

УДК 551.468.4

ВПЛИВ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА НА ОКЕАНОГРАФІЧНІ УМОВИ В ПІВНІЧНО-ЗАХІДНІЙ ЧАСТИНІ ЧОРНОГО МОРЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛЮВАННЯ

Ю. С. Тучковенко^{1,2}, Д. В. Кушнір¹, А. В. Торгонський¹, В. М. Коморін⁴

¹Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
ocean@odeku.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

²Інститут морської біології НАН України,
вул. Пушкінська, 37, 65048, Одеса, Україна

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

В статті на підставі результатів чисельного математичного моделювання визначені і проаналізовані характерні особливості поширення в акваторії північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ) трансформованих і забруднених вод річки Дніпро, які надійшли до моря в результаті екстремально великого штучного паводка, викликаного руйнуванням російськими окупаційними військами греблі Каховського водосховища у червні 2023 року. З паводковим потоком до моря були винесені різні типи забруднювальних речовин, які містилися у водах Каховського водосховища, пониззя Дніпра, донних відкладах, були змиті із затоплених територій. Особлива увага приділяється зміні океанографічних умов в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі (ДБР) Чорного моря, які визначають масштаби забруднення морського середовища. Як показник ступеня проникнення забруднених перехідних вод з лиману до моря використовувалась солоність вод, оскільки найменш трансформованим річковим водам з низькою солоністю відповідає високий рівень їхнього забруднення. Моделювання виконувалося протягом червня 2023 року із застосуванням чисельної моделі Delft3D-Flow Flexible Mesh.

Встановлено, що в перші дні після руйнування греблі Каховського водосховища розповсюдження опріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману відбувалось в ДБР ПнЗЧМ в межах усієї товщі шару від поверхні до 15-20 м, а не тільки тонкого приповерхневого шару, як зазвичай, що було нетиповим. До середини червня потік перехідних вод із солоністю 4-6 ‰ у північного узбережжя ПнЗЧМ та над Одеською банкою охоплював всю водну товщу від поверхні до дна. Цьому сприяли надвеликі обсяги надходження трансформованих річкових вод Дніпра протягом короткого часу внаслідок руйнування греблі, а також спричинені цим інтенсивні градієнтні течії і перемішування, зумовлене просторовими градієнтами швидкості генерованих течій. Ширина шлейфу опріснених вод і його площа у придонному шарі були меншими, ніж у поверхневому. Найбільші вертикальні градієнти солоності сформувались південніше Одеської банки, де солоність у поверхневому шарі складала 4-6 ‰, а в придонному – 14-17 ‰. Розмивання шлейфу опріснених вод в придонному шарі відбувалось значно інтенсивніше, ніж в поверхневих водах.

Характер циркуляції вод в північній частині ПнЗЧМ в перші дні після надходження перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману визначався стоковими градієнтними течіями, які потім змінилися на вітрові течії в Одеському районі і над Одеською банкою, а південніше – на меандруючий потік градієнтних густинних течій.

Отримані результати сприяють кращому розумінню впливу надходження трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману на мінливість океанографічних характеристик і екологічний стан морських вод в Дніпровсько-Бузькому районі північно-західної частини Чорного моря.

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

1 ВСТУП

Океанографічні і екологічні умови на північній ділянці північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ), яка отримала назву Дніпровсько-Бузький пригирловий район [1-3], формуються під впливом стоку Дніпра і Південного Бугу, який надходить через

Кінбурнську протоку з Дніпровсько-Бузького лиману [3-5]. Домінуючим цей вплив є у весняні місяці року, коли річковий стік максимальний, а також в періоди проходження дощових паводків. Дніпровсько-Бузький пригирловий район (ДБР) включає до себе Одеський район ПнЗЧМ та Одеську банку [4-5].

Узбережжя ДБР є пляжною та санаторно-курортною зоною, де розташована велика кількість оздоровчих та рекреаційних об'єктів. З річковим стоком до моря надходить велика кількість біогенних елементів. Тому води ДБР характеризуються значним біологічним різноманіттям і високою біологічною продуктивністю. Однак, з іншого боку, надлишкове надходження біогенних речовин сприяє розвитку процесу евтрофування морських вод і призводить до бурхливого росту (цвітіння) водоростей, що негативно впливає на рекреаційний потенціал прибережних зон, спричиняє виникнення зон гіпоксії і аноксії у придонному шарі акваторії в літній період року і, як наслідок, загибель гідробіонтів через задуху, бактеріальне забруднення вод.

Наприклад, тільки в останній час цвітіння водоростей біля Одеси спостерігалось щорічно влітку 2019-2021 років. Окрім того, разом з паводковим потоком, до моря можуть надходити забруднюючі речовини токсичної дії змиті із затоплених антропогенно перетворених територій, адсорбовані частками зависі і донних відкладів Нижнього Дніпра, акумульовані в гідробіонтах, які з часом гинуть у солоних морських водах.

Через вищевказане, дослідники завжди приділяли увагу розгляду особливостей розповсюдження трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману (ДБЛ) на акваторії ПнЗЧМ [1, 4-7]. В [5] зазначається, що при виході з Дніпровсько-Бузького лиману річкові води розтікаються по поверхні моря у вигляді плюму (шлейфу), який при домінуванні північних та північно-західних вітрів спрямований на південний захід і опріснення вод у берегів Одеси не відбувається, солоність залишається у звичайних межах 14-16 ‰. У разі домінування південно-східних і східних вітрів, плюм опріснених вод поширюється на захід уздовж Одеської банки і північного узбережжя ПнЗЧМ до Одеси, знижуючи солоність вод поверхневого шару до 10 - 12 ‰, а у виняткових випадках – навіть до 3 ‰ [8]. Така ситуація, як правило, має місце в період зростання об'єму річкового стоку в період весняного водопілля, або під час дощових паводків. Можлива також

ситуація, коли річкові води при виході з лиману розтікаються в'ялоподібно. У таких випадках потік перехідних вод від Кінбурнської протоки розходить по поверхні моря радіально і досить швидко згасає. Лиманні води за солоністю швидко трансформуються в морські. Довжина зони трансформації річкових вод не перевищує двох десятків кілометрів і солоність води в Одеському районі ПнЗЧМ не знижується [1].

В [9] описаний зафіксований в період проведення комплексної океанологічної зйомки Одеського району ПнЗЧМ випадок проникнення опріснених вод з Дніпровсько-Бузького лиману наприкінці червня 2010 року. Плюм був притиснутий до північного берега і не розтікався південніше по акваторії через південно-східний вітер, що перешкодив цьому. Мінімальна солоність води в плюмі дорівнювала 8,99 ‰. Товщина опрісненого шару становила 2 м.

В [4] за результатами моделювання мінливості океанографічних умов визначена така схема циркуляції вод поверхневого шару ДБР у весняний період, коли вплив прісного стоку є максимальним: після виходу з Дніпровсько-Бузького лиману потік, йдучи за 10-метровою ізобатою, повертає на південь і роздвоюється біля західного узбережжя Кінбурнської коси на два струменя. Один струмінь прямує на захід над Одеською банкою і при досягненні її західного схилу роздвоюється на дві гілки: перша гілка повертає на схід уздовж Дніпровського жолоба і замикає антициклонічний вихор у районі банки, а друга гілка спрямована до мису Великий Фонтан Одеського узбережжя. Другий струмінь потоку, що виходить з Кінбурнської протоки, відразу рухається на південь і, огинаючи північний край Тендрівської коси, повертає спочатку на південний захід, а потім – на північний захід у напрямку м. Великий Фонтан. Таким чином, в акваторії моря на схід від м. Великий Фонтан спостерігається конвергенція двох потоків, які рухаються з північного і південного сходу. Далі, залежно від переважаючих вітрів, цей об'єднаний потік може рухатися на південь уздовж західного узбережжя ДБР, або поділитися на північну та південну гілки. Вищеописана структура течій руйнується під дією сильних вітрів, коли на всій акваторії ДБР починає домінувати вітрова складова сумарних течій.

При такій схемі циркуляції вод у поверхневому шарі виділяються два плюми опріснених вод, які поширюються від Дніпровсько-Бузького лиману. Перший спрямований уздовж Одеської банки у бік

Одеси, а другий – на південь уздовж Тендрівської коси. При сильних і тривалих вітрах зі східною складовою, плюм спрямований до Одеси стає домінуючим і розширюється до Тендрівської коси, фактично поглинаючи південний – південно-західний потік опріснених вод.

В роботі [6] за результатами аналізу середніх багаторічних показників структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузького лиману зроблено висновок, що поверхнево-адвективний плюм опріснених вод, який виходить з лиману до моря, у середньому багаторічному вимірі навіть влітку під дією лише сил плавучості і Коріолісу, без ефекту тертя у придонному граничному шарі, може поширюватись уздовж берега від Кінбурнської протоки у напрямку Одеської затоки на відстань не більше половини шляху до неї (25,2 км). В той же час відзначається, що потраплянню туди перехідних вод ДБЛ сприяють вітри зі сходу і генеровані ними течії. Зазначається, що південні вітри сприяють притисканню пльому до північного узбережжя ПнЗЧМ. Влітку, коли зростає повторюваність північних і західних вітрів, створюються умови, за яких плюм притискається до виходу з лиману та відтискається на південь від нього. Глибина пльому як у середньому за рік, так і в окремі місяці не досягає мінімальної глибини Кінбурнської протоки (3,7 м).

Вночі 6 червня 2023 року російські окупаційні війська підірвали греблю Каховської гідроелектростанції (ГЕС), розташованої на річці Дніпро, що спричинило екстремальний штучний паводок [10]. В результаті інтенсивного витoku води з резервуару Каховського водосховища через отвір у греблі, станом на 12.06.2023 р. у пониззя Дніпра надійшло 14,4 км³ води, що становило 72 % від об'єму вод, накопичених у водосховищі до моменту руйнування греблі (рис. 3а) та 27 % від загального об'єму середнього річного природного стоку Дніпра (53,5 км³). Для порівняння, за даними [9] місячні об'єми стоку Дніпра в першому півріччі аномально повноводного 2010 р. становили 3,95-6,66 км³. За приблизними оцінками, в перші дні після руйнування греблі витрати води через отвір в ній дорівнювали більше 40 тис. м³/с.

Мета роботи полягала у визначенні особливостей поширення в акваторії північно-західної частини Чорного моря трансформованих і забруднених вод річки Дніпро, які надійшли до моря в результаті екстремально великого штучного паводка,

викликаного руйнуванням російськими окупаційними військами греблі Каховського водосховища у червні 2023 року. Оскільки ведення бойових дій унеможливило проведення контактних океанографічних досліджень у відкритій частині моря, то для досягнення поставленої мети використовувались методи чисельного термогідродинамічного моделювання океанографічних процесів. Вирішення поставленої задачі є актуальним для оцінки збитків нанесених природним ресурсам моря, визначення масштабів можливого забруднення донних відкладів і, відповідно, вторинного забруднення морського середовища, планування його екологічного моніторингу у майбутньому.

На відміну від [10] в роботі детально розглядаються особливості поширення опріснених перехідних вод не тільки в поверхневому шарі вод, а і в 3-D просторі.

2 МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ

Модельні розрахунки розповсюдження забруднених вод на акваторії ПнЗЧМ, які надійшли з Дніпровського-Бузького лиману після руйнування греблі, виконувались із застосуванням чисельної моделі Delft3D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) – гідротермодинамічного модуля з інтегрованого пакету програм Delft3D Flexible Mesh Suite (D-HYDRO), розробленого науково-дослідним інститутом Deltares (Делфт, Нідерланди) [11]. Модель застосовує «гнучку» неструктурну розрахункову сітку («flexible mesh») по горизонталі, яка може складатися з елементів трьох-, чотирьох-, п'яти- та шестикутної форми.

Модель D-Flow FM базується на чисельному розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини на мілкій воді в наближенні Бусінеска і гідростатики. Система диференціальних рівнянь моделі складається з рівнянь руху (в горизонтальній площині), рівняння нерозривності, рівняння транспорту (тепла, солей, наносів) і двопараметричної $k-\varepsilon$ -моделі турбулентності, що замикає ці рівняння [12]. Для рівняння швидкості вертикального руху приймається гідростатичне наближення. Вертикальні компоненти векторів швидкості течії розраховуються з рівняння нерозривності.

Скінченно-об'ємну апроксимацію рівнянь моделі виконано на неструктурованій розрахунковій сітці. Сітка складається зі з'єднаних гранями вузлів (вершин), які 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.

Для моделювання наслідків прориву дамби Каховської ГЕС була згенерована неструктурована розрахункова сітка (рис. 1а), 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. 1б, 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). Рельєф дна ПнЗЧМ показаний на рисунку 2.

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. Початковий часовий крок розв'язання рівнянь моделі приймався рівним 1 секунді, максимальний – 30 секундам.

На верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавалися (з часовою дискретністю 3 години) змінні у просторі поля зональної та меридіональної компонент швидкості вітру, атмосферного тиску (приведеного до середнього рівня моря), температури та відносної вологості повітря, відсотку хмарності неба на рівномірній $0,25^\circ$ -градусній сітці, які були зчитані з архіву прогнозів глобальної моделі прогнозу погоди GFS (Global Forecast System) через веб-сервіс NOMADS (National Operational Model Archive and Distribution System) [13, 14].

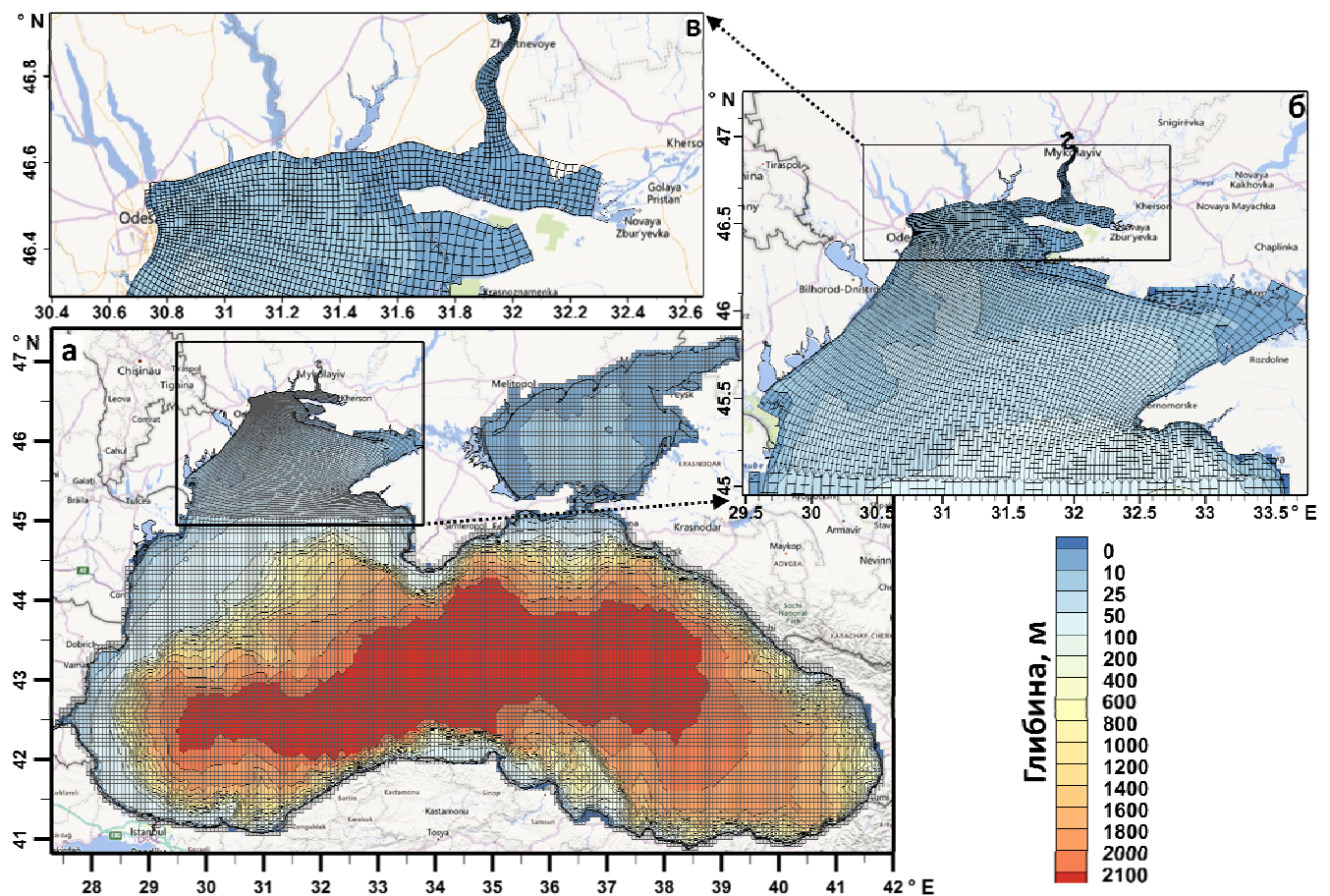


Рис. 1 – Розрахункова сітка з глибинами, що використовується в моделі для Чорного моря (а) та деталізація цієї сітки для північно-західної частини Чорного моря (б) і Дніпровсько-Бузького пригирлового району (в)

Fig. 1 – Calculation grid with depths used in the model for the Black Sea (a), and details of this grid for the northwestern part of the Black Sea (b) and the Dnipro-Bug estuarine area (c)

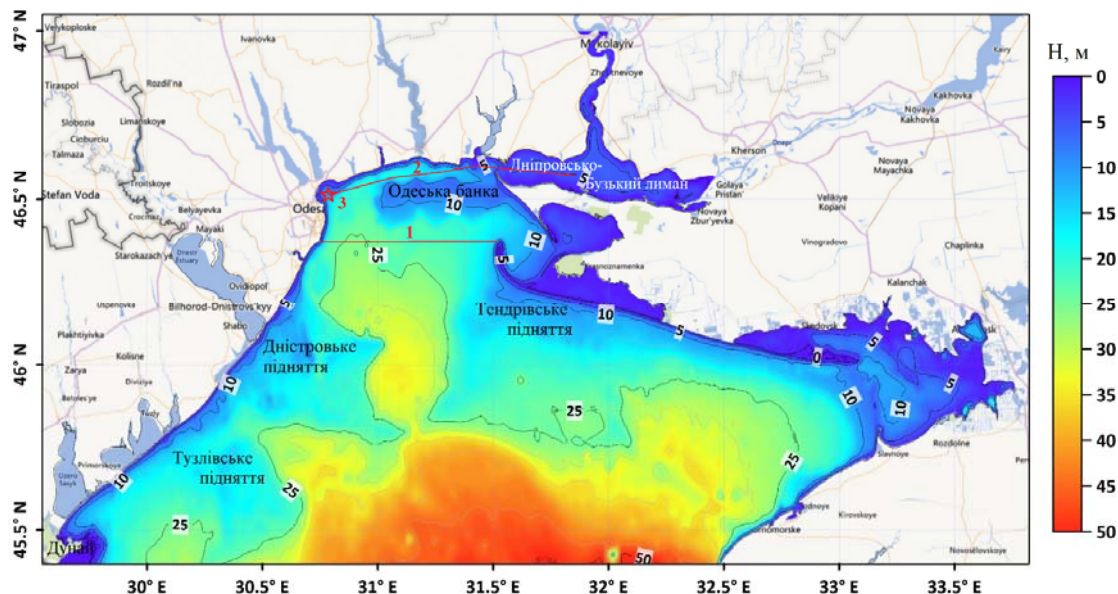


Рис. 2 – Рельєф дна північно-західної частини Чорного моря. Показані лінії перерізу (1, 2), за якими будувались вертикальні профілі солоності води, та положення контрольної точки (3).

Fig. 2 – Seabed relief of the northwestern part of the Black Sea. Shown are the cross-section lines (1, 2), along which vertical profiles of water salinity were constructed, and the position of the control point (3)

На відкритій бічній границі моделі – у гирлі р. Дніпро, задавались коливання рівня води за даними гідрологічного посту «Херсон» (рис. 3). Мінливість температури річкової води задавалась на підставі інформації з гідрологічного посту «Київ» Центральної геофізичної обсерваторії. Мінералізація річкової води приймалась рівною 2 мг/дм^3 . Вплив стоку річок Дністер і Дунай на термохалінну структуру і динаміку морських вод в акваторії ПнЗЧМ не враховувався.

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 $1/40^\circ$ [15].

Розрахунки виконувались для періоду 01.06.2023 р. – 30.06.2023 р. У якості показника проникнення трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману до моря використовувалась солоність вод. У нашому випадку солоність вод розглядається як опосередкований показник рівня забруднення акваторії ПнЗЧМ, оскільки найменш трансформованим річковим водам з низькою солоністю, які виходили з лиману, відповідали високі концентрації різного роду забруднюючих речовин, що містились у водах Каховського

водосховища, пониззя Дніпра, донних відкладах, були змиті із затоплених територій [16].

Для верифікації результатів моделювання використовувались дані спостережень за мінливістю солоності води на морській гідрометеорологічній станції «Одеса-порт». На рис. 4 зображена мінливість солоності вод в районі Одеського морського торговельного порту 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.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Обрані результати розрахунків просторово-часової мінливості солоності вод в поверхневому і придонному шарах північно-західної частини Чорного моря і, зокрема, її Дніпровсько-Бузькому районі, показані на рис. 5, 6. За результатами моделювання видно як шлейф опріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману поширювався на акваторії ПнЗЧМ. 7 червня 2023 р. він вийшов з лиману і поширювався уздовж північного узбережжя ПнЗЧМ і над Одеською банкою на захід в сторону Одеси. 9 червня шлейф досяг узбережжя м. Одеси, а 11 червня – 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 напрямку, які домінували в нічний час з

8 по 10 червня [10]. В світлу пору доби вітри значно слабшали і змінювали свій напрямок, що призводило до розширення зони опріснення (шлейфу) в сторону відкритого моря.

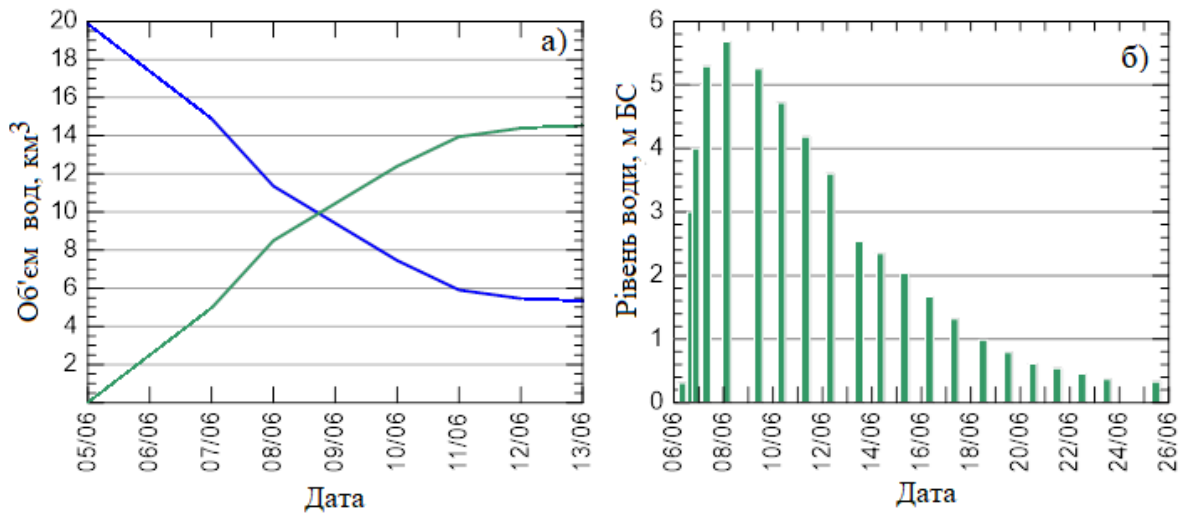


Рис. 3 – Зміни об'єму води, який залишився (блакитна лінія) у Каховському водосховищі і витік з нього (зелена лінія), в км³, (а) та відмітки рівня води на гідропосту Херсон (б)

Fig. 3 – Changes in the volume of water remaining (blue line) in the Kakhovske Reservoir and the outflow from it (green line), in km³, (a) and water level readings at the Kherson hydropost (b)

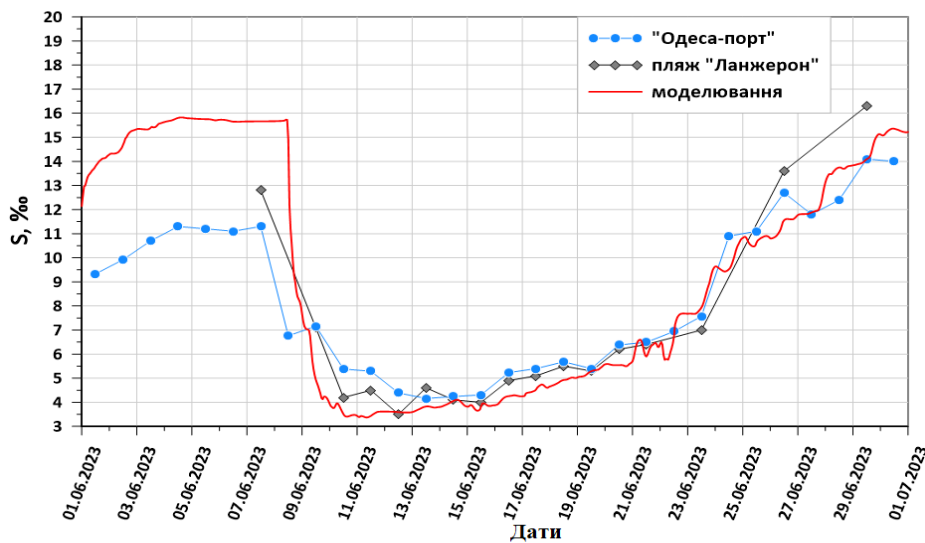


Рис. 4 – Зміни солоності води поблизу порту Одеса у червні 2023 року за даними моделювання та спостережень

Fig. 4 – Changes in water salinity near the port of Odesa in June 2023 according to modeling and observational data

14 червня шлейф опріснених вод із солоністю 6-8 ‰ досяг району розташування Тузловських лиманів. У подальшому вузький шлейф зі зниженою солоністю, 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 в приповерхневому шарі моря відбувалось поширення на південь від Одеської банки в сторону відкритого моря шлейфу опріснених вод. В третій декаді червня опріснення вод в шлейфі почало зменшуватися і 27 червня 2023 року в ньому вже не було вод із солоністю меншою за 10 ‰.

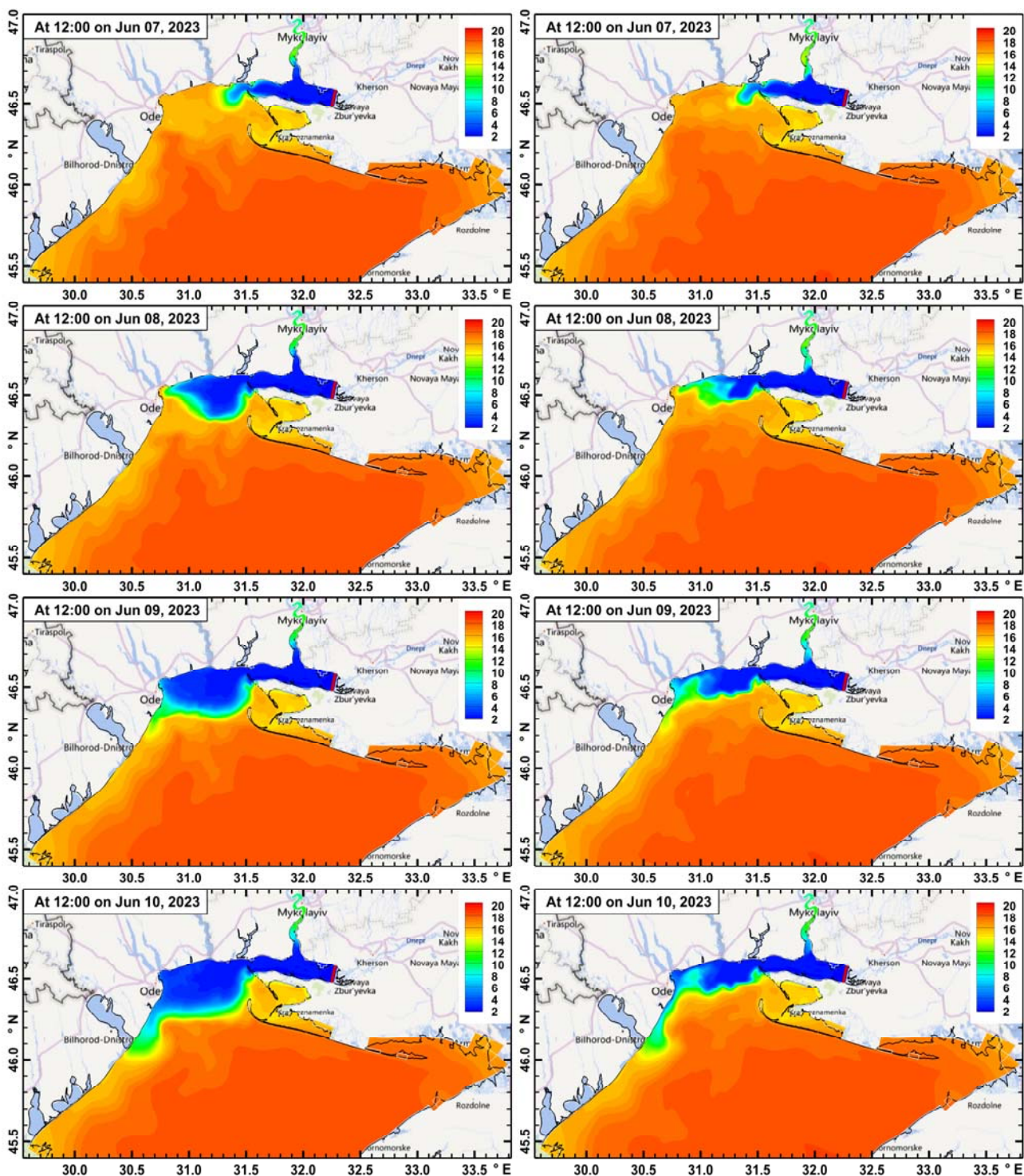


Рис. 5 – Просторовий розподіл солоності морської води на поверхні (ліворуч) і в придонному шарі (праворуч) північно-західної частини Чорного моря з 07 по 10 червня 2023 року (за результатами моделювання)
Fig. 5 – Spatial distribution of sea water salinity at the surface (left) and in the bottom layer (right) of the northwestern part of the Black Sea from June 7 to June 10, 2023 (based on modeling results)

Аналіз особливостей розповсюдження шлейфу опріснених вод з Дніпровсько-Бузького лиману на акваторії ПнЗЧМ в поверхневому і придонному шарах (рис. 5) дозволяє зробити такі узагальнюючі висновки. Ширина шлейфу

опріснених вод і, відповідно, його площа, як і слід було очікувати, у придонному шарі менша ніж у поверхневому. До середини червня потік перехідних вод із солоністю 4-6 ‰ у північного узбережжя ПнЗЧМ та над Одеською банкою

охоплює всю водну товщу від поверхні до дна. Найбільші вертикальні градієнти солоності сформувались південніше Одеської банки, де солоність в поверхневому шарі складала 4-6 ‰, а в придонному – 14-17 ‰. Розмивання шлейфу

опріснених вод в придонному шарі відбувалося значно інтенсивніше, ніж в поверхневих водах, у результаті підтоку солоних морських вод в сторону берега, зокрема, через Одеську котловину.

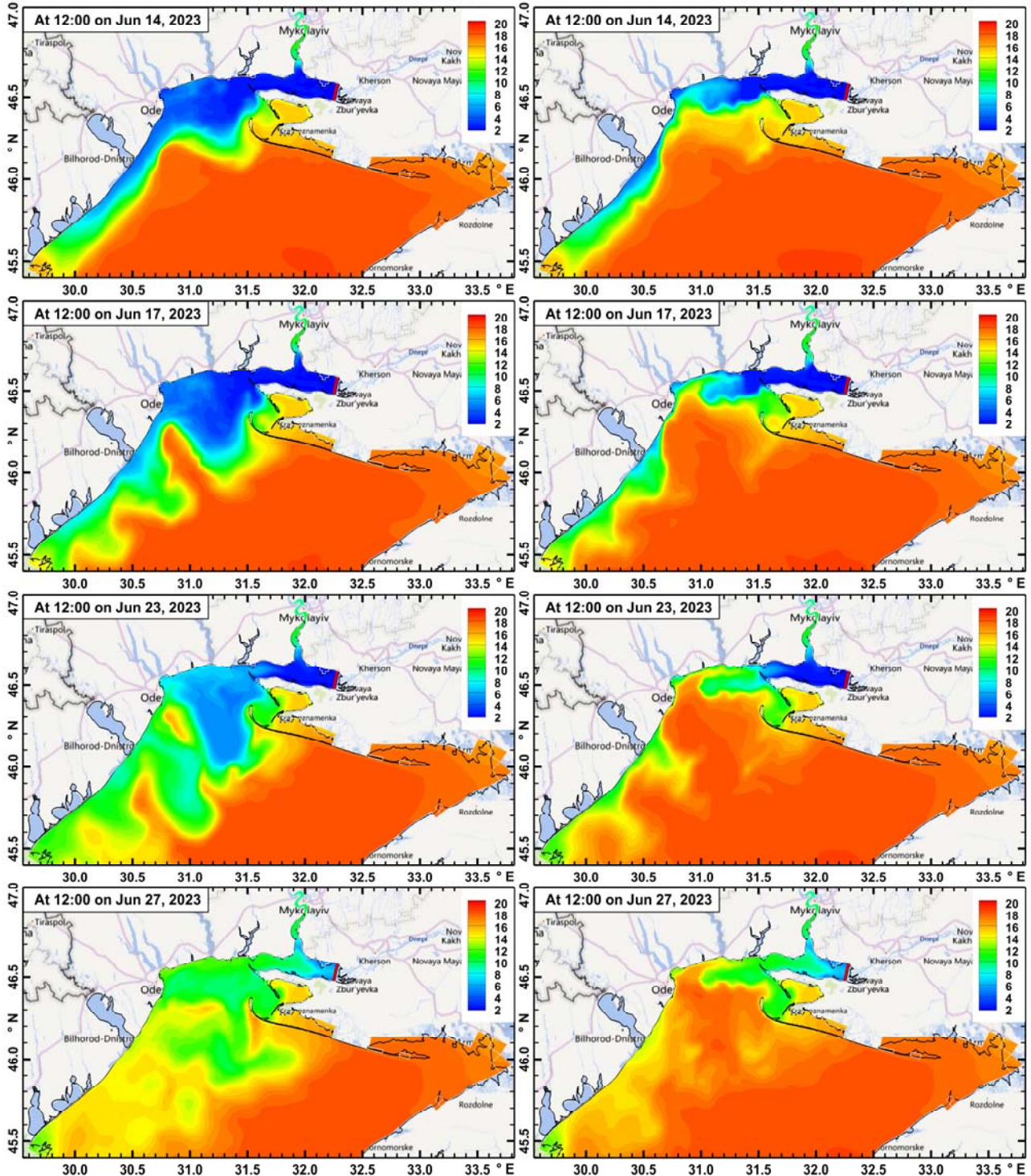


Рис. 6 – Просторовий розподіл солоності морської води на поверхні (ліворуч) і в придонному шарі (праворуч) північно-західної частини Чорного моря з 14 по 27 червня 2023 року (за результатами моделювання)
Fig. 6 – Spatial distribution of sea water salinity at the surface (left) and in the bottom layer (right) of the northwestern part of the Black Sea from June 14 to June 27, 2023 (based on modeling results)

Викладені вище висновки щодо вертикальних градієнтів солоності води підтверджуються наведеною на рис. 7, 8 динамікою вертикального розподілу солоності води. На рис. 7 показані зміни у часі розподілу за глибиною солоності води на вертикальному перерізі №2 (див. рис. 2), орієнтованому уздовж північного узбережжя ПнЗЧМ. Видно, що опріснені перехідні води з Дніпровсько-Бузького лиману поширювались не в поверхневому шарі акваторії, як це відбувається зазвичай, а охоплювали практично всю товщу води у шарі до 15 метрів. Підтік

солоні морської води відбувався спочатку епізодично (наприклад, 11 червня), а потім постійно – з 15 червня, через саму глибоку ділянку перерізу, прилеглу до Одеської котловини, з глибинами більше 15 метрів. З 20 червня солоність почала збільшуватись у всьому стовпі води за рахунок інтенсивного притоку солоних морських вод у придонному шарі. Глибина нижньої границі верхнього перемішаного опрісненого шару зменшилась до 5 метрів.

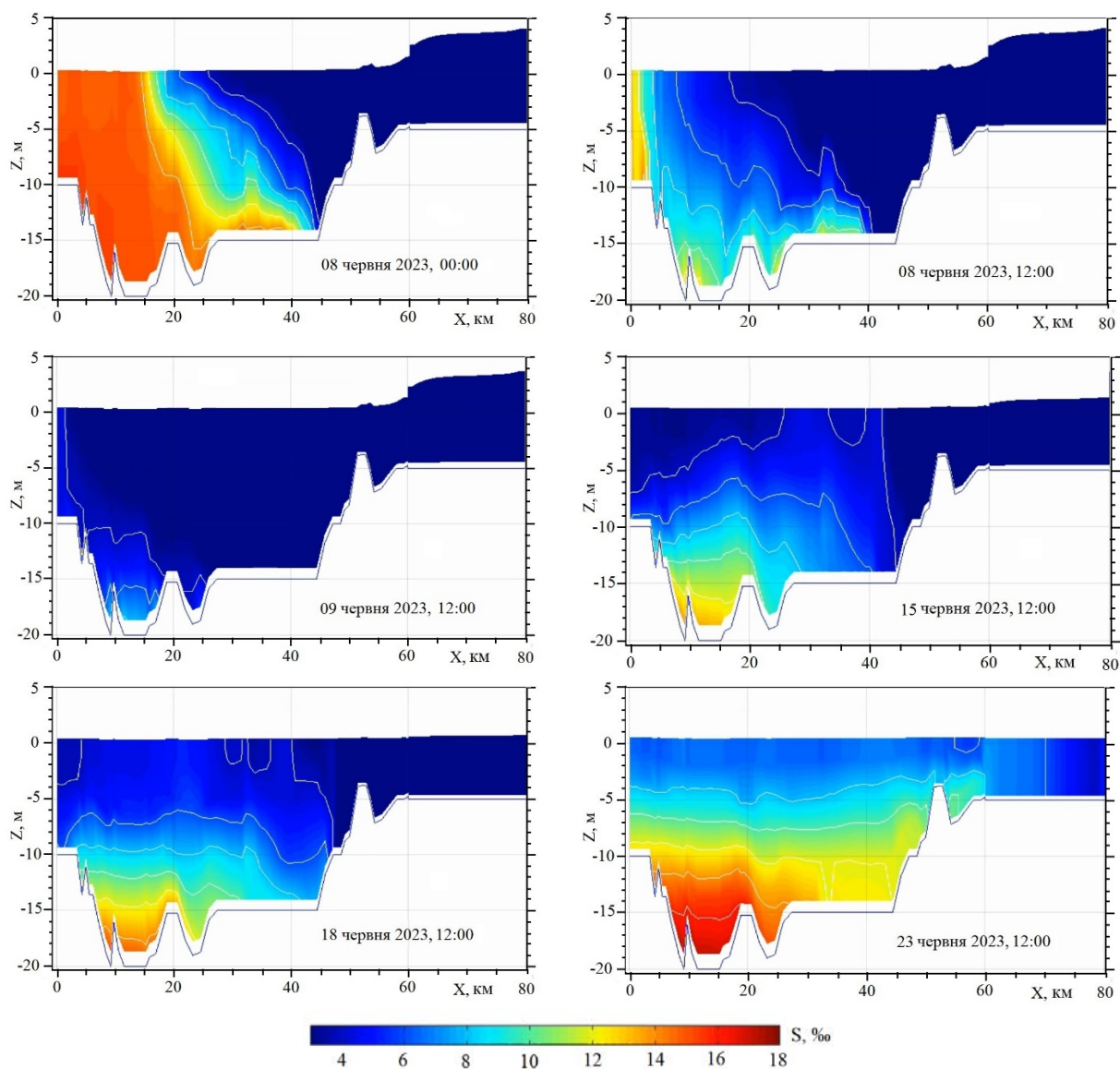


Рис. 7 – Динаміка розподілу за глибиною солоності води, ‰, на перерізі № 2 уздовж північного узбережжя Дніпровсько-Бузького пригирлового району (див. рис. 2)

Fig. 7 – Dynamics of the salinity distribution by depth, ‰, at cross-section No. 2 along the northern coast of the Dniro-Bug estuarine area (see Fig. 2).

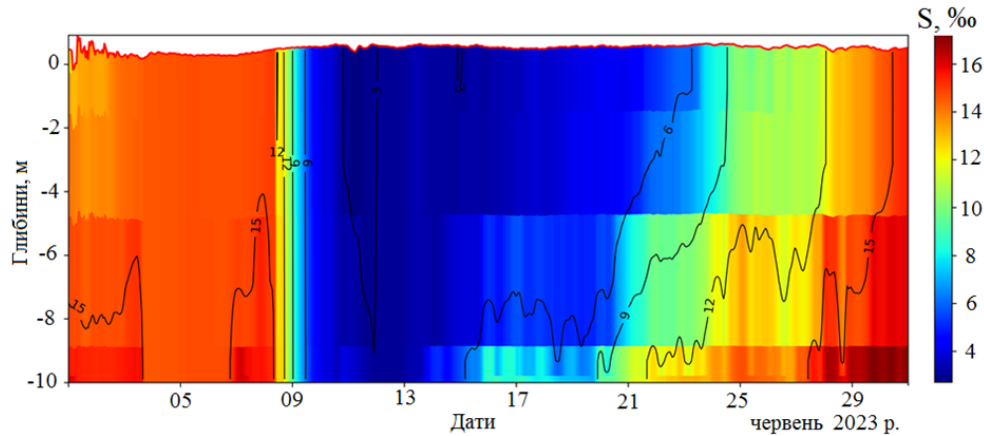


Рис. 8 – Часова мінливість вертикального розподілу солоності води, ‰, у контрольній точці (№3, див. рис. 2) протягом червня 2023 р.

Fig. 8 – Temporal variability of the vertical distribution of water salinity, ‰, at the control point (No. 3, see Fig. 2) during June 2023

Зміни вертикального розподілу солоності в контрольній точці, розташованій поблизу морської границі Одеської затоки, свідчать про різке опріснення з 15 до 6 ‰ всього 10-метрового стовпа води в період 08-10 червня. Значення солоності нижче 9 ‰ в придонному шарі зберігались до 20 червня. Після цього почалося підвищення солоності до 15 ‰ у всьому стовпі води (рис. 8).

Деяко інший характер змін вертикального розподілу солоності води встановлено за результатами моделювання на перерізі мис Великий Фонтан (Одеса) – північний край Тендрівської коси (див. рис. 2). З рис. 9 видно, що проникнення найбільш опріснених перехідних вод до лінії перерізу відбувається уздовж західного узбережжя, де води із солоністю меншою 8 ‰ проникають до глибини 20 м (11-12 червня). В той же час в центральній частині перерізу глибина проникнення опріснених вод із солоністю нижче вказаної зменшується до 10 м, а на східному кінці пересипу (біля Тендрівської коси) солоність залишається вищою за 14 ‰. 15 червня 2023 року поблизу західного узбережжя зафіксовані прояви апвелінгу, який супроводжувався підтоком солоних морських вод в придонному шарі і підйомом вод із солоністю 10-12 ‰ до поверхні моря. З часом уздовж всього перерізу товщина нижнього придонного шару солоних вод збільшується в результаті підтоку морських вод, а товщина і солоність вод верхнього опрісненого шару вод зменшуються.

Описані вище особливості розповсюдження шлейфу опріснених вод зумовлені динамікою вод на акваторії ПнЗЧМ. На рис. 10 показана просторова структура осереднених за глибиною течій в обрані дні після початку надходження

трансформованих забруднених річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману до моря. В перші дні після надходження потоку вод з Каховського водосховища до моря (7-8 червня) в Дніпровсько-Бузькому районі ПнЗЧМ домінували градієнтні стокові течії, максимальні швидкості яких мали місце в Кінбурнській протоці (2,5-3,0 м/с), а над Одеською банкою і до мису Північний Одеський вони досягали значень 0,6-0,8 м/с. Ці течії охоплювали всю товщу води уздовж північного узбережжя ПнЗЧМ і сприяли її опрісненню в результаті гідродинамічного перемішування.

З 9 червня градієнтні течії в межах Одеського району ПнЗЧМ, а пізніше і над Одеською банкою, почали слабшати. Градієнтний потік після виходу з Дніпровсько-Бузького лиману змінив свій напрям із західного (в сторону Одеси) на південний. Збільшився внесок вітрових течій у формування циркуляції вод, в результаті чого почали створюватись циркуляційні структури, наприклад, добре видний антициклонічний колооберт вод над Одеською банкою 14 червня, який пізніше збільшився у розмірах і змістився на південь. Водночас південніше лінії мис Великий Фонтан (Одеса) – північний край Тендрівської коси, домінували градієнтні густинні течії, які сформували інтенсивний струменевий потік на границі фронтального розділу опріснених вод у північній частині ПнЗЧМ (включно з Одеською банкою і Одеським районом) та солоних морських вод південніше. З часом гідрофронт і струмінь градієнтної густинної течії зміщувались на південь. Після 20 червня можна говорити про розмивання градієнтної густинної течії і початок домінування спричиненої вітром циркуляції вод.

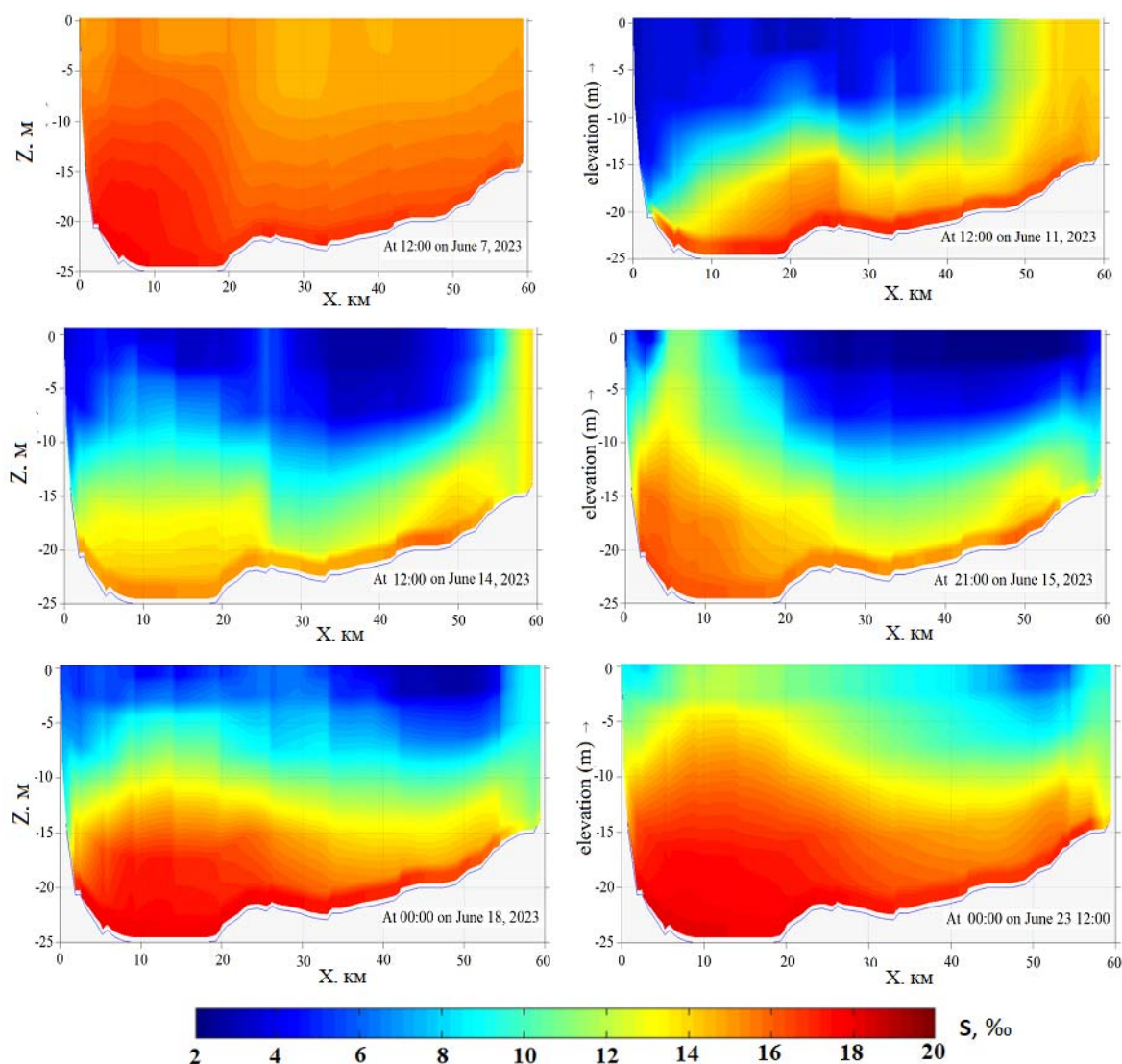


Рис. 9 – Динаміка вертикального розподілу солоності води, ‰, на перерізі №1 мис Великий Фонтан (Одеса) – північний край Тендрівської коси (див. рис. 2)

Fig 9 - Dynamics of vertical distribution of water salinity, ‰, at the cross-section No 1 from Cape Velykyi Fountain (Odesa) to the northern end of Tendra Spit (see Fig. 2)

4 ВИСНОВКИ

Ведення активних бойових дій на акваторії і в прибережних зонах північно-західної частини Чорного моря унеможливило проведення контактних польових експедиційних досліджень для встановлення особливостей надходження до моря великих обсягів опріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману в результаті підриву російськими окупаційними військами греблі Каховського водосховища у червні 2023 року. Між тим, така інформація є необхідною для передбачення довгострокових наслідків для морської екосистеми надходження

різних типів забруднення вод і донних відкладів, організації екологічного моніторингу, оцінки збитків нанесених природним ресурсам моря і їх мінімізації.

За результатами гідродинамічного моделювання із використанням моделі *Delft3D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM)* встановлено, що в перші дні після руйнування греблі Каховського водосховища розповсюдження опріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману відбувалося в Дніпровсько-Бузькому районі ПнЗЧМ в межах

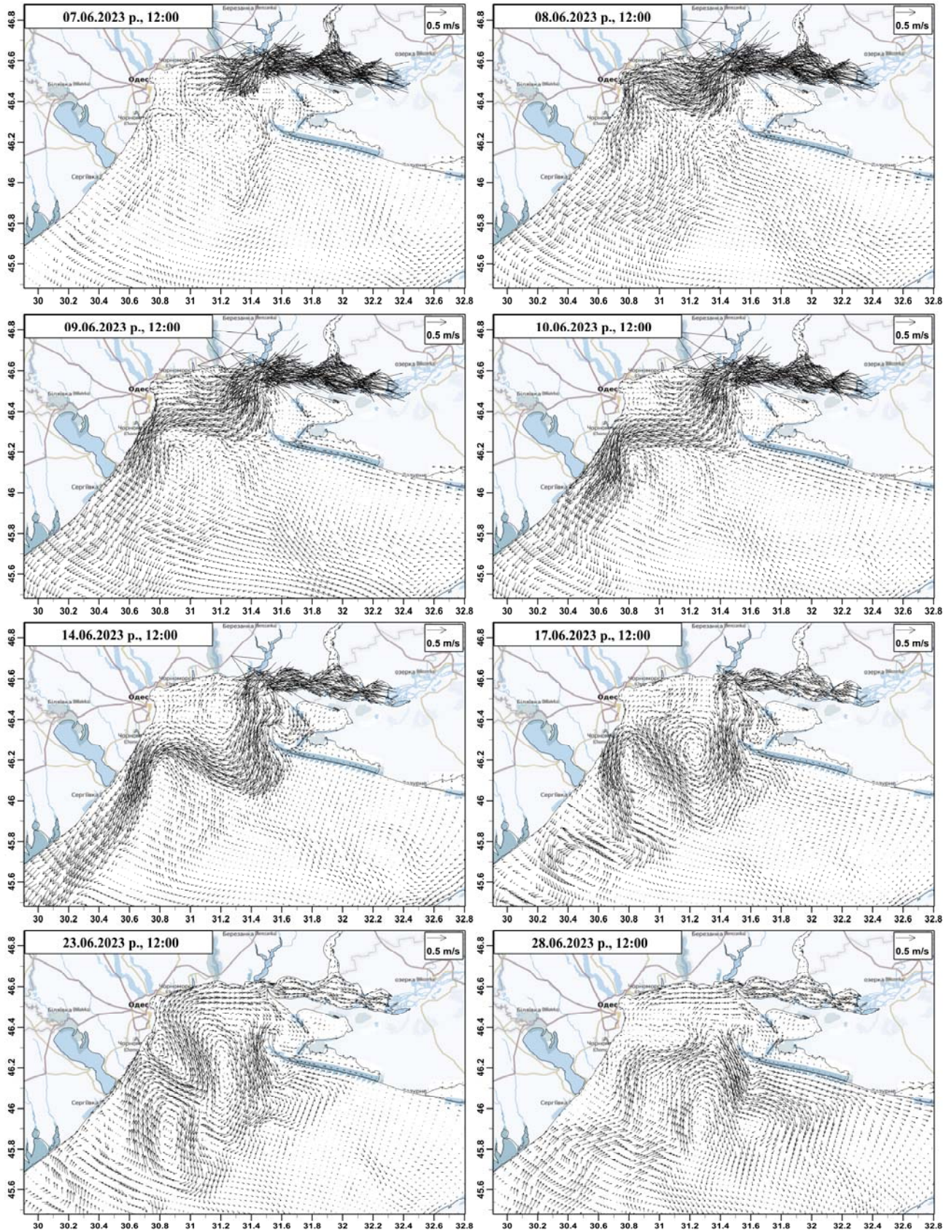


Рис. 10 – Поля векторів осередненої за глибиною швидкості течії, m s^{-1} , на акваторії північно-західної частини Чорного моря в період з 07 по 27 червня 2023 року за результатами моделювання

Fig. 10 – 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 27 June 2023 based on simulation results

усієї товщі шару вод від поверхні до 15-20 м, а не тільки тонкого приповерхневого шару, як зазвичай, тобто було нетиповим. До середини червня потік перехідних вод із солоністю 4-6 ‰ у північного узбережжя ПнЗЧМ та над Одеською банкою охоплював всю водну товщу від поверхні до дна. Цьому сприяли надвеликі обсяги надходження трансформованих річкових вод Дніпра протягом короткого часу, внаслідок руйнування греблі, а також спричинені цим інтенсивні градієнтні течії і перемішування, зумовлене просторовими градієнтами швидкості генерованих течій. Отже, забруднені трансформовані річкові води контактували з бентосними організмами і донними відкладами на ділянках акваторії Дніпровсько-Бузького району ПнЗЧМ з глибинами до 15 метрів. Внаслідок цього вони могли негативно впливати на умови існування бентосних організмів, викликати їх пригнічення або загибель, а також призвести до акумуляції забруднювальних речовин в донних відкладах внаслідок адсорбції та біоаккумуляції.

З іншого боку, ширина шлейфу опріснених вод і, відповідно, його площа, закономірно у придонному шарі була меншою, ніж у поверхневому. Найбільші вертикальні градієнти солоності сформувались південніше Одеської банки, де солоність в поверхневому шарі складала 4-6 ‰, а в придонному – 14-17 ‰. Розмивання шлейфу опріснених вод в придонному шарі відбувалося значно інтенсивніше, ніж в поверхневих водах.

Характер циркуляції вод в північній частині ПнЗЧМ в перші дні після надходження перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману визначався стоковими градієнтними течіями, які потім змінилися вітровими течіями в Одеському районі і над Одеською банкою, а південніше – меандруючим потоком градієнтних густинних течій.

Отримані результати сприяють кращому розумінню впливу надходження трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману на мінливість океанографічних характеристик і екологічний стан морських вод в Дніпровсько-Бузькому районі північно-західної частини Чорного моря.

У подальшому гідротермодинамічну модель *Delft3D Flow Flexible Mesh* планується використовувати як базу в автоматизованій системі діагнозу і оперативного прогнозу океанографічних та екологічних параметрів

стану морського середовища української частини акваторії Азово-Чорноморського басейну [17].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Большаков В. С. Трансформация речных вод в Черном море: монография. Киев: Наукова думка, 1970. 328 с.
2. Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И., Берлинский Н. А., Гончаров А.Ю. Районирование украинского сектора северо-западной части Черного моря (по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам). *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь: НАН Украины, МГИ. 2000. С. 9-24.
3. 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. 445-451.
4. Иванов В. А., Тучковенко Ю. С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем : монография / Морской гидроф. ин-т НАН Украины, Одес. гос. экол. ун-т. Севастополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
5. 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/>
6. Ільїн Ю. П. Середній стан та сезонна мінливість структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузької гирлової області. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. 32. С. 63-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.05>
7. Ильин Ю. П. Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря. *Научные труды УкрНИГМИ*. 2006. Вып.255. С. 242-251.
8. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР: Справочник. Т. 4. Черное море. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 99 с.
9. Доценко С. А., Адобовский В. В. Аномальные гидрологические явления в Одесском районе северо-западной части Черного моря в первой половине 2010 г. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2011. 25(1). С. 228-233.
10. Особливості розповсюдження в Чорному морі розприснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману після руйнування греблі Каховського водосховища / Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В., Овчарук В. А., Соколов А. В., Коморін В. М. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023, (32). С. 95-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.07>
11. D-Flow Flexible Mesh Module / Deltares. Delft, the Netherlands, 2024. URL: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-fm-suite/modules/d-flow-flexible-mesh> (дата звернення: 17.06.2024 р.).

12. Deltares. D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, Version: 2024, Revision: 79054. Delft, the Netherlands URL: https://content.oss.deltares.nl/dhydro/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (дата звернення: 17.06.2024 р.).
13. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (дата звернення: 17.06.2024 р.).
14. The GFS Atmospheric Model. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (дата звернення: 17.06.2024 р.).
15. Black Sea Physics Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). DOI: https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5 (дата звернення: 17.06.2024 р.).
16. 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>
17. Кушнір Д. В., Тучковенко Ю. С., Попов Ю. І. Результати адаптації та верифікації комплексу інтегрованих чисельних моделей для прогнозування мінливості океанографічних характеристик в північно-східній частині Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. (23). С. 95-108. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09>
6. Ilyin, Y.P. (2023). Average condition and seasonal variability of the structure and dynamics of transitional waters in the Dnieper-Bug estuary region. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (32), pp. 63-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.05> (in Ukr.)
7. Ilyin, Yu.P. (2006) *Gidrologicheskiy rezhim rasprostraneniya rechnykh vod v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya* [Hydrological regime of river water distribution in the northwestern part of the Black Sea]. *Scientific works of UkrNIGMI*, 255, pp.242-251(in Russ.).
8. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR: Spravochnik. T. 4. Chernoe more. 1986* [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR: Reference book. T. 4. Black Sea]. Leningrad: Hydrometeoizdat (in Russ.)
9. Dotsenko, S. & Adobovsky, V. (2011) Anomal'nye gidrologicheskie yavleniya v Odesskom rayone severo-zapadnoy chasti Chernogo morya v pervoy polovine 2010 g. [Anomalous hydrological phenomena in the Odessa region of the northwestern part of the Black Sea in the first half of 2010]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa* [Ecological safety of coastal and the shelf zones and complex use of shelf resources], 25(1), pp. 228–233. (in Russ.).
10. Tuchkovenko, Y.S., Kushnir, D.V., Ovcharuk, V.A., Sokolov, A.V., & Komorin, V.M. (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), pp.95-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.07>
11. *D-Flow Flexible Mesh Module* / Deltares. Delft, the Netherlands, 2024. Available at: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-fm-suite/modules/d-flow-flexible-mesh> (Accessed: 17.06.2024 p.).
12. *Deltares (2024). D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, Version: 2024, Revision: 79054*. Delft, the Netherlands. Available at: https://content.oss.deltares.nl/dhydro/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (Accessed: 17.06.2024 p.).
13. *NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive*. Available at: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (Accessed: 17.06.2024 p.).
14. The GFS Atmospheric Model. Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (Accessed: 17.06.2024 p.).
15. *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
16. 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.)
17. Kushnir, D. V., Tuchkovenko, Y. S., & Popov, Y. I. (2019). Results of adaptation and verification of the coupled numerical models set for predicting the variation of oceanographic features in the North-Western part of the Black Sea. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (23), 95-108. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09>

REFERENCES

THE IMPACT OF THE DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DAM ON THE OCEANOGRAPHIC CONDITIONS IN THE NORTH-WESTERN PART OF THE BLACK SEA ACCORDING TO THE RESULTS OF MODELING

Yu. S. Tuchkovenko^{1,2}, D. V. Kushnir¹, A. V. Torgonskyi¹, V. M. Komorin⁴

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

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

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

Based on the results of numerical modelling, characteristic features of distribution of transformed and polluted waters of the Dnieper River in the water area of the north-western part of the Black Sea (NWBS) are determined and analyzed. This pollution of the marine environment resulted from the extremely large man-made flood caused by the destruction of the Kakhovka Reservoir dam by the Russian occupation forces in June 2023. Various types of pollutants, which contained in the Kakhovka Reservoir, in the lower Dnieper River and in the bottom sediments, were carried out into the sea by the flood discharge. A significant amount of pollutants was washed into the sea from the flooded areas of the lower Dnieper basin. Special attention is given to changes in oceanographic conditions in the Dnieper-Bug estuary region (DBR) of the Black Sea, which determine the extent of marine pollution. Sea water salinity was used as an indicator of the degree of infiltration of polluted seawater from the estuary into the sea. It was identified that the least transformed river waters with low salinity correspond to high pollution levels. Delft3D-Flow Flexible Mesh hydrodynamic model, developed by Deltares, was used in this study. The simulation was performed for the time period 01 to 30 June 2023.

During the first days after the dam break the desalinated and polluted transitional waters, flowing from the Dnieper-Bug estuary, spread over the entire water column down to 15-20 m depth in the DBR area. In this case, the spreading of transitional waters was atypical, as it usually occurs only within the thin near-surface layer of the sea. By mid-June the flow of transitional water with a salinity of 4-6 ‰ covered the entire water column from surface to bottom near the northern coast of the NWBS and over the Odessa Bank. This was facilitated by the supermassive volumes of transformed Dnieper river waters flowing out over a short period of time due to dam break, as well as by the resulting intense gradient currents and mixing caused by spatial gradients in the velocity of the generated currents. The width of the desalinated water plume and its area in the bottom layer were smaller than in the surface layer. The largest vertical salinity gradients were formed to the south of the Odessa Bank, where salinity was 4-6 ‰ in the surface layer and 14-17 ‰ in the bottom. Dilution of the desalinated water plume in the bottom water layer was much more intensive than in the surface water.

The character of water circulation pattern in the northern part of the NWBS in the first days after the inflow of transient waters from the Dnieper-Bug estuary was determined by the runoff gradient currents, which later were replaced by wind-driven currents in the Odessa area and over the Odessa Bank, and by the meandering flow of gradient density currents further south.

The findings of this study contribute to a better understanding of the impact of the inflow of transformed river waters from the Dnieper-Bug estuary on the variability of oceanographic characteristics and the ecological state of marine waters in the Dnieper-Bug region of the northwestern Black Sea.

Keywords: dam break; Kakhovka Reservoir; Black Sea; north-western part; transitional waters distribution; modeling.

*Подання до редакції : 15. 04. 2024
Надходження остаточної версії : 20. 04. 2024
Публікація статті : 25. 04. 2024*