

УДК 551.468.4

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ В ЧОРНОМУ МОРІ РОЗПРІСНЕНИХ І ЗАБРУДНЕНИХ ПЕРЕХІДНИХ ВОД З ДНІПРОВСЬКО-БУЗЬКОГО ЛИМАНУ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Ю. С. Тучковенко^{1,2}, Д. В. Кушнір¹, В. А. Овчарук¹, А. В. Соколов³, В. М. Коморін⁴

¹Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
science@odeku.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

²Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine,
37 Pushkinska Str., Odesa, 65048, Ukraine.

³Національний центр управління та випробувань космічних засобів,
Україна, mriya1space@gmail.com

⁴НДУ «Український науковий центр екології моря»,
Французький бульв. 89, 65009, Одеса, Україна, vkomorin@gmail.com

В роботі досліджено особливості розповсюдження в північно-західній частині Чорного моря (ПнЗЧМ) великих обсягів розпріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, які надійшли до нього в результаті руйнування греблі Каховської ГЕС у червні 2023 р. За період з 06.06.2023 до 12.06.2023 з Каховського водосховища до Дніпровсько-Бузького лиману, а потім до моря надійшло 14,4 км³ води, що становить 27 % від загального об'єму середнього річного природного стоку Дніпра (53,5 км³). В перші дні після руйнування греблі витрати води через отвір в ній дорівнювали 40-50 тис. м³/с. З цими водами до моря надійшло багато різнотипних забруднювальних речовин, які містились у водах Каховського водосховища, донних відкладах, були змиті із затоплених територій пониззя Дніпра (більше 2000 га).

Аналіз особливостей розповсюдження було здійснено із використанням супутникових знімків кольору поверхні моря, концентрації хлорофілу-а, а також результатів гідродинамічного моделювання із використанням 3-D варіанта чисельної гідродинамічної моделі Delft3D-Flow Flexible Mesh. Встановлено, що шлейф розпріснених і забруднених вод спочатку розповсюджувався в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі ПнЗЧМ у напрямку узбережжя міста Одеса, якого він досяг 9-10 червня 2023 р. Потім шлейф почав поширюватись уздовж західного узбережжя і 14 червня 2023 року досяг району розташування Тузлівських лиманів. У подальшому відбувалося розмивання витягнутого уздовж узбережжя відносно вузького шлейфу розпріснених вод у бік відкритого моря у вигляді «язиків», які утворилися в районах підняття морського дна. Моделювання розповсюдження консервативної домішки нейтральної плавучості як трасера розповсюдження забруднення з перехідними водами з Дніпровсько-Бузького лиману показало, що тільки за рахунок гідродинамічного розведення відбувається зменшення рівня забруднення до 60 % (від рівня забруднення річкових вод в районі міста Херсон) в Одеському районі ПнЗЧМ та до 30 % - в акваторії Дунай-Дністровського межиріччя.

Вказані особливості визначалися циркуляцією вод, яка в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі моря в перші дні формувалась під впливом значних градієнтів рівня моря, викликаних надходженням великих обсягів опріснених перехідних вод через лиман і Кінбурнську протоку, а потім густинними течіями сформованими на гідрофронті між трансформованими річковими водами і оточуючими морськими. Вплив вітрових умов проявлявся у характері поширення на акваторії ПнЗЧМ шлейфу розпріснених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, положенні і конфігурації гідрофронту. Вітрові течії хоча і не були домінуючими, але впливали на динаміку вод і розподіл концентрацій домішки, наприклад хлорофілу-а, в межах шлейфу розпріснення, оконтуреного гідрофронтом, сприяли проникненню трансформованих річкових вод у бік Одеси уздовж прибережного мілководдя.

Ключові слова: руйнування греблі; Каховське водосховище; Чорне море; північно-західна частина; розповсюдження перехідних вод; супутникові дані; моделювання.

1 ВСТУП

Чорне море – є унікальною водоймою, яка характеризується високим вмістом сірководню (біля 87% свого об'єму) та обмеженим кисневим шаром поверхневих вод, який є придатним для існування аеробних організмів. Останніми десятиліттями спостерігається зменшення товщини цього шару в центральних районах Чорного моря до 60 метрів [1]. Безумовно процеси, що проходять в глибоководній зоні моря та на шельфі, взаємопов'язані. Збереження стійкості морських екосистем є предметом занепокоєння в контексті дії потужних зовнішніх факторів впливу, як антропогенного, так і природного походження [2].

Акт екоциду, здійснений російською федерацією через підлив дамби Каховської ГЕС 6 червня 2023 року, класифікується як наймасштабніша антропогенна катастрофа в Європі за останні три десятиріччя і має значний вплив на природне середовище, включно з Чорним морем [3].

Навіть у мирний час, антропогенні виклики Чорного моря найбільш виражені в прибережних та шельфових зонах, де зосереджено економічну діяльність та знаходиться більшість морських джерел забруднення. Проте руйнівний вплив воєнних дій може значно погіршити ці проблеми.

У світлі зростаючого антропогенного навантаження, змін клімату та природних катаклізмів, одним із пріоритетних напрямків дослідження морських екосистем стає математичне моделювання, яке спрямоване на розв'язання завдань оцінювання, діагностування та прогнозування екосистемних ризиків моря [4].

Екологічний стан та якість морських вод в Дунай-Дніпровському межиріччі повністю визначаються характеристиками стоку річок Дунай (Кілійське гирло), Дністер, Дніпро та Південний Буг, які впадають в український сектор північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ). Річковий стік є головним джерелом антропогенного забруднення цієї частини Чорного моря [5, 6]. Під його впливом розвиваються такі негативні екосистемні процеси як «цвітіння» води влітку в результаті спалахів розвитку фітопланктону, включно з токсичними для гідробіонтів ціанобактеріями, систематичний розвиток гіпоксійних і аноксійних зон в придонному шарі акваторії, які призводять до загибелі морських біоресурсів. Північна частина ПнЗЧМ знаходиться під

домінуючим впливом стоку Дніпра (середній річний об'єм стоку близько 53,5 км³/рік, середньорічна витрата 1700 м³/с) і, меншою мірою, Південного Бугу (3,4 км³/рік, 108 м³/с), які надходять до моря з Дніпровсько-Бузького лиману. У зв'язку з цим, цей район отримав назву Дніпровсько-Бузького пригирлового.

Особливості розповсюдження перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману на акваторії ПнЗЧМ описані, зокрема, в роботі [7]. При виході з Дніпровсько-Бузького лиману річкові води розтікаються тонким шаром по поверхні моря у вигляді плюму (шлейфу), який, залежно від вітру, може бути орієнтований у двох напрямках. У першому варіанті, при домінуванні північних та північно-західних вітрів, вісь шлейфу спрямована на південний захід і опріснення морських вод у берегів Одеси не відбувається. Солоність вод в Одеському районі ПнЗЧМ в цьому випадку знаходиться у звичайних межах 14-16 ‰. У другому варіанті розтікання, що досить часто спостерігається, річковий плюм розпрісненої води простягається на захід над Одеською банкою і уздовж північного узбережжя ПнЗЧМ, досягаючи берегів Одеси і значно знижуючи солоність вод в поверхневому шарі. Як правило, цей випадок має місце у квітні – травні в період весняного водопілля на Дніпрі і Південному Бузі або під час літніх дощових паводків, за сильних південно-східних та східних вітрів, коли за даними гідрометстанції Одеса-порт солоність знижується до 10 - 12 ‰, а у виняткових випадках і до 2 ‰ [8]. Окрім зазначених варіантів, річкові води при виході з лиману можуть розтікатися віялоподібно. У таких випадках потік від Кінбурнської протоки розходить по поверхні моря радіально і досить швидко згасає, перехідні лиманні води за солоністю швидко трансформуються в морські. Довжина зони трансформації річкових вод не перевищує двох десятків кілометрів, і солоність води в Одеському регіоні ПнЗЧМ не знижується [9].

Як правило, з річковими водами на акваторію Дніпровсько-Бузької пригирлової ділянки ПнЗЧМ надходить значна кількість біогенних та органічних речовин. Тому проникнення шлейфу трансформованих річкових вод до Одеського району сприяє зростанню продукції і біомаси фітопланктону та зростанню ролі прісноводних видів у її створенні. Зазвичай області шлейфу відносно опріснених перехідних вод

відповідають високим концентраціям хлорофілу-а та біомаси фітопланктону.

Каховське водосховище було крайньою нижньою сходинкою каскаду Дніпровських водосховищ, якими повністю зарегульований природний стік Дніпра. Будівництво Каховського гідровузла розпочалося у вересні 1950 р., в 1955 році відбувся пуск першого гідроагрегату, а в жовтні 1956 р. був введений в експлуатацію останній, шостий гідроагрегат Каховської гідроелектростанції (ГЕС). В результаті будівництва сформувалося Каховське водосховище (рис.1), яке забезпечувало станцію водою, та з'явилося місто Нова Каховка [10].

Офіційною метою створення водосховища було забезпечення високих і стійких врожаїв сільськогосподарських культур у південних посушливих районах України та північних районах Криму, але дійсною метою створення великої водойми на півдні України було

впровадження практики вирощування хлопку [11] та розвиток хлопкової промисловості з центром у Херсоні. Однак цим планам не судилося здійснитись, зокрема, через недостатню кількість сонячної радіації. В 2006 році в пресі [12] з'явилися дані, що ще під час будівництва каскад Дніпровських водосховищ розглядався і у військовому аспекті – як водний бар'єр на випадок військового конфлікту. Дійсно, у наш час, в ході агресії російської федерації проти України, Нижній Дніпро і Каховське водосховище стали потужним водним бар'єром на шляху просування агресора в південно-західні області України.

До руйнації греблі Каховське водосховище здійснювало сезонне регулювання стоку і було найбільшим за об'ємом серед Дніпровського каскаду. Основні характеристики водосховища представлені в таблиці 1.

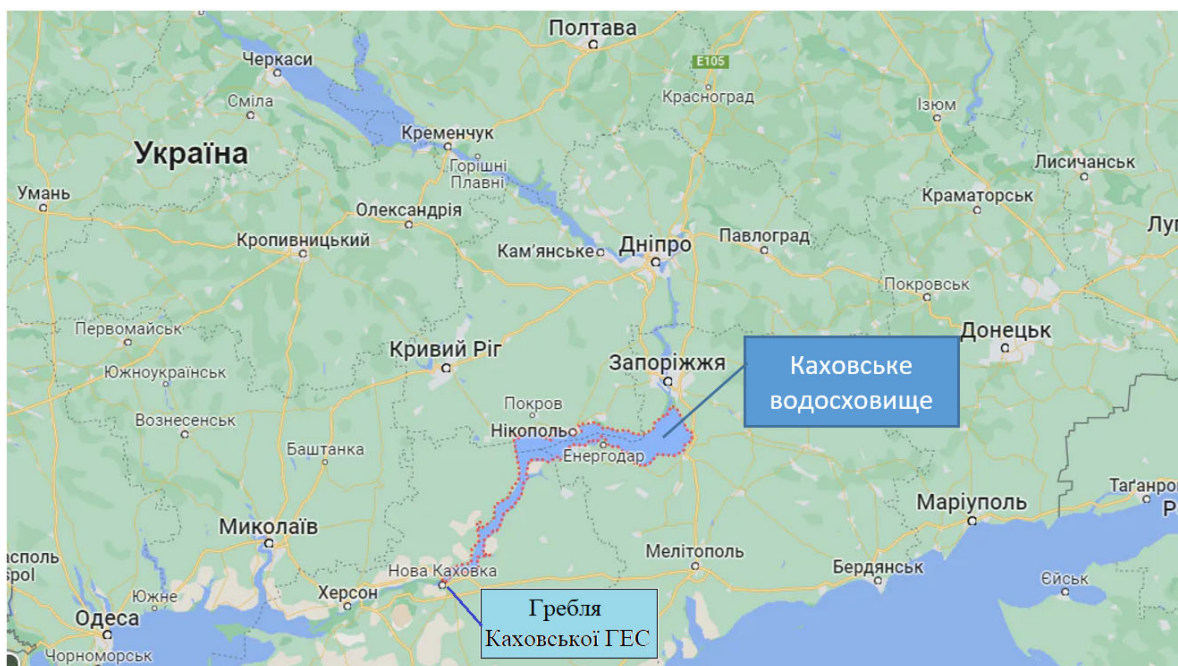


Рис. 1 – Фізико-географічне положення Каховського водосховища та греблі Каховської ГЕС
Fig. 1 – Map of location of the Kakhovka Reservoir and the Kakhovka HPP dam

Таблиця 1- Морфометричні характеристики Каховського водосховища [13]
Table 1 - Morphometric characteristics of the Kakhovka Reservoir [13]

Нормальний підпертий рівень (НПР), м	Рівень мертвого об'єму, (РМО), м	Форсований підпертий рівень (ФПР), м	Площа при НПР, км ²	Об'єм при НПР, км ³	Середня ширина, км	Середня глибина, м	Площа водозбору, тис.км ²
16,0	12,7	18,0	2155	18,18	9,3	8,5	482



Рис. 2 – Гребля Каховської ГЕС до (а), в момент прориву (б) та після (в) її руйнування
Fig. 2 – The dam of the Kakhovka HPP before (a), at the time of breakthrough (b) and after (c) its destruction

На Каховському водосховищі були розміщені водозабори великих комплексних каналів, які склали Каховський водогосподарський комплекс: Дніпро – Кривий Ріг, Верхне-Рогачинський, Каховський, Північно-Кримський. Загальна витрата водозаборів цих каналів досягала $900 \text{ м}^3/\text{с}$. Після корегування планових завдань Каховське водосховище використовувалось в цілях гідроенергетики, водозабезпечення, зрошення, рибальства та судноплавства. Тим не менш, увесь час його функціонування існували дві протилежні точки зору щодо Каховського гідровузла і всього Дніпровського каскаду. Одні віддавали перевагу природному і саморегульованому стану екосистеми Дніпра, інші – потенційним можливостям каскаду водосховищ, не зважаючи на необхідність їх постійної реконструкції, витрачання значних фінансових ресурсів, негативний вплив на навколишнє природне середовище [11].

6 червня 2023 року близько 2:50 ночі (за місцевим часом UTC+3) російські окупаційні війська підірвали греблю Каховської гідроелектростанції. Крізь утворений у греблі отвір шириною близько 170 м, вода з Каховського водосховища ринула вниз за течією Дніпра затоплюючи величезні терени пониззя річки. У подальшому, через підмив стрімким потоком води вцілілих споруд греблі, отвір

збільшився до 300-350 метрів (при загальній ширині греблі із затворами - 447 метрів) (рис. 2).

2 ГІДРОЛОГІЧНА СИТУАЦІЯ ПІСЛЯ ПРОРИВУ ГРЕБЛІ ВНАСЛІДОК ЇЇ РУЙНУВАННЯ

В результаті інтенсивного витоку води з резервуару Каховського водосховища через отвір у греблі, станом на 12.06.2023 р. у пониззя Дніпра надійшло $14,4 \text{ км}^3$ води, що становило 72 % від об'єму вод накопичених у водосховищі до моменту руйнування греблі (рис. 3.а). Для порівняння, це складає 27 % від загального об'єму середнього річного природного стоку Дніпра ($53,5 \text{ км}^3$). За приблизними оцінками, в перші дні після руйнування греблі витрати води через отвір в ній дорівнювали 40-50 тис. $\text{м}^3/\text{с}$.

За даними супутникових знімків, внаслідок стрімкого витоку води з Каховського водосховища загалом було затоплено 612 км^2 території ($554,6 \text{ км}^2$ в межах Херсонській області і $57,8 \text{ км}^2$ - в Миколаївській). Станом на ранок 8 червня рівень води в пониззі річки Дніпро за даними гідрологічного поста “Херсон” підвищився на 5,37 метрів (порівно з рівнем на 20 годину 5 червня) і досяг максимальної відмітки 5,68 м БС (рис. 3.б). У зоні затоплення (рис. 4) опинилися близько 80 населених пунктів в межах Херсонської та Миколаївської областей

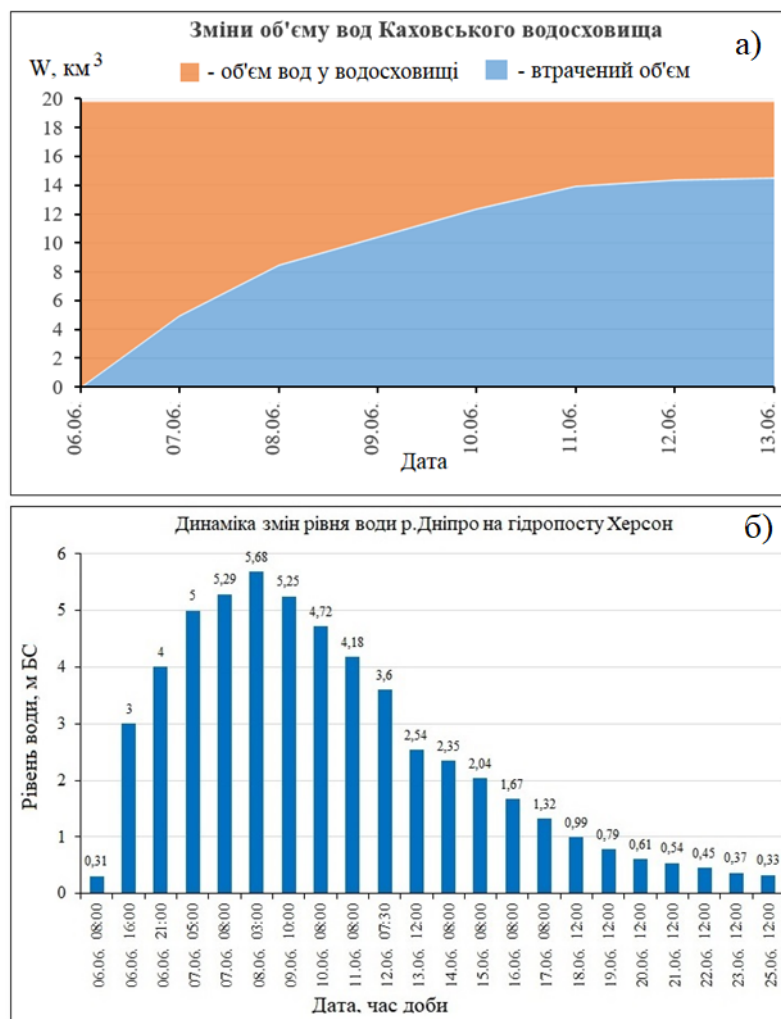


Рис. 3 – Динаміка змін об'єму вод Каховського водосховища, в км³, (а) та рівня води на гідропосту Херсон (б)
Fig. 3 – Dynamics of changes in the water volume of the Kakhovka Reservoir, km³, (a) and the water level at the Kherson WGS (b)

(49 та 31 населений пункт, відповідно) та близько 40 тисяч людей. Зокрема, станом на 7-8 червня були затоплені 31,5 км² на території міста Херсон (загальна площа міської території - 166,6 км²), 32,8 з 56,9 км² території міста Олешки, 14,32 з 26,3 км² території міста Гола Пристань [14].

В зону затоплення потрапили промислові майданчики, близько двадцяти АЗС, декілька нафтобаз, каналізаційні насосні станції, вигрібні ями будинків приватного сектору, декілька кладовищ, скотомогильників, земельні ділянки приватних дачних садиб та сільськогосподарські угіддя (1300 га в межах Херсонської області і 750 га – в Миколаївській). З 9 червня 2023 року рівень вод у пониззі Дніпра почав поступово зменшуватись в результаті витoku води з Дніпровсько-Бузького лиману через Кінбурнську протоку до моря. Станом на 10-11

червня 2023 року загальна площа затоплених територій зменшилась майже вдвічі – до 309 км².

Із затоплених територій, у тому числі міст і населених пунктів, були змиті і, у кінцевому рахунку, потрапили до моря паливно-мастильні матеріали (нафтові вуглеводні), пестициди та інші небезпечні хімічні речовини - з місць їх зберігання, сполуки важких металів, включно з тими, що надходили з викидами промислових підприємств міст Запоріжжя, Дніпро і десятиліттями накопичувались у донних відкладах Каховського водосховища, рештки прісноводної рослинності та трупи загинлих свійських та диких тварин.

Метою роботи є аналіз особливостей розповсюдження в морі забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману після руйнування греблі Каховського водосховища та

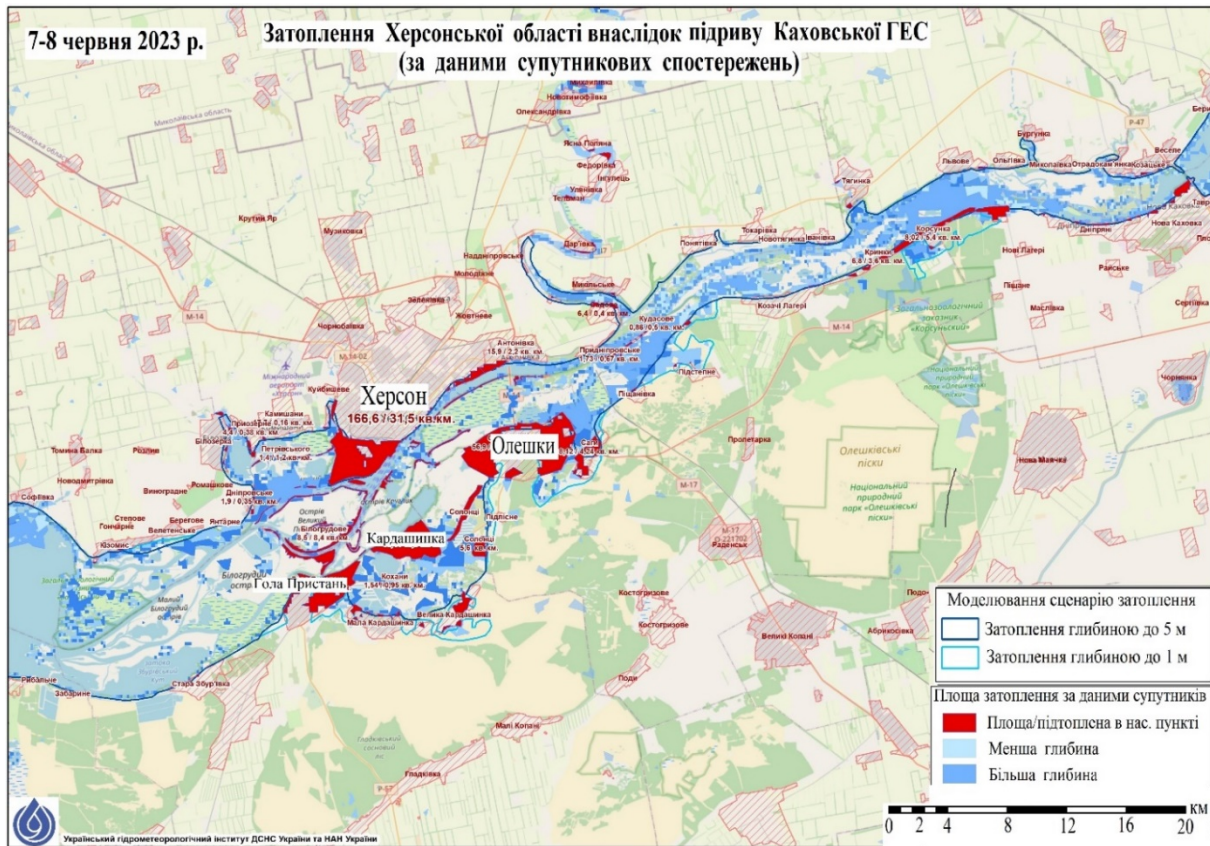


Рис. 4 – Території Херсонської області затоплені внаслідок підриву греблі Каховської ГЕС станом на 7-8 червня 2023 року [14]

Fig. 4 – The territories of the Kherson region that are flooded as a result of the explosion of the Kakhovka HPP dam on June 7-8, 2023 [14]

їхнього впливу на екологічну ситуацію в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі.

Представлена робота доповнює матеріали і висновки, основані на їх аналізі, приведені у вже опублікованих роботах [3, 15].

3 МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ

В роботі використані дані оброблених супутникових знімків кольору поверхні моря за даними багатоканальної зйомки радіометром MODIS з супутників Aqua, Terra, радіометром VIIRS з супутників Suomi NPP та NOAA-20 розміщених на інтернет-ресурсі [16].

Для візуалізації просторової мінливості концентрації хлорофілу-а (пігменту фітопланктону) в ПнЗЧМ використано набір даних 2 рівня OL_2_WRF, продукт CHL_NN, з космічного апарату SENTINEL-3B OLCI з повною роздільною здатністю 300 м. Концентрація хлорофілу-а розраховувалась автоматично алгоритмом нейронної мережі.

Характеристика часової динаміки окремих гідрохімічних показників екологічного стану морської води біля узбережжя м.Одеси (пляж Ланжерон) після руйнування греблі Каховської ГЕС виконувалась за даними моніторингу Державної екологічної інспекції Південно-Західного округу [17]. Модельні розрахунки розповсюдження забруднених вод, які надходили з Дніпровського-Бузького лиману після руйнування греблі, на акваторії ПнЗЧМ виконувались із застосуванням чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM), розробленої науково-дослідним інститутом Deltares (Делфт, Нідерланди) [18]. Термін «flexible mesh» у назві програмного пакету вказує на можливість застосування під час розрахунків «гнучкої» комбінації неструктурних розрахункових сіток, що можуть складатися з елементів три-, чотири-, п'яти- та шестикутної форми.

Кінцево-різницеву апроксимацію рівнянь моделі здійснено на неструктурованій розрахунковій сітці. Сітка складається зі

з'єднаних гранями вузлів (вершин), що утворюють елементарні розрахункові осередки різної форми – від трикутників до гексагонів. Скалярні величини (солоність, температура води) задаються в центрах елементарних розрахункових осередків, а нормальні компоненти швидкості течій – на їхніх відповідних гранях. Центри розрахункових осередків визначаються як центри описаних кіл, які містять вузли (вершини) розрахункового осередку. В загальному випадку, у вертикальній площині модель D-Flow FM може застосовувати криволінійну σ -систему вертикальних координат, прямолінійну Z -систему або комбінацію цих двох систем.

Під час проведення розрахунків, часовий крок розв'язання рівнянь моделі визначається моделлю динамічно на підставі критерію стабільності Куранта-Фрідріхса-Леві у межах інтервалу, який задає користувач. Для моделювання наслідків прориву дамби

Каховської ГЕС була згенерована неструктурована розрахункова сітка (рис. 5а), яка складалась з 23128 вузлів (22494 розрахункових осередків). Сітка покриває всю акваторію Чорного та Азовського морів і містить область деталізації розрахунків для акваторії північно-західної частини Чорного моря (рис. 5б, в), що має криволінійну топологію та перемінний розмір розрахункових осередків. По вертикалі було задано 7 розрахункових рівнів в криволінійній σ -системі координат перемінної товщини (збільшується від поверхні до дна). Розрахунки виконувались для періоду 01.06.2023 р. – 30.06.2023 р. Початковий часовий крок розв'язання рівнянь моделі приймався рівним 1 секунді, максимальний – 30 секунд.

На верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавалися з часовою дискретністю 3 години, на рівномірній $0,25^\circ$ -градусній сітці перемінні у просторі поля

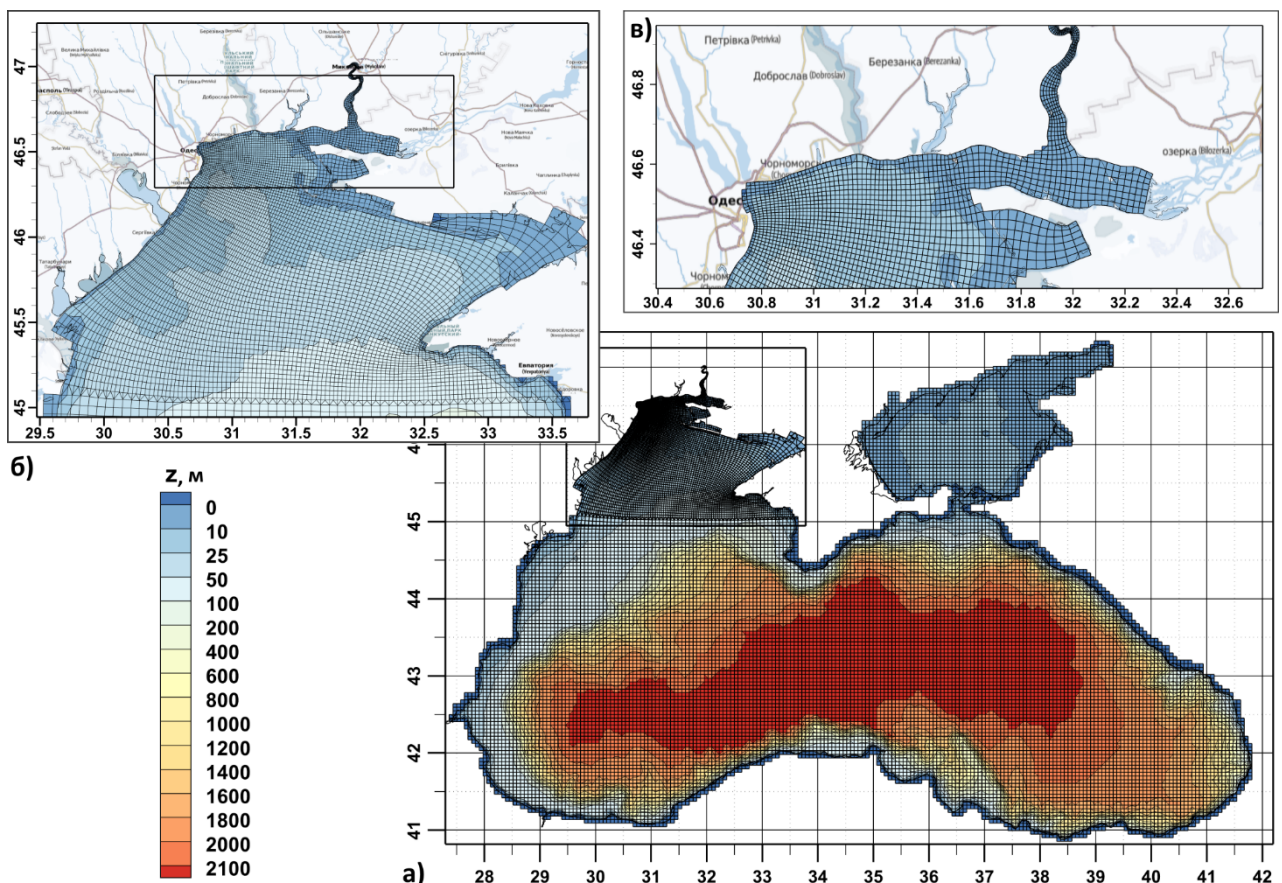


Рис. 5 – Розрахункова сітка, що використовується в моделі для Чорного моря (а, з глибинами), та деталізація цієї сітки для північно-західної частини Чорного моря (б) і Дніпровсько-Бузького пригирлового району (в)

Fig. 5 – The design grid used in the model for the Black Sea (a, with depths), and the detail of this grid for the northwestern part of the Black Sea (b) and the Dnipro-Bug estuarine region (c)

зональної та меридіональної компонент швидкості вітру, поле атмосферного тиску приведенного до середнього рівня моря, які були зчитані з архіву прогнозів глобальної моделі прогнозу погоди GFS через веб-сервіс NOMADS [19, 20].

На відкритій бічній границі моделі – у гирлі р. Дніпро, задавались коливання рівня води за даними гідропосту «Херсон» (рис. 3б). Мінливість температури річкової води задавалась на підставі інформації з гідрологічного посту «Київ» Центральної геофізичної обсерваторії. Мінералізація річкової води приймалась рівною 2 мг/дм^3 .

Початковий розподіл температури і солоності морської води, рівня моря задавався у вигляді неоднорідних полів розподілу цих величин, отриманих на підставі даних реаналізу Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS) з горизонтальним кроком $1/40^\circ$ [21].

Для верифікації результатів моделювання використовувались данні спостережень за мінливістю солоності води на морській гідрометеорологічній станції Одеса-порт.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Попереднє уявлення про характер розповсюдження забруднених річкових вод, які надходили до моря з Дніпровсько-Бузького лиману, можна отримати з супутникових знімків кольору поверхні моря (рис. 6). На них добре простежується динаміка розповсюдження факелу забруднених річкових вод, з високим вмістом зважених мінеральних і органічних речовин, які надходили до моря з Дніпровсько-Бузького лиману. Вже 8 червня 2023 року мешканці міста Южне, що входить до Одеської агломерації, почали спостерігати на поверхні моря велику кількість уламків дерев, плавучих островків з рогозу та іншої рослинності, побутового та будівельного сміття різних розмірів. 9 червня забруднені води з Дніпровсько-Бузького лиману досягли узбережжя м.Одеси і протягом декількох днів вся прибережна зона міста була вкрита побутовим і будівельним сміттям, рештками рослин (дерев, очерету та ін.) і тварин, мертвою рибою.

11 червня 2023 року шлейф брудної води, сформований зависсю піднятою водним потоком з дна Каховського водосховища і русла річки Дніпро, а також змитими з затоплених територій

грунтами з високим вмістом гумусу, органічними залишками господарсько-побутового походження, загиблої флори і фауни дельтової частини р. Дніпро, досяг виходу з Дністровського лиману.

Проникненню забруднених вод з Дніпровсько-Бузького лиману уздовж північного узбережжя північно-західної частини Чорного моря в її Одеський район сприяли помірні вітри східного та північно-східного напрямків, які домінували в нічний час з 8 по 9 червня (рис. 7). В світлу пору доби вітри значно слабшали і міняли свій напрямок, що призводило до розширення зони розпріснення (шлейфу).

Для уточнення особливостей розповсюдження розпріснених вод з Дніпровсько-Бузького лиману на акваторії ПнЗЧМ було виконано математичне моделювання течій і просторово-часової мінливості солоності вод в період з 05.06.2023р. до кінця червня. На рис. 8 зображена мінливість солоності вод в районі морського торговельного порту Одеса за результатами моделювання і даними спостережень. Видно, що модельні розрахунки задовільно узгоджуються зі спостереженими даними, що свідчить про адекватне відтворення моделлю характеру мінливості солоності вод в Одеському районі ПнЗЧМ.

Обрані результати розрахунків просторово-часової мінливості солоності вод в північно-західній частині Чорного моря і, зокрема, її Дніпровсько-Бузькому районі показані на рис. 9. Видно, що результати моделювання масштабів розповсюдження розпріснених і забруднених вод з Дніпровсько-Бузького лиману добре узгоджуються з супутниковою інформацією щодо кольору поверхні моря, наведеною на рис. 6, уточнюють і доповнюють їх додатковою інформацією. На підставі результатів модельних розрахунків можна зробити висновок, що внаслідок перенесення трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману уздовж західного узбережжя ПнЗЧМ прямий вплив руйнування греблі Каховського водосховища поширюється до пригирлової ділянки річки Дунай. Вже 14 червня 2023 року шлейф розпріснених вод досяг району розташування Тузловських лиманів. У подальшому вузький шлейф розпріснених вод, витягнутий уздовж західного узбережжя, почав розмиватися у сторону відкритого моря у вигляді «язиків», які утворилися в районах Дністровського та Дунай-Дністровського

(Тузлівського) підняття дна моря (з глибинами меншими за 20 м). Також відбувалось поширення на південь в сторону відкритого моря шлейфу розпріснених вод від Одеської банки.

В третій декаді червня розпріснення вод в шлейфі почало зменшуватися і 27 червня 2023 р. в ньому вже не було вод із солоністю меншою за 10 ‰.

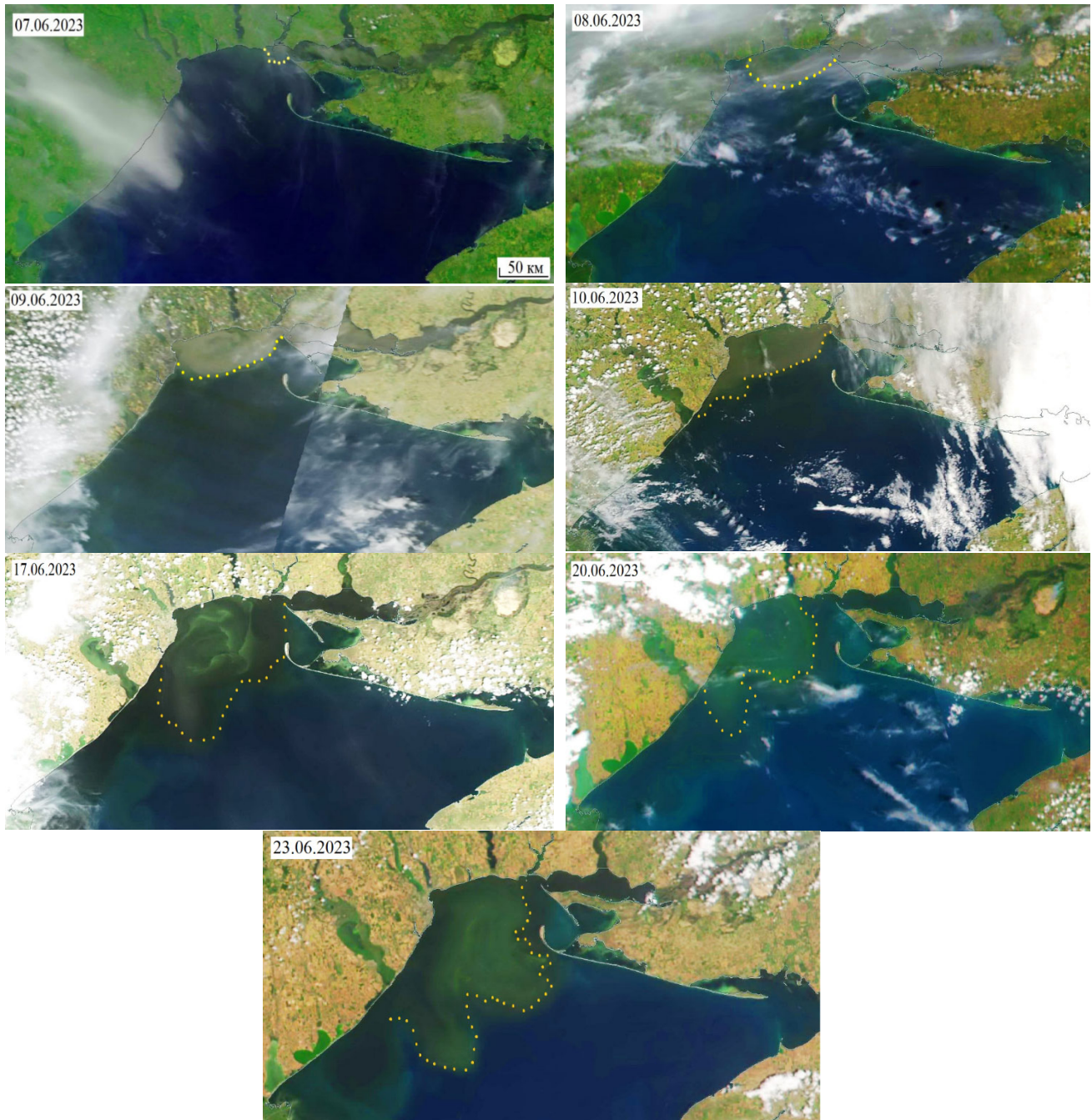


Рис. 6 – Оброблені кольорові супутникові зображення поверхні північно-західної частини Чорного моря, які візуалізують розповсюдження забруднених каламутних вод з Дніпровсько-Бузького лиману
Fig. 6 - Processed color satellite images of the surface of the northwestern part of the Black Sea, which visualize the spread of polluted muddy waters from the Dnieper-Bug estuary

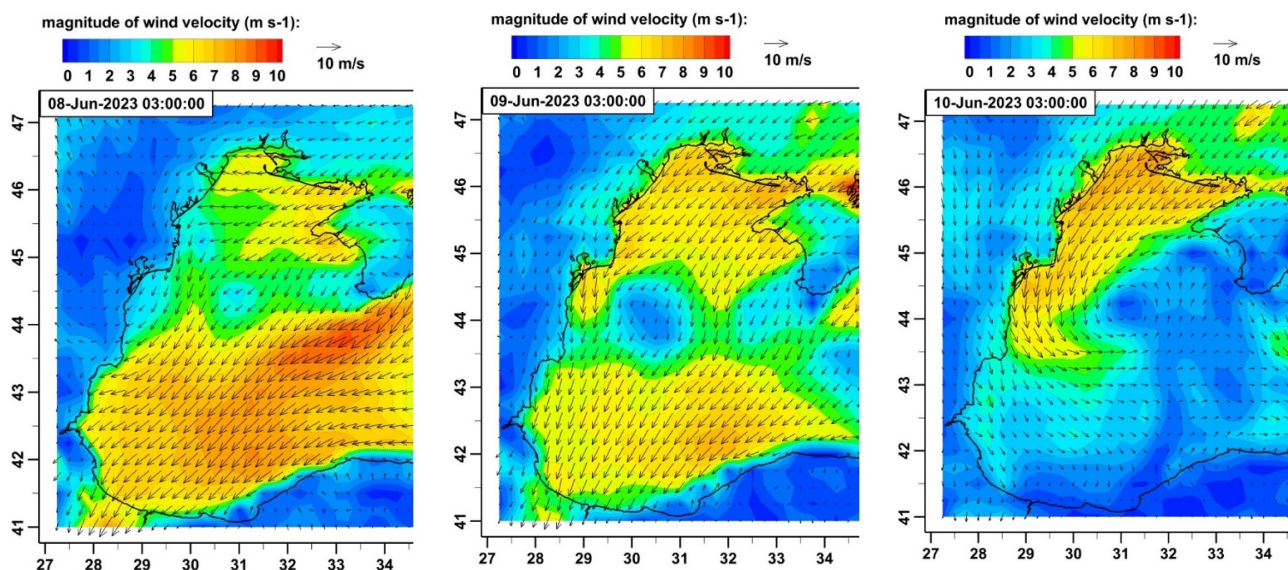


Рис. 7 – Поля вітру над західною частиною Чорного моря за даними архіву GFS прогнозів метеорологічних умов в перші дні після руйнування греблі Каховської ГЕС (08-10.06.2023)
Fig. 7 – Wind fields over the western part of the Black Sea according to the archive of GFS forecasts of meteorological conditions in the first days after the destruction of the Kakhovka HPP dam (08-10.06.2023)

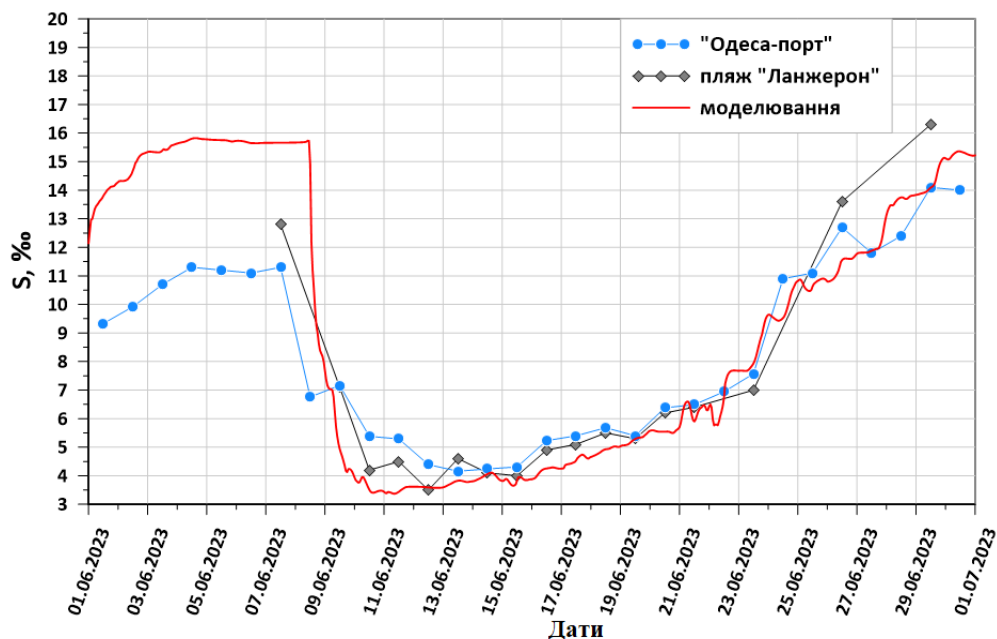


Рис. 8 – Зміни солоності вод поблизу порту Одеса за даними моделювання та спостережень
Fig. 8 – Changes in the salinity of waters near the port of Odesa according to modeling and observations data

Додатково до солоності вод, як показника проникнення трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману до моря, моделювалося поширення на акваторії ПнЗЧМ консервативної домішки нейтральної плавучості. Концентрація домішки в водах Дніпра у пункті Херсон приймалася рівною одній умовній одиниці. Отже результати моделювання наведені на рис. 10 показують концентрацію умовної

домішки в розрахункових точках поверхневого шару вод морської акваторії в частках від їх концентрації в гирловій частині річки Дніпро в районі міста Херсон. Ці результати демонструють зменшення концентрації розчиненої у морській воді концентрації умовної забруднюючої речовини, яке відбувається тільки за рахунок дії гідродинамічних чинників (основне розведення). Тобто зміни концентрації

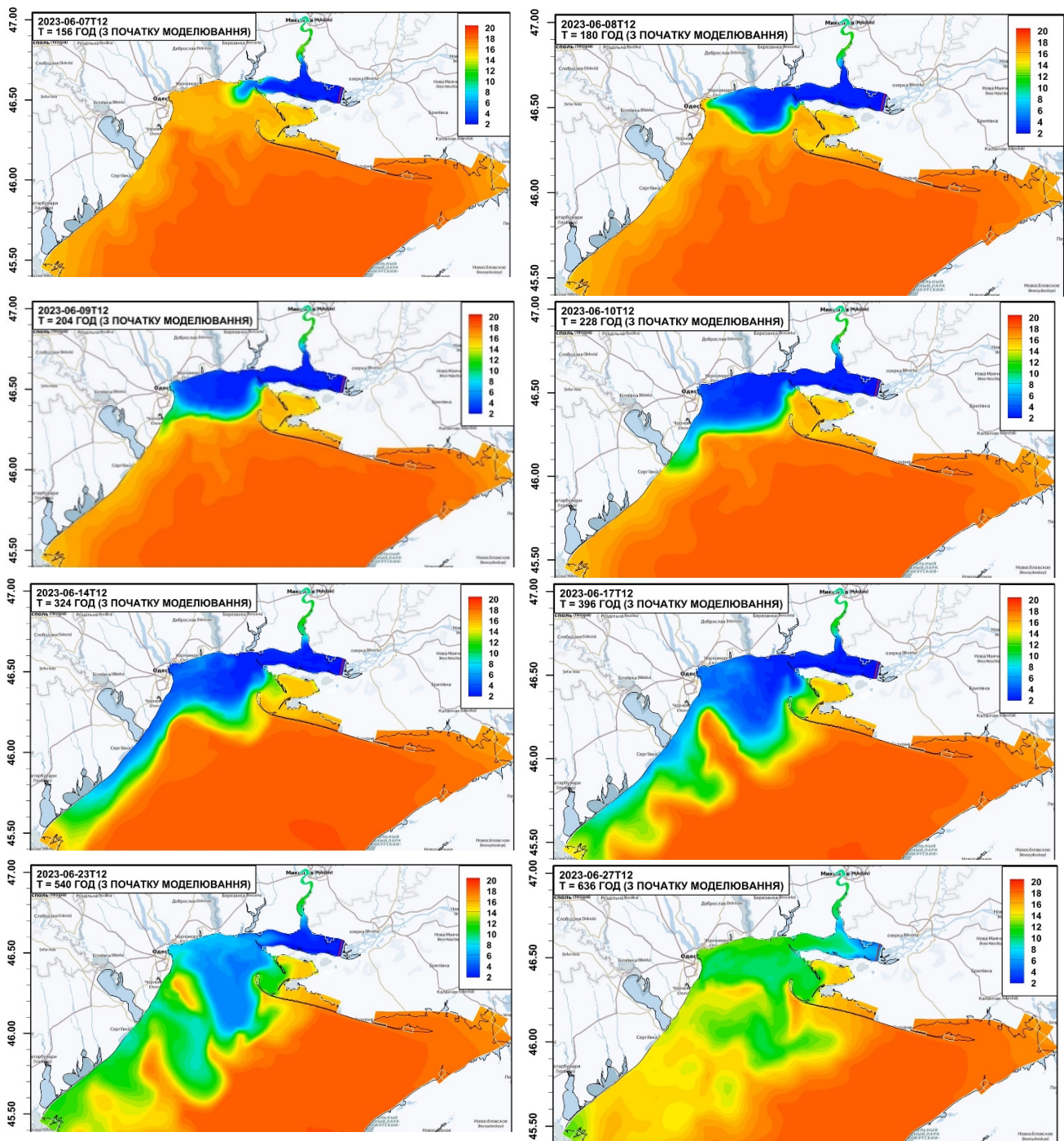


Рис. 9 – Зміни просторового розподілу солоності вод в поверхневому шарі північно-західної частини Чорного моря в період з 07 до 27 червня 2023 р. за результатами моделювання

Fig. 9 – Changes in the spatial distribution of water salinity in the surface layer of the northwestern part of the Black Sea from 07 to 27 June 2023 based on simulation results

забруднюючих речовин в результаті дії хімічних і біологічних процесів, які відбуваються у морській воді, гравітаційного осадження завісі та інших подібних процесів, не враховуються.

Результати моделювання приведені на рис. 10 свідчать, що найбільший рівень забруднення

морських вод мав місце на виході із Дніпровсько-Бузького лиману і над Одеською банкою, де, зокрема, 11 червня 2023 р. концентрації умовної домішки змінювались від 0,6 до 1 у.о., тобто дорівнювали 60-100 % від значення на виході з гирла Дніпра. Звертає на

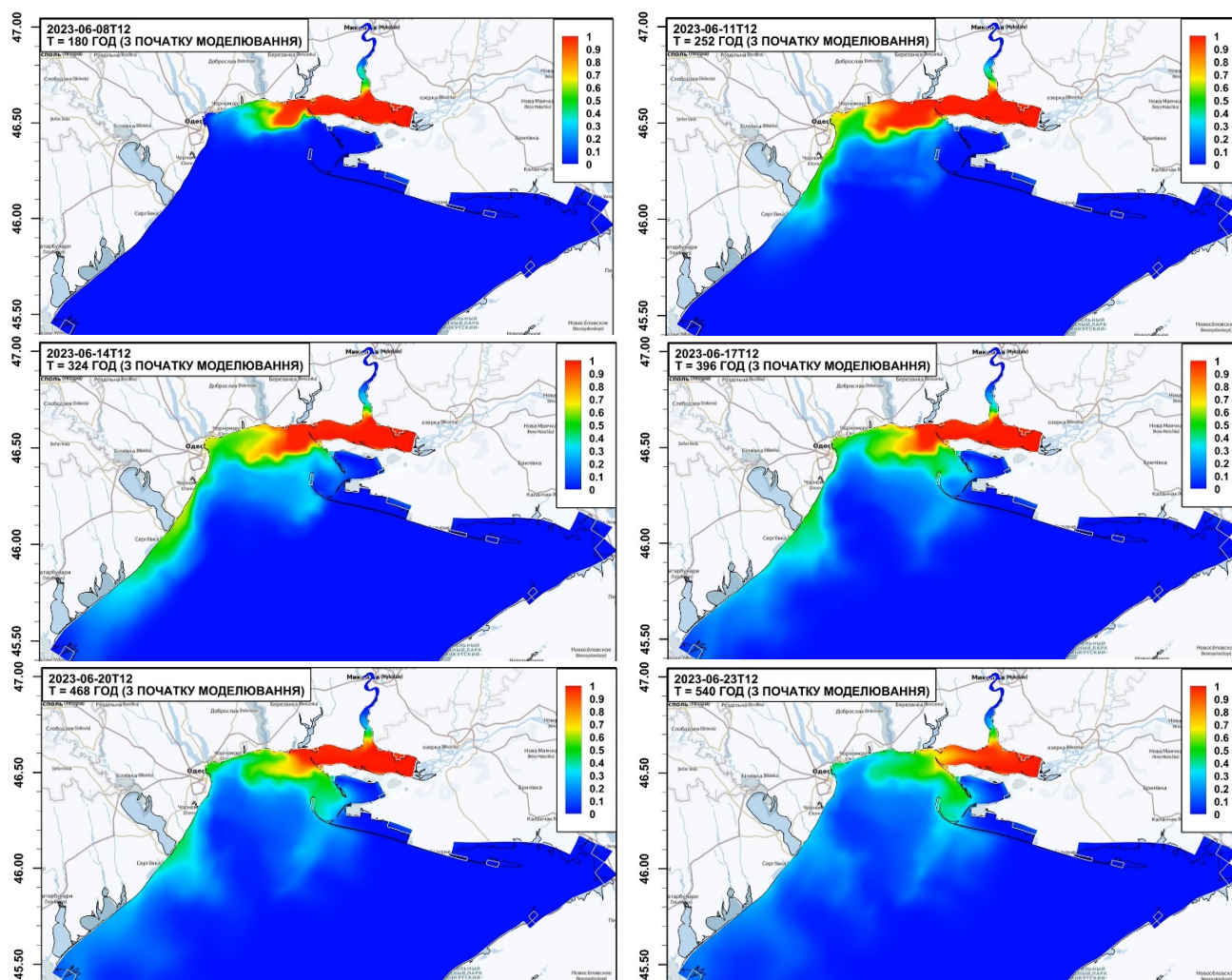


Рис. 10 – Зміни концентрації умовної домішки нейтральної плавучості (у частках від 1 – концентрації в забруднених річкових водах) в поверхневому шарі вод ПнЗЧМ
Fig. 10 – Changes in the concentration of the conditional impurity of neutral buoyancy (in fractions of 1 - concentration in polluted river waters) in the surface layer of waters of the NWBS

себе увагу добре видний прискорений перенос домішки уздовж мілководдя північного узбережжя ПнЗЧМ у сторону м.Одеси, в результаті чого в Одеській затоці формується зона з підвищеним рівнем забруднення відносно оточуючих вод, яка зберігається досить тривалий час.

В період з 10 по 14 червня 2023 р. шлейф підвищених концентрацій умовної домішки (0.3-0.7 у.од.) простежується уздовж західного узбережжя ПнЗЧМ від Одеси до прибережної зони моря прилеглої до коси-пересипу Тузлівських лиманів (с.Лебедівка). Пізніше він звужується до ширини уздовж берегового потоку на ділянці прибережних вод біля м.Чорноморськ (17 червня 2023 р., рис. 10). В той же час утворюється широка локальна зона підвищених концентрацій домішки на

Дністровському піднятті дна, яка простежується до 20 червня 2023 р.

Менш виражений шлейф підвищених концентрацій умовної домішки (0,3-0,4 у.од.), ніж вищевказаний, формувалася в морі на південь від Кінбурнської протоки уздовж Тендрівського підняття дна.

Станом на 23 червня 2023 р. концентрація домішки в слідах шлейфів забруднених вод над Дністровським, Тузлівським і Тендрівським підняттями дна зменшилась до 0,3 у.од. і нижче.

Описані вище особливості розповсюдження шлейфу розпріснених вод і умовної домішки зумовлені динамікою вод на акваторії ПнЗЧМ. На рис. 11-13 показана просторова структура поверхневих та усереднених за глибиною течій в обрані дні після початку надходження розпріснених і забруднених річкових вод з

Дніпровсько-Бузького лиману до моря. В перші дні після надходження потоку вод з Каховського водосховища до моря в Дніпровсько-Бузькому районі ПнЗЧМ домінували градієнтні стокові течії, максимальні швидкості яких мали місце в Кінбурнській протоці (2,5-3,0 м/с), а в районі мису Північний Одеський вони досягали значень 0,7-0,9 м/с. В цілому можна виділити два основних напрямки переносу вод течіями від Кінбурнської протоки - перший в сторону Одеської затоки (простежувався з 7 по 14 червня) і другий, що обходить Одеську банку з півдня і відповідає гідрофронті між трансформованими річковими водами з низькою солоністю і оточуючими морськими водами з

підвищеними значеннями солоності. Швидкості поверхневих течій першого потоку близькі до 0,25 м/с, а другого – дорівнюють 0,9-0,6 м/с уздовж струменя потоку. Другий потік є значно інтенсивнішим через внесок густинних течій у формування поверхневої циркуляції вод. Взагалі, впродовж першого тижня після руйнування греблі вітрові чинники відігравали значно меншу роль у формуванні циркуляції вод і поширенні трансформованих річкових вод на акваторії ПнЗЧМ, ніж градієнтні і густинні течії. З 20 червня 2023 року ситуація змінюється. Під впливом нагінних вітрів вода з моря почала входити до Дніпровсько-Бузького лиману (рис. 13).

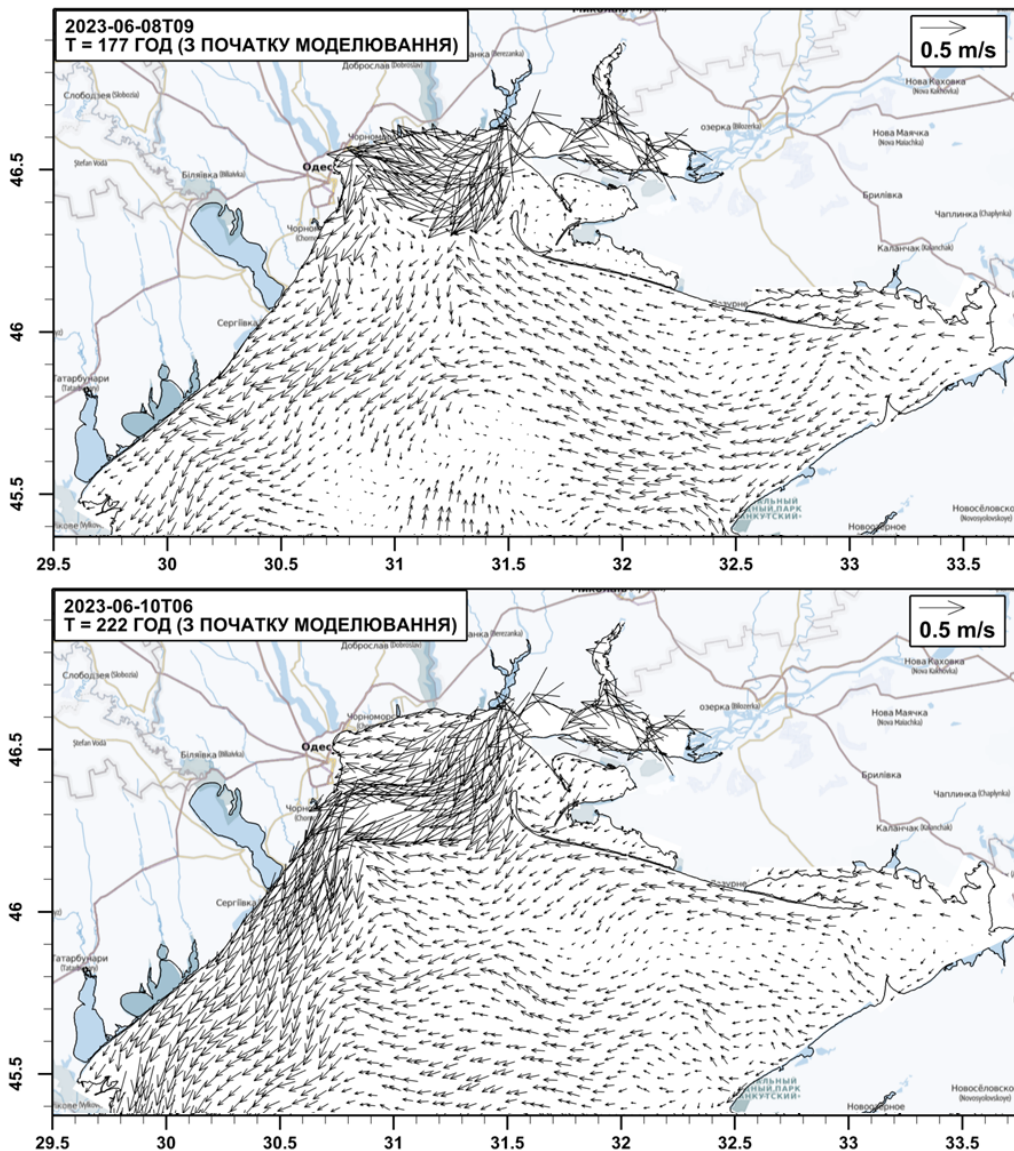


Рис. 11 – Течії у поверхневому шарі вод ПнЗЧМ, змодельовані на дати 08.06.2023 09:00; 10.06.2023 06:00
 Fig. 11 – Currents in the surface layer of NWBS water modeled on the dates for 08.06.2023 09:00; 10.06.2023 06:00

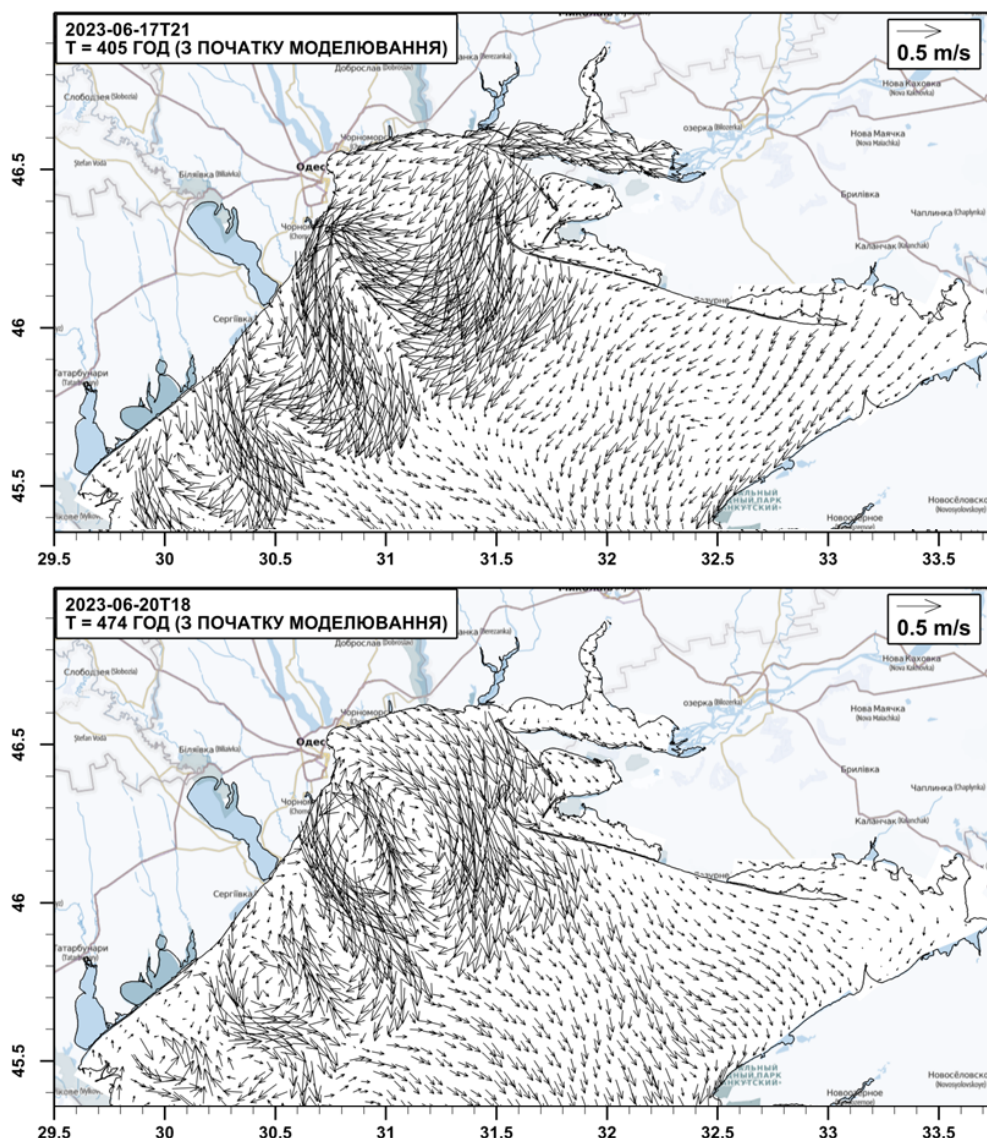


Рис. 12 – Течії у поверхневому шарі вод ПнЗЧМ, змодельовані на дати 17.06.2023 21:00; 20.06.2023 18:00
Fig. 12 – Currents in the surface layer of NWBS water modeled on the dates for 17.06.2023 21:00; 20.06.2023 18:00

Після руйнування греблі Каховської ГЕС з водами Дніпра до ПнЗЧМ потрапила велика кількість біогенних і органічних речовин, які містились в річкових водах, включно з водосховищем, в скаламучених водним потоком донних відкладах (мулах) та були змиті із затоплених територій. На рис. 14 показані зміни у часі концентрації основних біогенних речовин і зависі у морі поблизу пляжу Ланжерон (м.Одеса) за даними моніторингу Державної екологічної інспекції Південно-Західного округу [17]. В перші дні після досягнення шлейфом забруднених перехідних вод одеського

узбережжя спостерігались високі концентрації амонійного азоту, який є початковою формою мінерального азоту, що утворюється в результаті мінералізації органічної речовини. Його високі концентрації сприяють швидкому спалаху біомаси водоростей. Висока концентрація амонійного азоту у морській воді вказує на надходження його з джерел, де відбувається інтенсивна мінералізація органічної речовини, серед яких можуть бути системи каналізування населених пунктів, вигрібні ями, тваринницькі господарства та інші.

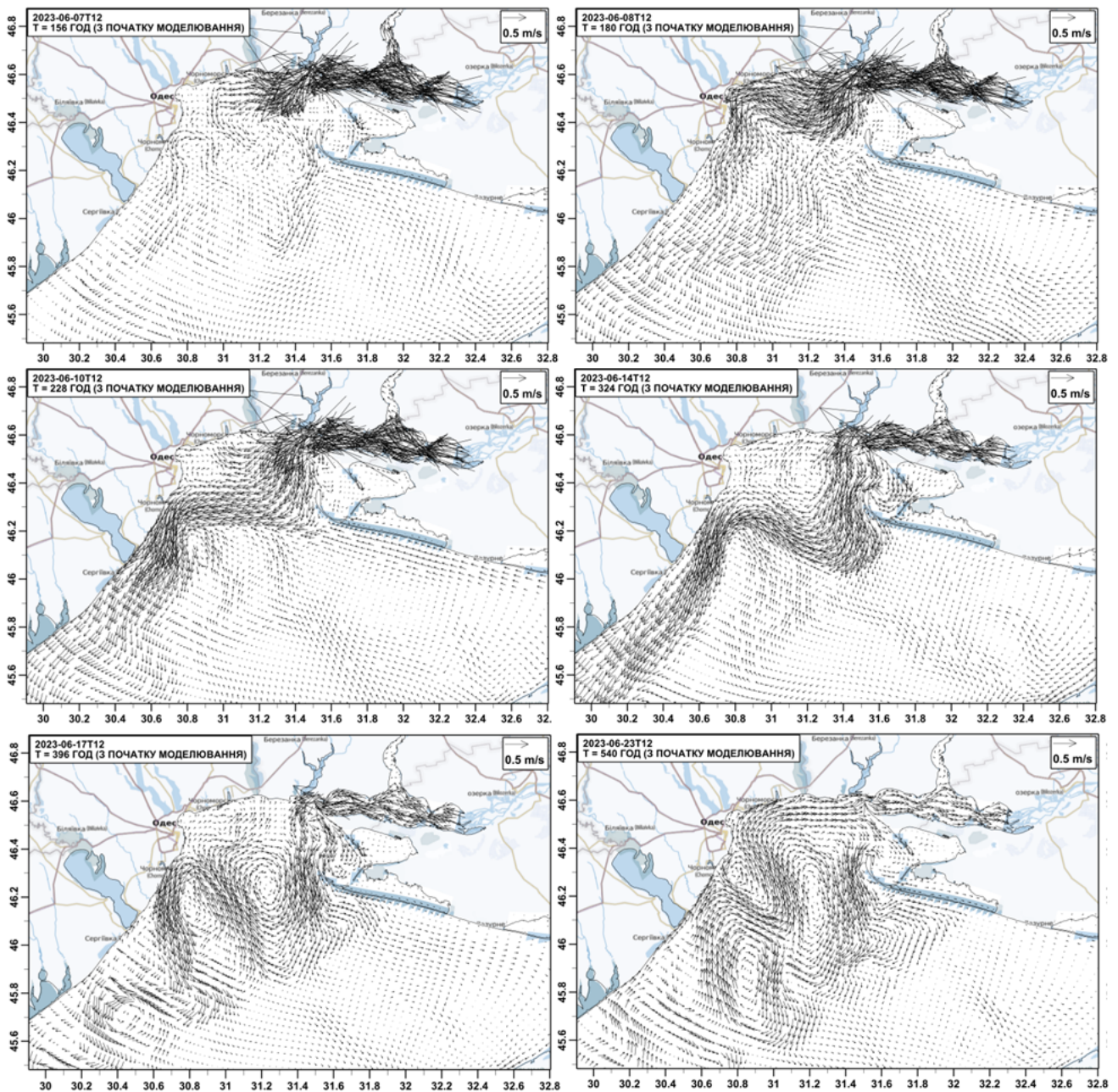


Рис. 13 – Поля векторів усередненої за глибиною швидкості течії, м/с, на акваторії північно-західної частини Чорного моря в період з 07 по 23 червня 2023 р. за результатами моделювання

Fig. 13 – Vector fields of the depth-average current velocity, m/s, in the water area of the northwestern part of the Black Sea from 7 to 23 June 2023 based on simulation results

В часовій мінливості концентрацій нітратів і зважених речовин, на загальному фоні високих їх значень після досягнення шлейфом забруднених трансформованих річкових вод одеського узбережжя, простежуються два великих піка – 10 і 14 червня. Зміни концентрації фосфатів характеризуються стабільно високими їх значеннями в період з 10 по 12 червня 2023 року, а потім їх відносним зменшенням.

Надходження великої кількості біогенних

речовин і лабільної органіки до моря в умовах його надзвичайного і тривалого розпріснення призвело до спалаху цвітіння фітопланктону в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі ПнЗЧМ [22, 23]. На рис. 15 показані зміни просторового розподілу хлорофілу-а в період з 10 по 23 червня 2023 р., який є прямим показником цвітіння водоростей. Хоча характерне значення хлорофілу-а в північно-

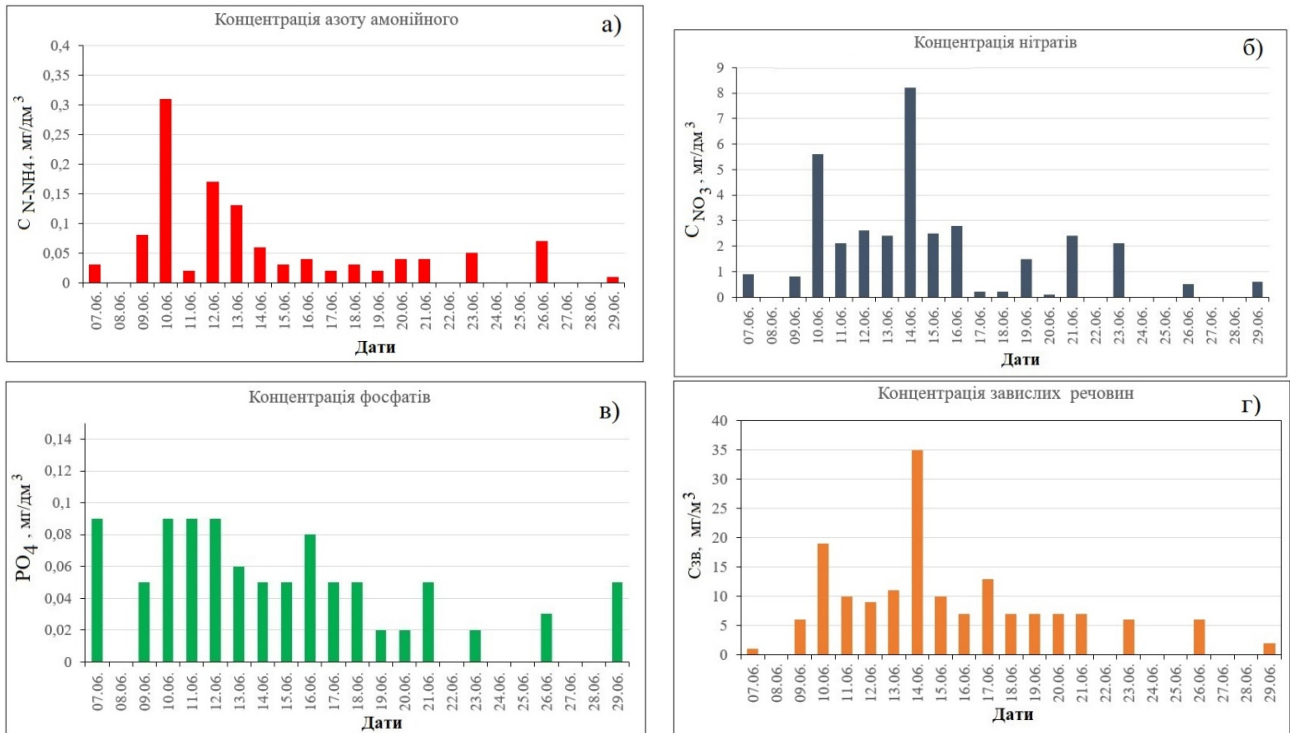


Рис. 14 – Часова динаміка концентрації біогенних і завислих речовин в районі пляжа Ланжерон (місто Одеса) у червні 2023 р. після руйнування греблі Каховської ГЕС

Fig. 14 – Time dynamics of concentration of nutrients and suspended substances in the area of Langeron beach (Odesa city) in June 2023 after the destruction of the Kakhovka HPP dam

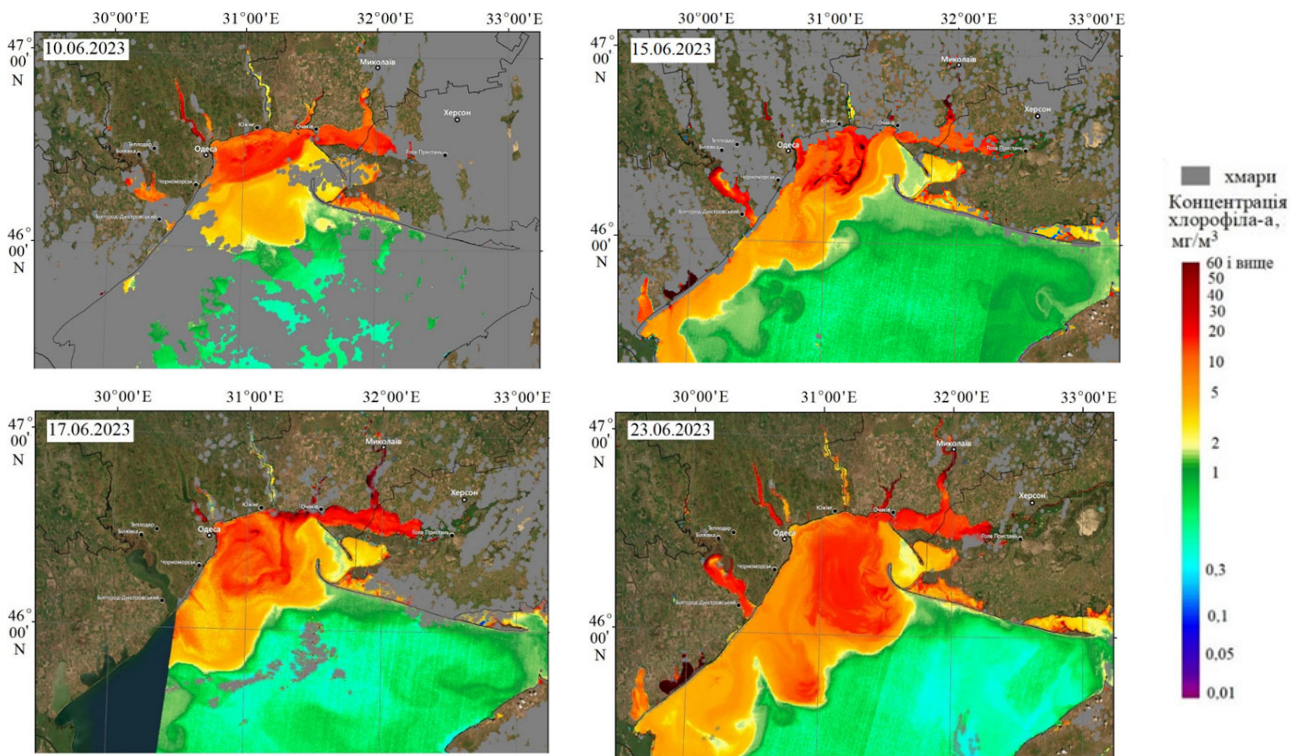


Рис. 15 – Зміни просторового розподілу концентрації хлорофілу-а на акваторії ПнЗЧМ

Fig. 15 – Changes in the spatial distribution of chlorophyll-a concentration in the NWBS water area

західній частині Чорного моря не перевищує декількох мг/м³, в результаті надходження забруднених трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману утворились обширні зони з концентраціями, які значно перевищують 5 мг/м³. Їх межі відповідають розташуванню шлейфу розпріснених вод. Максимальні концентрації хлорофілу-а (більші за 5 мг/м³) спостерігаються в межах шлейфу розпріснення оконтуреного гідрофронтом, в зонах відносного послаблення швидкості течій.

ВИСНОВКИ

В роботі на підставі аналізу супутникових знімків кольору поверхні моря, результатів математичного моделювання із використанням чисельної гідродинамічної моделі D-Flow FM встановлено особливості розповсюдження в північно-західній частині Чорного моря великих обсягів розпріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, які надійшли до нього в результаті руйнування греблі Каховської ГЕС у червні 2023р.

Встановлено, що шлейф розпріснених (з солоністю < 10 ‰) і забруднених вод спочатку розповсюджувався в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі ПнЗЧМ у напрямку узбережжя міста Одеса, якого він досяг 9-10 червня 2023 р. Потім шлейф почав поширюватись уздовж західного узбережжя і 14 червня 2023р. досяг району розташування Тузловських лиманів. У подальшому відбувалося розмивання вузького шлейфу розпріснених вод, витягнутого уздовж західного узбережжя, у сторону відкритого моря у вигляді «язиків» вод зі зниженою солоністю, які утворилися в районах Дністровського та Дунай-Дністровського (Тузлівського) підняття дна моря. Також відбувалось поширення шлейфу розпріснених вод на південь від Одеської банки в сторону відкритого моря через Тендрівське підняття дна.

Моделювання розповсюдження консервативної домішки нейтральної плавучості як трасера розповсюдження забруднень з перехідними водами з Дніпровсько-Бузького лиману показало, що тільки за рахунок гідродинамічного розведення відбувається зменшення рівня забруднення до 60 % (від рівня забруднення на виході з гирла Дніпра в районі міста Херсон) в Одеському районі ПнЗЧМ і до 30 % – в акваторії Дунай-Дністровського межиріччя.

Вказані особливості розповсюдження шлейфу розпріснених вод і умовного забруднювача (домішки) визначаються характером циркуляції вод на акваторії північно-західної частини Чорного моря. Розрахунки течій за гідродинамічною моделлю показали, що в перші дні після надходження вод з Каховського водосховища до моря в Дніпровсько-Бузькому районі домінували градієнтні стокові течії, а у подальшому - густинні течії, сформовані на гідрофронті між трансформованими річковими водами і солоними морськими.

Вітрові умови впливали на характер поширення на акваторії ПнЗЧМ шлейфу розпріснених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, визначали положення і конфігурацію гідрофронту між трансформованими річковими і оточуючими морськими водами. Вітрові течії хоча і не були домінуючими, але впливали на динаміку вод і розподіл концентрацій домішки, наприклад хлорофілу-а, в межах шлейфу опріснення оконтуреного гідрофронтом, сприяли проникненню трансформованих річкових вод в сторону Одеси уздовж прибережного мілководдя.

У майбутньому автори мають намір продовжити дослідження шляхом використання моделі якості вод для врахування неконсервативності домішок хіміко-біологічної природи (фітопланктону, біогенних і органічних речовин, кисню), з метою прогнозування довготривалих наслідків руйнування греблі Каховської ГЕС для екосистеми моря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2017: Final Scientific Report / Slobodnik J., Alexandrov B., Komorin V. et al. Dnipro: Seredniak T.K., 2020, pp. 1-97.
2. Komorin V. Assessment of the Black Sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*. 2021. 16(2). Pp. 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
3. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. 2023. / Vishnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. *Water International*. 2023. 48(5). Pp. 631–647 <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
4. Коморін В. М. Теоретико-методологічні аспекти управління екосистемними ризиками моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. 31. С. 33-54. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.03>
5. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология: монография / под ред. Ю.П. Зайцева,

- Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой. Киев: Наукова думка. 2006. С.25-118.
6. Тучковенко Ю. С., Иванов В. А., Сапко О. Ю. Оценка влияния береговых антропогенных источников на качество вод Одесского района северо-западной части Черного моря: монография / Морской гидрофиз. ин-т НАНУ; Од. гос. эколог. ун-т. Севастополь: НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 169 с.
 7. Влияние гидрологических условий на изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик вод Одесского региона северо-западной части Черного моря / Тучковенко Ю. С., Доценко С. А., Дятлов С. Е., Нестерова Д. А., Скрипник И. А., Кирсанова Е. В. *Морской экологический журнал*. Севастополь: НАН Украины, МГИ. 2004. 3(4). С. 75 - 85. <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/2466/>
 8. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР: Справочник. Т. 4. Черное море. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 99 с.
 9. Большаков В. С. Трансформация речных вод в Черном море: монография. Киев: Наукова думка, 1970. 328 с.
 10. Обухов С. В. Економіко-екологічні оцінки проектів великих українських водосховищ: монографія. Одеса: ТОВ «ІНВАЦ», 2008. 100 с.
 11. Обухов Е. В. Каховскому водохранилищу – 55 лет. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. 10. С.116-125.
 12. Аверченко Д. А. Каховскому водохранилищу и Днепру нужен Бассейновый парламент. Начнем с общественного. *Зеркало недели*. 2006. URL: https://zn.ua/ECOLOGY/kahovskomu_vodohranilishchu_i_dnepru_nuzhen_basseynovyy_parlament_nachnem_s_obschestvennogo.html (дата звернення 14.10.2023)
 13. Вишневецький В. І., Куций А. В. Багаторічні зміни водного режиму річок України: монографія. Київ: Наукова думка, 2022. 252 с.
 14. Національна академія наук України: офіційний сайт (2023). Аналіз перебігу затоплення територій Херсонської області внаслідок руйнації гідропоруд Каховської ГЕС. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10209> (дата звернення: 27.08.2023)
 15. Тучковенко Ю. С., Степаненко С. М. Вплив руйнування греблі Каховської ГЕС на екологічний стан Одеського району Чорного моря. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2023, 44. С. 71-80. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80>
 16. NASA WORLDVIEW Base Layers. Corrected reflectance (True Color) URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата звернення: 10.10.2023)
 17. Департамент екології та природних ресурсів Одеської ОДА. Довідка про надзвичайну ситуацію внаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. URL: <https://ecology.od.gov.ua/dovidka-pro-nadzvyhajnu-sytuacziyu-vnaslidok-rujnuvannya-damby-kahovskoyi-ges-2/> (дата звернення: 10.10.2023)
 18. Deltares. D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2023, SVN revision: 78723. Delft, the Netherlands URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (дата звернення: 30.08.2023 р.).
 19. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (дата звернення: 30.08.2023).
 20. The GFS Atmospheric Model. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (дата звернення: 30.08.2023).
 21. Black Sea Physics Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5 (дата звернення: 30.08.2023).
 22. Український науковий центр екології моря. Цвітіння фітопланктону в Одеській затоці після підриву Каховської дамби. (публікація від 22 червня 2023 р.). URL: <https://www.facebook.com/UkrSCES> (дата звернення: 12.07.2023)
 23. Інститут морської біології НАН України. Динаміка основних параметри морської екосистеми в українському секторі північно-західної частини Чорного моря в перший місяця після екологічної катастрофи руйнування Каховської дамби 06.06.2023 URL: <http://www.imb.odessa.ua/?id=20904107> (дата звернення: 15.10.2023)

REFERENCES

1. Slobodnik, J., Alexandrov, B., Komorin, V. et al. (2020). *National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2017: Final Scientific Report*. Dnipro: Seredniak T.K., pp. 1-97.
2. Komorin, V. (2021) Assessment of the Black Sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*, 16(2), pp. 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
3. Vishnevskiy, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y. & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. 2023. *Water International*, 48(5), pp. 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
4. Komorin, V. (2023). Theoretical and methodological aspects of sea ecosystem risks management. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 31, pp. 33-54. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.03>
5. Zaitsev, Y.P., Aleksandrov, B.G. & Minicheva, G.G. (eds.), (2006). *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya [The North-Western Part of the Black Sea: Biology and Ecology]*. Kiev : Naukova Dumka, pp. 25-118. (in Russ.)
6. Tuchkovenko, Yu.S., Ivanov, V.A. & Sapko, O.Yu. (2011). *Otsenka vliyaniya beregovykh antropogennykh istochnikov na kachestvo vod Odesskogo regiona severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [Assessment of the coastal anthropogenic sources impact on water quality in north-western part of Black Sea near Odessa]*. Marine Hydrophysical Institute of NASU, Odessa State Environmental University. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika Publ. (in Russ.)
7. Tuchkovenko, Y.S., Docenko, S.A., Dyatlov, S.E., Nesterova, D.A., Skripnik, I.A. & Kirsanova, E.V. (2004). Influence of hydrological conditions on variability of hydrochemical and hydrobiological characteristics of waters in Odessa region in northwestern part of the Black Sea. *Marine Ecological Journal*, 3(4), pp.75-85. <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/2466/> (in Russ.)
8. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR: Spravochnik [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR: Reference book]*

- Vol. 4. *Chernoe more [Black Sea]*. (1986). Leningrad: Hydrometeoizdat (in Russ.)
9. Bolshakov, V.S. (1970). *Transformaciya rechnykh vod v Chernom more [Transformation of river waters in the Black Sea]*. Kyiv: Naukova Dumka (in Russ.)
10. Obukhov, E.V. (2008). *Ekonomiko-ekolohichni otsinky proektiv velykykh ukrainskykh vodoshkovyshch [Economic and environmental assessments of projects of large Ukrainian reservoirs]*. Odesa: "INVATS" LLC. (in Ukr.)
11. Obukhov, E.V. (2012). Kakhovsky reservoir – 55 years. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 10, pp.116-125. (in Russ.)
12. Averbchenko, D.A. (2006). The Kakhovsky reservoir and the Dnieper need the Basin Parliament. Let's start with the public. *Mirror of the week*. Available at: https://zn.ua/ECOLOGY/kahovskomu_vodohranilishchu_i_dnepru_nuzhen_basseynovyy_parlament_nachnem_s_obschestvennogo.html (Accessed: 14.10.2023) (in Russ.)
13. Vyshnevskiy, V. & Kutsiy, A. (2022). *Bahatorichni zminy vodnoho rezhymu richok Ukrainy. [Long-term changes in the water regime of rivers in Ukraine]*. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukr.)
14. National Academy of Sciences of Ukraine: official website (2023). *Analysis of the course of flooding of the territories of the Kherson region due to the destruction of the hydroelectric structures of the Kakhovka HPP*. Available at: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10209> (Accessed: 27.08.2023) (in Ukr.)
15. Tuchkovenko, Y. & Stepanenko, S. (2023). The impact of destruction of the Kakhovka dam on the environmental status of the Odesa area of the Black Sea. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, (44), pp. 71-80. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80> (in Ukr.)
16. *NASA WORLDVIEW Base Layers. Corrected reflectance (True Color)*. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (Accessed: 10.10.2023)
17. Department of environment and natural resources of Odessa regional state administration (2023). *Certificate on the emergency situation due to the destruction of the Kakhovka HPP dam*. Available at: <https://ecology.od.gov.ua/dovidka-pro-nadzvyhajnu-sytuacziyu-vnaslidok-rujnuvannya-damby-kahovskoyi-ges-2/> (Accessed: 10.10.2023). (in Ukr.)
18. Deltares (2023). *D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2023, SVN revision: 78723*. Delft, the Netherlands URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (Accessed: 30.08.2023 p.).
19. *NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive*. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (Accessed: 30.08.2023).
20. *The GFS Atmospheric Model*. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (Accessed: 30.08.2023).
21. *Black Sea Physics Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS)*. Marine Data Store (MDS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5 (Accessed: 30.08.2023).
22. *Ukrainian scientific center of Ecology of Sea (UkrSCES). Blooming of phytoplankton in the Odesa Bay after the explosion of the Kakhovskaya Dam*. (published on June 22, 2023). Available at: <https://www.facebook.com/UkrSCES> (Accessed: 12.07.2023) (in Ukr.)
23. Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine: official site. *Dynamics of the main parameters of the marine ecosystem in the Ukrainian sector of the northwestern part of the Black Sea in the first month after the ecological disaster of the destruction of the Kakhovka Dam* 06.06.2023. Available at: <http://www.imb.odessa.ua/?id=20904107> (Accessed: 15.10.2023). (in Ukr.)

CHARACTERISTICS OF BLACK SEA DISPERSION OF FRESHENED AND POLLUTED TRANSITIONAL WATERS FROM THE DNIPRO-BUG ESTUARY AFTER DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DAM

Yu. S. Tuchkovenko^{1,2}, D. V. Kushnir¹, V. A. Ovcharuk¹, A. V. Sokolov³,
V. N. Komorin⁴

¹Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
tuch2001@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

²Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine,
37 Pushkinska Str., Odesa, 65048, Ukraine

³National Center Space Facilities Control and Test Center
Ukraine, mriya1spacecenter@gmail.com

⁴Ukrainian Scientific Center of Ecology of the Sea,
89 Frantsuzsky Blvd., Odesa, 65009, Ukraine, vkomorin@gmail.com

This study examines the characteristics of distribution of large volumes of freshened and polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary across the northwestern part of the Black Sea (NWBS) that was caused by destruction of the Kakhovka HPP dam in June 2023. From June 6, 2023 to June 12, 2023 14.4 km³ of water were discharged from the Kakhovka Reservoir into the Dnipro-Bug estuary and subsequently into the sea. This volume constitutes 27% of the total annual

average natural runoff of the Dnipro River (53.5 km³). During the initial days following the dam destruction water flow through the breach amounted to 40-50 thousand m³/s. The water carried a variety of pollutants into the sea that were present in the water of the Kakhovka Reservoir, in its bottom sediments, and also washed off from the flooded territories of the lower Dnipro area (more than 2000 hectares).

The analysis of the distribution characteristics was conducted using satellite images of the sea surface color and chlorophyll a concentrations, as well as the results of hydrodynamic modeling with application of the 3-D variant of a numerical hydrodynamic model Delft3D-Flow Flexible Mesh. It was established that the plume of freshened and polluted water initially spread across the Dnipro-Bug estuarine region of the NWBS and then moved towards the sea coast of Odesa reaching it on June 9-10, 2023. Subsequently, the plume began to spread along the western sea coast and reached the Tuzlivski Limans area on June 14, 2023. After this the narrow plume of dispersed water along the sea coast began to dilute when moving towards the open sea in the form of "tongues" that had formed over the sea bottom elevations. The modeling of dispersion of a conservative neutral buoyancy admixture serving as a marker of pollution spread with the transitional waters from the Dnipro-Bug estuary showed that reduction in pollution levels took place solely due to hydrodynamic dilution (up to 60% in Odesa District of the NWBS and up to 30% in the Danube-Dniester interfluvial area of the river water pollution level observed in Kherson).

The identified characteristics were determined based on the water circulation process that formed in the Dnipro-Bug estuarine area under the influence of significant sea level gradients resulting from the inflow of large volumes of freshened transitional waters through the estuary and the Kinburn Strait during the first days, and then followed by the density currents formed at the hydrofront between the transformed river water and surrounding sea. The influence of wind conditions manifested itself in the form of spread across the NWBS of the plume of dispersed transitional water from the Dnipro-Bug estuary and the hydrofront's position and configuration. Though wind-induced currents were not dominant, they still influenced the water dynamics and distribution of concentrations of admixtures, for instance, chlorophyll a, within the freshened plume that was outlined by the hydrofront. They also promoted penetration along the coastal shallow area of transformed river water towards Odesa.

Keywords: dam destruction, the Kakhovka Reservoir, the Black Sea, northwestern part, dispersion of transitional waters, satellite data, modeling

Подання до редакції : 14. 11. 2023
Надходження остаточної версії : 20. 11. 2023
Публікація статті : 21. 12. 2023