33. Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Olynyk Y., Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water international*. 2023. Vol. 48(5). P. 631–647.
34. Wieser W. Die Beziehung zwischen Mundhöhlengestalt, Ernährungsweise und Vorkommen bei freilebenden marinen Nematoden. *Arkiv für Zoologi*. 1953. 4(2). Pp. 439–484.
35. World Register of Marine Species. URL: <https://www.marinespecies.org> (дата звернення: 18.10.2023).

References

- Ambrose, A.I. (1956). *Ryby Dnepra, Yuzhnogo Buga i Dneprovsko-Bugskogo limana [Fishes of the Dnieper, Southern Bug and Dnieper-Bug estuary]*. Kyiv: Publishing house AN USSR [in Russian].
- Afanasyev, S.O. (2023). Pro ekolohichni naslidky ruynuvannya hrebli Kakhovs'koyi HES: Stenohrama dopovidi na zasidanni Prezydiyi NAN Ukrayiny 6 veresnya 2023 roku [About the ecological consequences of the destruction of the Kakhovska HPP dam]. *Visnyk NAN Ukrayiny – Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine, 11*, 71–80 [in Ukrainian].
- Bryantseva, Yu.V., Lyakh, A.M., & Sergeyeva, A.V. (2005). Raschet ob'yemov i ploshchadey poverkhnosti odnokletochnykh vodorosley Chernogo moray [Calculation of volumes and surface areas of unicellular algae of the Black Sea]. Sevastopol': Institut biologii yuzhnykh morey NAN Ukrainy [in Russian].
- Vorobyova, L.V. (1999). *Meyobentos ukrainskogo shel'fa Chernogo i Azovskogo morey [Meiobenthos of the Ukrainian shelf of the Black and Azov seas]*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
- Gusliakov, N.E. (1980). *Mikrofitobentos. Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoi vody i donnykh otlozhenii [Microphytobenthos. Guide to Methods for the Biological Analysis of Seawater and Bottom Sediments]*. A.V. Cibán (Ed.). L.: Gidrometeoizdat [in Russian].
- Yakist' vody. Vyznachannya hostroyi letal'noyi toksychnosti na *Daphnia magna* Straus ta *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD) [Water quality. Determination of acute lethal toxicity to *Daphnia magna* Straus and *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD)]. (2004). *DSTU 4173-2003*. Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny [in Ukrainian].
- Yakist' vody. Vidbyrannya prob. Chastyna 9. Nastanovy shchodo vidbyrannya prob mors'koyi vody (ISO 5667-9: 1992, IDT) [Water quality. Sampling of samples. Part 9: Guidelines for seawater sampling (ISO 5667-9: 1992, IDT)]. (2006). *DSTU ISO 5667-9: 2005*. Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny [in Ukrainian].
- Eremenko, T.I. (1980). *Makrofitobentos. Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoi vody i donnykh otlozhenii [Macrophytobenthos. Guide to Methods for the Biological Analysis of Seawater and Bottom Sediments]*. A.V. Cibán (Ed.). L.: Gidrometeoizdat [in Russian].
- Demchenko, V.O. et al. (2021). *Zakonomirnosti formuvannya produktsiynoho potentsialu Azovo-Chornomors'kykh ekosystem pid vplyvom pryrodnykh ta antropohennykh zmin: naukovyy zvit fundamentalnykh doslidzhen [Patterns of formation of the productive potential of the Azov-Black Sea ecosystems under the influence of natural and anthropogenic changes: scientific report of fundamental research]*. State Institution «IMB NAS of Ukraine» [in Ukrainian].
- Ivanov, V.N. (Ed). (2007). *Marikul'tura midiy na Chornom more [Mussel mariculture in the Black Sea]*. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics [in Russian].
- Minicheva, G.G. (1997). Morfofunktsional'nyye aspekty raznoobraziya formy tela vodorosley [Morphofunctional aspects of body shape diversity in algae]. *Al'gologiya – Algology, 7(3)*, 241–250 [in Russian].
- Minicheva, G.G., Zotov, A.B. & Kosenko, M.N. (2003). *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniiu morfofunktsionalnykh pokazatelei odnokletochnykh i mnogokletochnykh form vodnoi rastitelnosti [Methodical recommendations on the morpho-functional indexes define for unicellular and multicellular forms of aquatic vegetation]*. Odessa: CNTEPI ONYUA [in Russian].
- Minicheva, H.H., Sokolov, YE.V, Harkusha, O.P., Son, M.O., Bol'shakov, V.M., Bohatova, Yu.I. et al. (2023). Vplyv voyennykh diy na mors'ki ekosystemy Ukrayiny [The impact of military actions on marine ecosystems of Ukraine]. Proceedings from: 5 *Vseukrayins'ka naukovo-praktychna konferentsiya «Yevointehratsiya ekolohichnoyi polityky Ukrayiny» – 5 All-Ukrainian scientific and practical conference “European integration of environmental policy of Ukraine”*. Pp. 60–64. Odesa [in Ukrainian].
- Odesa Branch of the Institute of Biology of the Southern Seas. (1994). *Otsenka vliyaniya beregozashchitnogo i protivopopolznevogo stroitel'stva v g. Odesse na ekosistemu beregovoy zony i poberezh'ya [Assessment of the impact of coastal protection and landslide-resistant construction in Odesa on the ecosystem of the coastal zone and coast]*. (subject code: 7/90) [in Russian].
- Promova Ministra Ruslana Stril'tsya na ofitsiyniy robochiy zustrichi Ministriv dokilliya Yevropeys'koho Soyuzu na zasidanni Narady krayin YES z dokilliya. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua> [in Ukrainian].
- Reyestr hidrotekhnichnykh sporud Ukrayiny [Register of Hydraulic Structures of Ukraine]. Retrieved from: <https://www.uspa.gov.ua/reyestr-gts> [in Ukrainian].
- Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh vod [Manual on chemical analysis of sea waters]*. (1993). St.-P.: Gidrometeoizdat [in Russian].
- Tsyban, A.V. (1980). *Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoy vody i donnykh otlozheniy [Manual on methods of biological analysis of sea water and bottom sediments]*. L.: Gidrometeoizdat [in Russian].
- Chislenko, L.L. (1968). *Nomogrammy dlya opredeleniya vesa vodnykh organizmov po razmeram i forme tela [Nomograms for determining the weight of aquatic organisms by body size and shape]*. M.: Nauka [in Russian].
- Alexandrov, B., Arashkevich, E., Gubanova, A., Korshenko, A. (2014). Black Sea Monitoring Guidelines Meso-zooplankton. EMBLAS. Project Activity 3.
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Kerstin, S., Embacher, S., & Ruescas A. (2016). Evolution of the C2RCC

neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. *Living Planet Symposium*, 740, 54.

22. CMS. Copernicus Marine Service – CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Retrieved from: <https://marine.copernicus.eu>.

23. Guiry, M.D., & Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Retrieved from: <http://www.algaebase.org>.

24. Kajiyama, T., D'Alimonte, D., & Zibordi, G. (2018). Algorithms merging for the determination of chlorophyll-a concentration in the Black sea. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(5), 677–681.

25. Minicheva, G.G., Zotov, A.B., & Kalashnik, E.S. (2014). Comparison of “bloom” and fire on the example of algae system phytoplankton-macrophytes. *International Journal on Algae*, 16(3), 263–270.

26. Moncheva, S., & Parr, B. (2010). Manual for phytoplankton sampling and analysis in the Black Sea. Istanbul.

27. Open Geospatial Consortium. Retrieved from: <https://emodnet.ec.europa.eu/en/emodnet-web-service-documentation#data-download-services>.

28. Pereira, P., Zhao, W., Symochko, L., Inacio, M., Bogunovic, I., & Barcelo D. (2022). The Russian-Ukrainian armed conflict impact will push back the sustainable development goals. *Geography and Sustainability*, 3(3), 277–287.

29. Sonntag, B., Posch, T., & Psenner, R. (2000). Comparison of three methods for determining flagellate abundance, cell size, and biovolume in cultures and natural freshwater samples. *Archiv für Hydrobiologie*, 149(2), 337–351.

30. Sousa, R.G., Silva, J.P.D., Douda, K., & Mammola, S. (2022). The cost of war for biodiversity: a potential ecocide in Ukraine. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(7), 394–396.

31. Tuchkovenko, Y.S., Kushnir, D.V., Ovcharuk, V.A., Sokolov, A.V., & Komorin, V.N. (2023). Characteristics of Black Sea dispersion of freshened and polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary after destruction of the Kakhovka Reservoir dam. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 32, 95–114.

32. Vincx, M. (1996). Meiofauna in marine and freshwater sediments. *Methods for the examination of organismal diversity in soils and sediments*, pp. 187–195. Cambridge: University Press.

33. Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Olynyk, Y., & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water international*, 48(5), 631–647.

34. Wieser, W. (1953). Die Beziehung zwischen Mundhöhlengestalt, Ernährungsweise und Vorkommen bei freilebenden marinen Nematoden. *Arkiv für Zoologi*, 4(2), 439–484.

35. World Register of Marine Species. Retrieved from: <https://www.marinespecies.org>.

REACTION OF THE MARINE ECOSYSTEM TO THE CONSEQUENCES OF DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DAM

Minicheva G.G., Corr. member of NAS of Ukraine, Dr. Sci., Senior Researcher, **Bondarenko O.S.**, PhD, **Bogatova Yu.I.**, PhD, Senior Researcher, **Bolshakov V.M.**, PhD, Senior Researcher, **Bushuiev S.G.**, PhD, **Garkusha O.P.**, PhD, **Dyatlov S.Ye.**, PhD, Docent, **Kalashnik E.S.**, PhD, **Koshelev O.V.**, PhD, **Kudrenko S.A.**, PhD, **Kulakova I.I.**, PhD, Senior Researcher, **Marinets A.V.**, Junior Researcher, **Migas R.V.**, Junior Researcher, **Martynyuk M.O.**, PhD, **Nikonova S.Ye.**, Junior Researcher, **Rybalko O.A.**, Junior Researcher, **Synyogub I.O.**, Senior Researcher, **Sokolov Ye.V.**, PhD, **Stadnichenko S.V.**, PhD, Senior Researcher, **Khutornoi S.O.**, PhD, **Vinogradov O.K.**, Dr. Sci., Senior Scientist, **Kvach Yu.V.**, Dr. Sci., Senior Researcher, **Demchenko V.O.**, Dr. Sci., Senior Researcher, **Son M.O.**, Dr. Sci. Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine, minicheva@ukr.net

The paper presents the results of the research of the Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine on the impact of the consequences of the destruction of the Kakhovka Reservoir dam on the ecosystem of the Black Sea shelf of Ukraine. Expeditionary research was conducted in June–August 2023 at 11 sampling sites of the sea coast from the village of Koblevo to Cape Velykyi Fontan. The hydrological and hydrochemical parameters, water toxicity, the state of biotic communities (microsammon, meiobenthos, macrozoobenthos, phytobenthos, phytoplankton, zooplankton) and aquatic bioresources were analysed. Satellite data was used to obtain chlorophyll a concentration. To assess the extent of the ecosystem’s response to the effects of the Kakhovka Reservoir’s water intrusion, for the abiotic and biotic components, anomalies were identified, which were calculated as the percentage deviation of the indicator value in the period June–August 2023. from the regional norm for the specified period. The “explosive” phase of the impact lasted about three months from the onset of the disaster on 6 June 2023. In August 2023, most indicators returned to the regional average. The discharge of the Kakhovka Reservoir waters into the marine ecosystem resulted in desalination of the sea on the Odesa coast to 3.95‰, a decrease in the oxygen saturation of the sea surface layer by less than 75%, an increase in the concentration of ammonium nitrogen to 13.8 threshold limit value and the occurrence of acute lethal toxicity. An increase in the concentration of chlorophyll a and the blooming of blue-green planktonic algae were recorded. In the bottom communities, the development of macrophytobenthos was suppressed, abnormal changes

in the values of macrophyte surface indices, and significant changes in the structure of zooplankton communities were observed. The deaths of freshwater fish species that got into the sea waters and the massive death of the Black Sea mussel in the amount of about 105 million individuals and 3.7 thousand tonnes of biomass were noted. A generalised assessment of the abiotic and biotic indicators anomalies during the first three months of the “explosive” phase allowed us to identify four stages: I – hydrological, hydrochemical and physical explosive impact, with priorities for significant anomalies in river flow and salinity reduction (6–11 June); II – explosive biota reaction with priorities for acute reactions of the phyto- and zoocomponents (12 June – 10 July); III – high level of production and destruction processes (11 July – 10 August); IV – return to the regional level (11–31 August).

Key words: military actions, Kakhovskaya HPP, Black Sea, disaster, abiotic indicators, biota, anomalies.