

МОРСЬКА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЯ ТА ОКЕАНОГРАФІЯ

Ю.С. Тучковенко^{1,2*}

ORCID: 0000-0003-3275-9065
tuch2001@ukr.net

Д.В. Кушнір¹

ORCID: 0000-0003-4556-0143
dkush@ukr.net

О.С. Матигін³

ORCID: 0000-0002-0206-3414
asm32alex@ukr.net

¹ Одеський національний
університет
імені І. І. Мечникова,
Одеса, Україна

² Інститут морської біології
НАН України,
Одеса, Україна

³ Гідрометцентр Чорного
та Азовського морів,
Одеса, Україна

УДК 551.465/.466:551.468 DOI: <https://doi.org/ua/10.15407/Meteorology2025.08.040>

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ МІНЛИВОСТІ ОКЕАНОГРАФІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В УКРАЇНСЬКОМУ СЕКТОРІ АКВАТОРІЇ ЧОРНОГО МОРЯ В ШТОРМОВІ ПЕРІОДИ ЛИСТОПАДА 2023 РОКУ

Розглядаються результати застосування комплексу інтегрованих між собою чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) та спектральної хвильової моделі SWAN (вітро-хвильовий блок D-Waves) в імітаційному режимі для відтворення просторово-часової мінливості океанографічних характеристик у Чорному морі та його північно-західній частині в штормові періоди листопада 2023 року. Моделювання виконувалось у межах процедури верифікації модельного комплексу. У якості атмосферного форсінгу застосовувались метеорологічні дані, отримані з архіву прогнозів глобальної чисельної моделі прогнозу погоди GFS (Global Forecasting System). Результати моделювання порівнювались із даними спостережень за океанографічними характеристиками на прибережних гідрометеорологічних станціях портів Одеського району північно-західної частини Чорного моря (Чорноморськ, Одеса, Південний). Додатково результати моделювання вітрового хвилювання, отримані із застосуванням модельного комплексу, порівнювались із результатами незалежного моделювання за допомогою спектральної хвильової моделі WAM Cycle 6 із використанням даних реаналізу вітру Європейського центру середньострокових прогнозів погоди ECMWF. Застосування модельного комплексу дозволило відтворити цілісну картину просторово-часової мінливості океанографічних характеристик в штормові періоди листопада 2023 року як на акваторії всього Чорного моря, так і в його північно-західній частині. Отримано добру кількісну та якісну узгодженість між результатами моделювання мінливості рівня моря, висот вітрових хвиль, температури морської води та даними спостережень на гідрометеорологічних станціях у районі морських портів Одеського району. Зроблений висновок, що вказаний комплекс інтегрованих чисельних математичних моделей D-Flow FM + D-Waves (SWAN), реалізований на неструктурованій розрахунковій сітці, має добрі перспективи використання в системі діагнозу і оперативного прогнозу мінливості океанографічних параметрів стану морського середовища Чорного моря та його окремих районів.

Ключові слова: Чорне море, океанографічні характеристики, моделювання мінливості, верифікація результатів.

ВСТУП

Розробка та забезпечення функціонування сучасної системи діагнозу і оперативного прогнозу океанографічних та екологічних параметрів стану морського середовища української частини акваторії Азово-Чорноморського басейну для забезпечення потреб господарчих об'єктів морегосподарчого комплексу, ВМС України відноситься до питань безпеки та забезпечення обороноздатності України. Від гідрометеорологічної інформації, яка міститься в морських прогнозах, залежить економічна ефективність та безпека функціонування морського транспорту, портово-промислових і рекреаційних

комплексів, розташованих на морському узбережжі, промислового рибальства та господарств морської аквакультури, об'єктів видобутку корисних копалин із морського шельфу, успішність виконання пошуково-рятувальних операцій ДСНС України, бойових завдань ВМС України, зокрема, пов'язаних із ефективним застосуванням морських надводних та підводних дронів.

Необхідність мати функціонуючий в оперативному режимі автоматизований модельний комплекс для діагнозу і прогнозу океанографічних та екологічних умов в Чорному та Азовському морях продемонструвала екологічна катастрофа, пов'язана

з руйнуванням греблі Каховської ГЕС та надходженням забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману.

Для прогнозування океанографічних характеристик у світі використовуються ланцюги метеорологічних та океанографічних моделей. На підставі таких ланцюгів моделей створюються прогностичні системи, які працюють в оперативному режимі (Veeramony et al., 2018; Solano et al., 2018; Valchev et al., 2018).

У 2017-2019 рр. в Одеському державному екологічному університеті був розроблений і верифікований автоматизований програмний комплекс чисельних математичних моделей для оперативного короткочасного (до 5 діб) прогнозу мінливості океанографічних характеристик в акваторіях Чорного та Азовського морів (Кушнір та ін., 2019; Тучковенко та ін., 2020; Тучковенко та ін., 2021). У сучасний період авторами виконуються роботи з розвитку та удосконалення цього модельного комплексу шляхом заміни базової гідротермодинамічної моделі Delft3D-FLOW на модель нового покоління Delft3D Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) (Deltares, 2025). Модельні гідротермодинамічні розрахунки за цією моделлю виконуються на неструктурованій розрахунковій сітці, яка дозволяє поєднувати в межах однієї розрахункової області ділянки з різною просторовою розрізненістю для деталізації результатів розрахунків у прибережних регіонах із збереженням прийняттого часу проведення обчислень на робочій станції.

Програмні продукти модельного комплексу Delft3D широко використовуються для вирішення прикладних задач діагнозу і прогнозу океанографічних характеристик вод морського шельфу в країнах, розташованих на північно-західному шельфі Європи (Zijl et al., 2018; Grasmeijer et al., 2022), в США (Habib & Zarillo, 2023), Австралії (Matala et al., 2023), країнах Азії (Duong et al., 2018).

Для Чорного моря Інститутом океанології Болгарської академії наук (м. Варна, Болгарія) на основі пакету Delft3D була розроблена і впроваджена в практичну діяльність мультидоменна система прогнозування для акваторії Варненської затоки з урахуванням прибережної зони та портової інфраструктури (Valchev et al., 2018). Для вироблення 8-денного прогнозу небезпечних стихійних явищ у районі порту Варна ланцюг інтегрованих моделей Delft3D FLOW-WAVE застосовується послідовно на трьох ділянках: Чорне море, болгарська частина чорноморського шельфу і Варненська затока. У якості вхідних метеорологічних даних система використовує розраховані поля метеопараметрів із глобальної прогностичної системи GFS (Global

Forecasting System) (з просторовою розрізненістю 1/4 градуси).

Метою цієї роботи є оприлюднення результатів апробації оновленого модельного комплексу D-Flow FM + D-Waves (SWAN) в імітаційному режимі для опису мінливості океанографічних характеристик у Чорному морі та його північно-західній частині в штормові періоди листопада 2023 року.

Синоптична ситуація в листопаді 2023 року.

Головною кліматичною особливістю північного Причорномор'я є так звані "листопадові" шторми Чорного моря в період осіннього похолодання, коли зберігається відносно висока температура морської води (понад 10°C). У першу і другу декади листопада 2023 р. погодні умови в Азово-Чорноморському басейні визначали атлантичні циклони і улоговини холоду, які переміщалися над північними районами Європи. У третю декаду на зміну їм прийшли південні циклони "Phil" та "Oliver", які й зумовили найнесприятливіші погодні умови. 25–28 листопада 2023 р. штормова погода визначалася дією південного циклону на ім'я "Phil", а 28–29 листопада — циклоном "Oliver" (рис. 1).

Циклон "Phil" був потужним та глибоким, супроводжувався досить сильними вітрами та завірюхами у Болгарії, Румунії, Молдові та Україні з червоними кодами небезпеки. Циклон отримав максимальний розвиток над теплими водами Чорного моря у другій половині дня і ввечері 26 листопада (о 12:00 UTC було зафіксовано надзвичайно низьке значення тиску в центральній частині циклону в кількох десятках кілометрів на захід від мису Тарханкут (Крим) — 969 гПа). Високі градієнти тиску в тилівій частині циклону генерували штормові пориви вітру до 20–30 м·с⁻¹, як у прибережній зоні, так і над акваторією моря. На метеостанції "Вілкове" було зафіксовано надзвичайну швидкість вітру — 35 м·с⁻¹. Вітер такої сили на Одещині не спостерігався дуже давно. Останній раз у м. Одесі швидкість вітру 40 м·с⁻¹ була зафіксована 10 березня 1970 року та у січні 1962 р. Висоти хвиль у відкритій акваторії північно-західної частини Чорного моря 26–27 листопада сягали 6 м, а у прибережній смузі Румунії та України — 3–4 м.

Слідом за циклоном "Phil" на північне Причорномор'я почав свій вихід черговий циклон "Oliver" (рис. 1), траєкторія переміщення його центру проходила трохи на захід від шторм-треку "Phil". Цей циклон утворився у північній Атлантиці, але зміщувався через центральну Європу, Балкани і далі траєкторією південних циклонів на регіон північного Причорномор'я. 28–29 листопада 2023 року тут повторилися екстремальні погодні умови з помаранчевими кодами небезпеки в Румунії та Словаччині за швидкістю вітру та опадів.

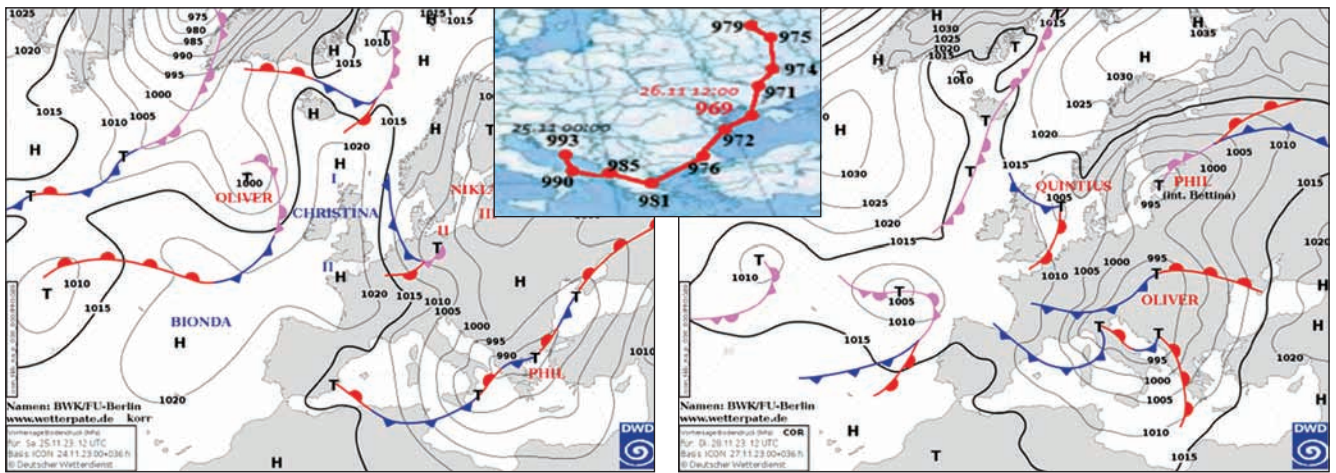


Рис. 1. Прогностичні карти на 12:00 UTC 25 листопада 2023 р. (ліворуч) та 12:00 UTC 28 листопада 2023 р. (праворуч), на яких показано розташування циклонів "Phil" та "Oliver" (www.wetterpate.de), а також траєкторія та тиск на рівні моря (в гПа) у центрі циклону "Phil". Часові інтервали між точками графіка становлять 6 годин, початкова точка (на південному заході) відповідає 25.11.2023 р. (00:00 UTC) — кінцева 26.11.2023 р. (18:00 UTC)

У період вказаних штормів 26–29 листопада 2023 р. у всіх портах Одеського району були практично одночасно зафіксовані екстремально високі підйоми та спади рівня моря, а також рекордні значення швидкості зміни та амплітуди коливань рівня.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для відтворення штормових умов у північно-західній частині Чорного моря в листопаді 2023 року та комплексного аналізу просторово-часової мінливості океанографічних характеристик використовувався комплекс інтегрованих між собою чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh (гідродинамічний блок D-Flow FM) (Deltares, 2025) та спектральної хвильової моделі SWAN — Simulating Waves Nearshore (вітрохвильовий блок D-Waves) (Deltares, 2024a).

Проведено моделювання мінливості рівня моря, морських течій, термохалінних характеристик морської води, параметрів вітрових хвиль у період із 01.11.2023 р. до 30.11.2023 р.. Верифікація отриманих у результаті моделювання результатів виконувалась шляхом їх порівняння з даними натурних спостережень на прибережних морських гідрометеорологічних станціях "Одеса-порт", "порт Південний" та "порт Чорноморськ".

Для проведення модельних розрахунків була згенерована базова неструктурна розрахункова сітка, яка покривала акваторію Чорного та Азовського морів. Сітка складається з 22494 розрахункових комірок (23128 вузлів) із перемінними розмірами $\Delta x_y = 500\text{--}6500$ м (рис. 2а) та містить області зі збільшеною просторовою роздільною здатністю для регіонів північно-західної частини Чорного моря (рис. 2б). Крок за часом для розв'язання рівнянь

моделі D-Flow FM під час розрахунків визначався автоматично в межах 1–30 с. Коефіцієнт Манінга для розрахунку донного тертя задавався неоднорідним для модельованої акваторії в діапазоні 0,018–0,022. У вертикальній площині, у розрахунках із використанням гідротермодинамічної моделі, використовувалася криволінійна σ -система вертикальних координат із 7 розрахунковими рівнями нерівномірної товщини: найтонші шари розташовані біля поверхні і у дна.

Модель SWAN блоку D-Waves комплексу інтегрованих моделей працювала у нестационарному режимі для всіх розрахункових областей з метою адекватного моделювання параметрів вітрового хвилювання під час штормових вітрів. Кутова деталізація моделі SWAN дорівнювала 10° . Для частотної координати застосовувалась шкала з 24 вузлами в діапазоні частот 0,03–1,0 Гц. Для параметризації донного тертя моделі SWAN була обрана модель JONSWAP, а коефіцієнт донного тертя приймався рівним 0,038 для всієї розрахункової області.

У якості атмосферного форсінгу при моделюванні на верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавалися (з часовою дискретністю 3 години): змінні у просторі поля зональної і меридіональної компонент швидкості вітру, атмосферного тиску (приведеного до середнього рівня моря), температури та відносної вологості повітря, балу хмарності неба — на рівномірній просторовій сітці з горизонтальним кроком $0,25^\circ$ (широти/довготи), 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) (GFS, 2003; NCEP GFS, 2024). Процедура зчитування

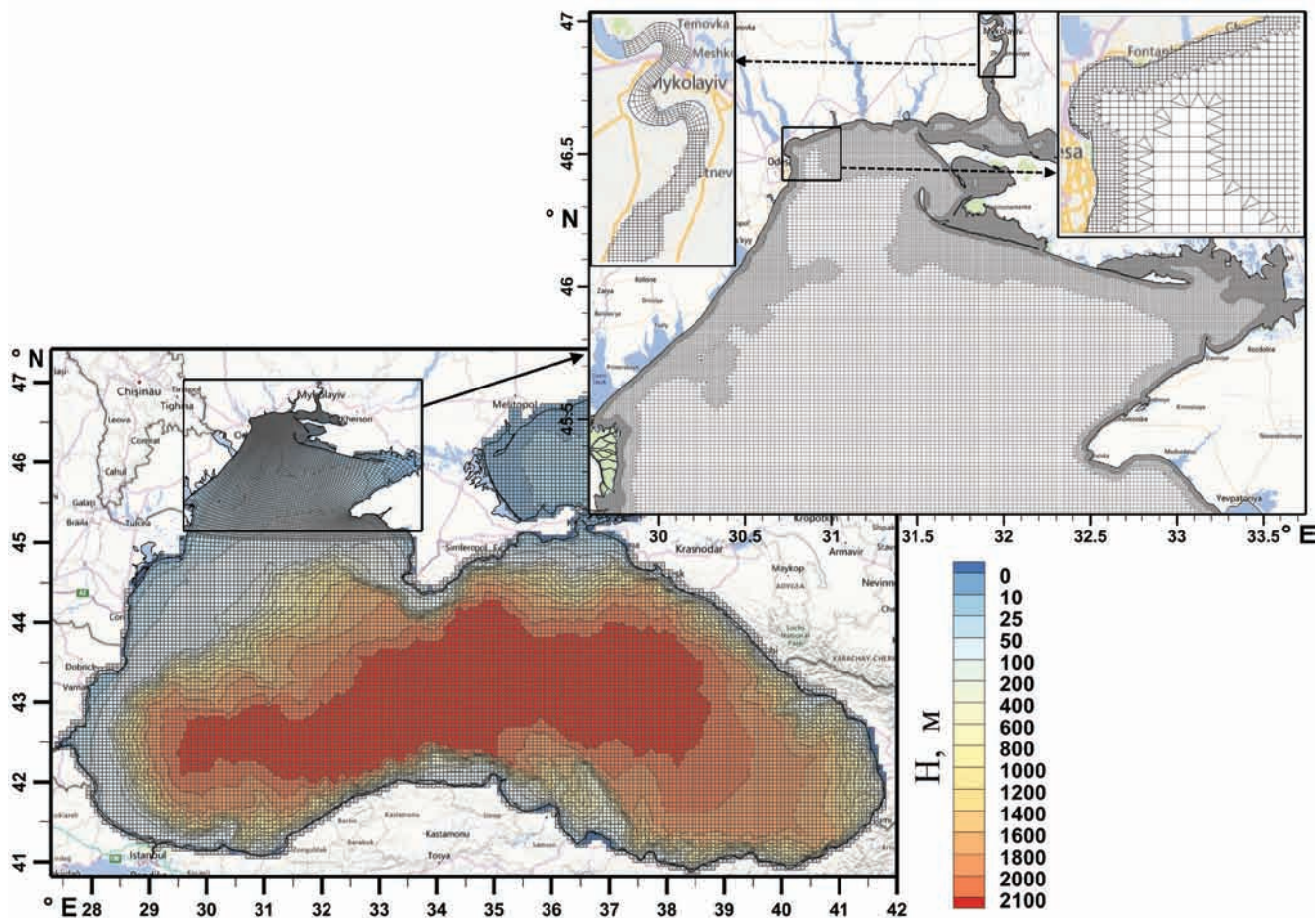


Рис. 2. Базова розрахункова сітка із глибинами, яка використовується у моделі для всього Чорного моря (а). Деталізована неструктурована сітка для моделювання у північно-західній частині Чорного моря (б)

описана в (Кушнір та ін., 2019; Тучковенко та ін., 2020; Тучковенко та ін., 2021).

Початковий просторовий розподіл температури і солоності морської води, рівня моря задавався за результатами модельних розрахунків із горизонтальним кроком $1/40^\circ$ на основі даних реаналізу, отриманих з веб-ресурсу Copernicus Monitoring Environment Marine Service (Jansen et al., 2022). Ці поля інтерполювались у вузли розрахункової сітки моделі за допомогою програми Delta Shell (Deltares, 2024b), розробки інституту Deltares.

При розрахунках із використанням комплексу інтегрованих моделей, хвильовий модуль D-Waves засвоює поля зональних та меридіональних компонентів швидкості вітру з моделі GFS та отримує через буфер обміну з гідродинамічного модуля D-Flow FM поля течій та рівня моря для розрахунку трансформації вітрових хвиль. Розраховані в модулі D-Waves параметри вітрового хвилювання (висоти, періоди, напрямок поширення хвиль) передаються в он-лайн режимі до гідродинамічного модуля для обліку внеску хвильових процесів у формування

прибережних течій, процесів турбулентного перемішування вод, коливань рівня моря.

Розрахунки виконуються у два етапи. На першому етапі моделювання виконувались розрахунки мінливості рівня моря, течій, вітрового хвилювання, температури та солоності морської води, термохалінної структури вод для всієї акваторії Чорного моря на загальній (базовій) сітці (рис. 2а). Результати першого етапу моделювання використовувались для завдання граничних умов на бічній (відкритій морській) границі деталізованої розрахункової сітки для північно-західної частини Чорного моря (рис. 2б) у вигляді часових рядів мінливості рівня моря, солоності і температури води, хвильового спектру, отриманих із розрахунків на базовій сітці.

РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 3 представлені результати моделювання мінливості рівня моря в точці координатами $46,516^\circ$ пн. ш., $30,785^\circ$ сх. д., що знаходиться в центрі Одеської затоки. З рисунка видно, що модельний комплекс досить добре описує зміни рівня

у прибережній зоні за різних синоптичних ситуацій, що розвивалися у листопаді 2023 року. Наприкінці листопаду (26.11–30.11.2023 р.), коли денівеляції рівня моря визначалися вітровим впливом глибоких циклонів “Phil” і “Oliver”, що проходили послідовно, у порту Одеса спостерігалися надзвичайно різкі зміни рівня моря — амплітуда коливань досягла значення 180 см. Швидкість падіння рівня 26 листопада досягала $0,16 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$. Через відносно малі розміри циклонів та швидке їх переміщення у північно-східному напрямку, спостерігалася різка зміна напрямку вектору швидкості вітру. Вітер північного-північно-західного напрямку зі швидкістю $12\text{--}25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, який спостерігався 26.11.2023 р., 28 листопада змінився на південний зі швидкістю $15\text{--}25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Це призвело до різких, стрибкоподібних змін рівня моря: згін (падіння рівня моря до позначки $-0,4 \text{ м}$), який спостерігався 26 листопада, змінився сильним нагоном (із підвищенням відмітки рівня моря до $+1,2 \text{ м}$), зафіксованим 29 листопада (рис. 3). Максимальна швидкість падіння рівня моря досягала $0,16 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$, а безперервний протягом 40 годин підйом рівня відбувався зі середньою швидкістю $0,04 \text{ м}\cdot\text{год}^{-1}$.

Модель достовірно, відповідно до синоптичних ситуацій і даних спостережень, описує зміни просторової структури полів коливань рівня моря, викликаних дією вітра на акваторії північно-західного шельфу Чорного моря в цілому. На рис. 4 показані отримані при моделюванні поля викликаних вітром денівеляцій рівня моря в момент згону на $0,8 \text{ м}$ 26.11.2023 р. на півночі північно-західного шельфу і в момент значного нагону на $1,3 \text{ м}$, що відбувся за ним, зафіксованого там же 29.11.2023 р. Одночасно з цим, вітрове поле, що сформувалося при проходженні циклону “Phil”, викликало 26 листопада локальний нагін водних мас більш ніж на $1,3 \text{ м}$ у східній частині Каркінітської затоки, який послабився до $0,85 \text{ м}$, але зберігся 29.11.2023 р. і став частиною загального великомасштабного нагону у Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі ПнЗЧМ.

Наслідком різких змін рівня моря в останню декаду листопада 2023 року стали сильні течії у вузькостях, зокрема, в районах Кінбурнської, Тендровської та Джарилгацької кіс. Про це свідчать показані на рис. 5 змодельовані поля течій, швидкість яких досягала близько $1,0\text{--}1,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у районах Джарил-

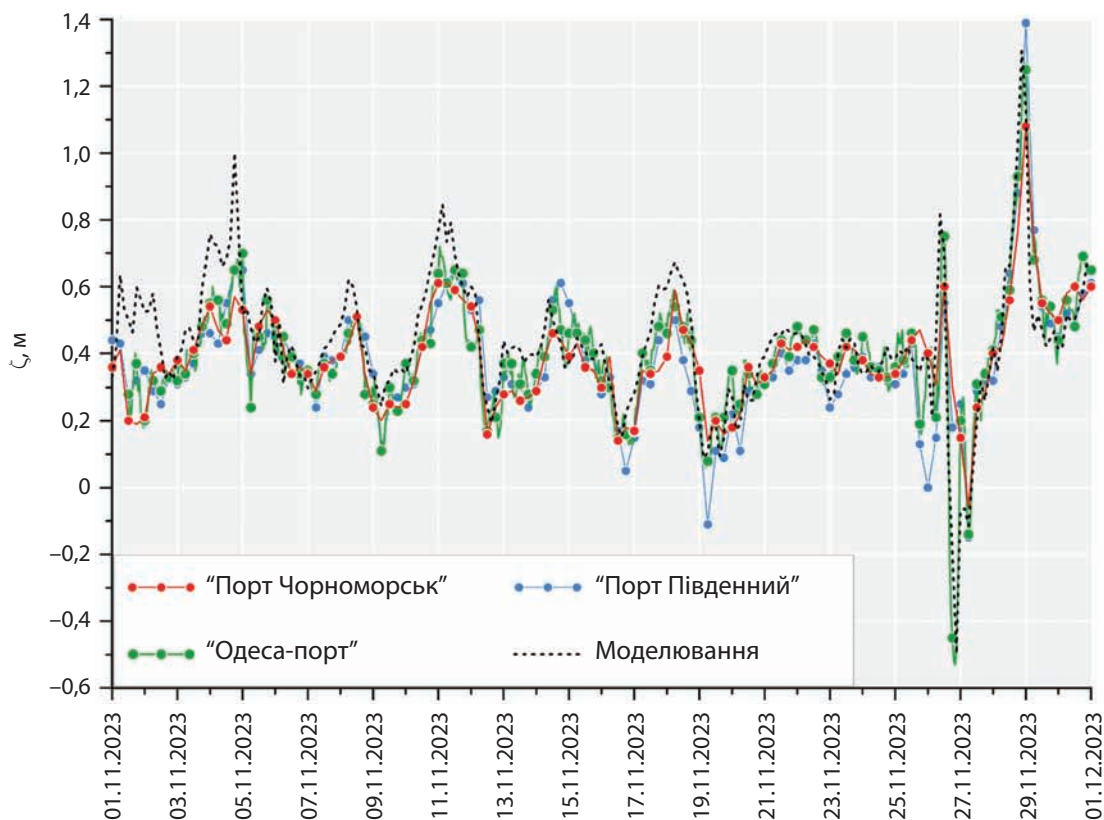


Рис. 3. Зміни рівня моря, відносно початкової позначки $-0,4 \text{ м}$ БС, у листопаді 2023 року, отримані за даними спостережень із дискретністю 6 годин на прибережних морських гідрометеорологічних станціях “Одеса-порт” (зелені точки), “порт Південний” (сині точки), “порт Чорноморськ” (червоні точки) та за результатами моделювання (пунктир) у точці з координатами $46,516^\circ$ пн. ш., $30,785^\circ$ сх. д.

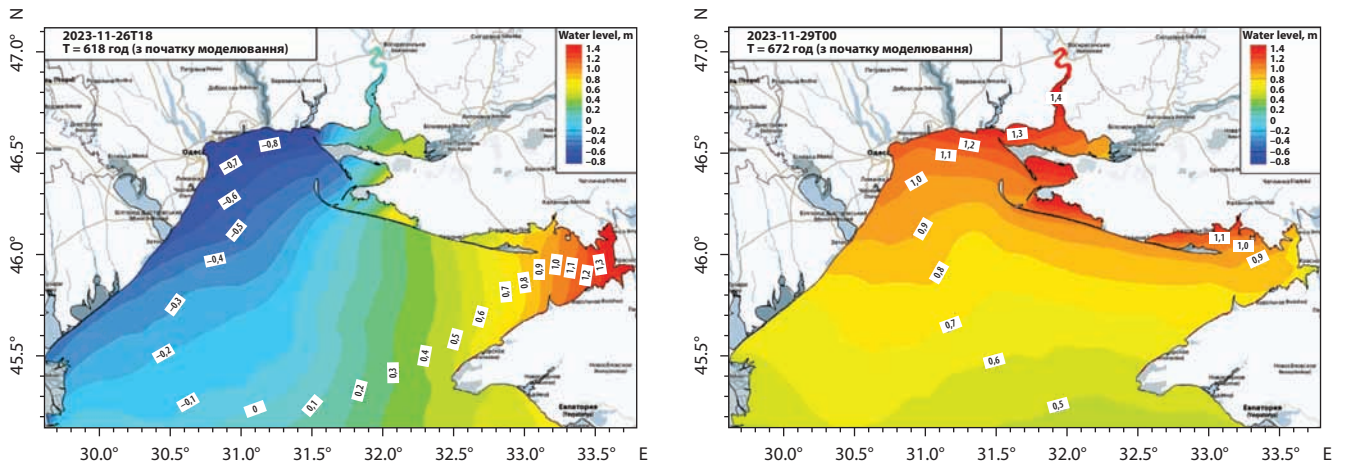
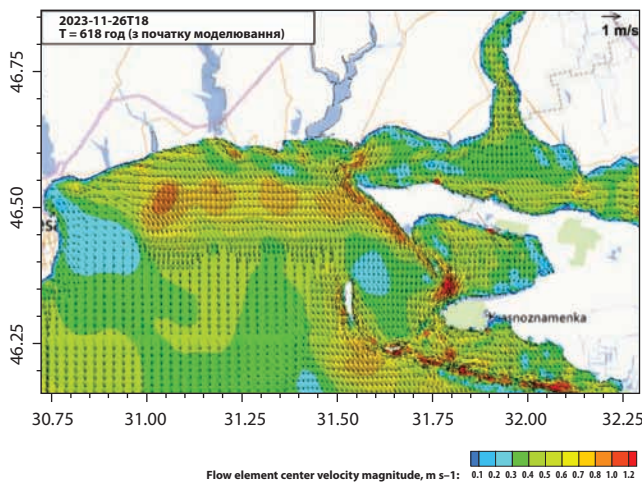
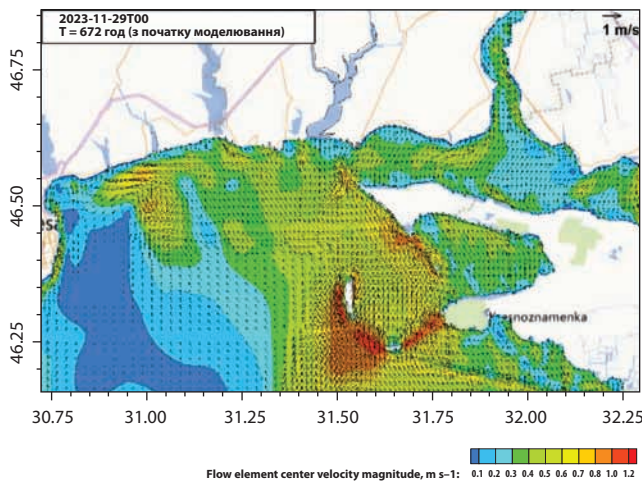


Рис. 4. Просторовий розподіл викликаних вітром денівеляцій рівня моря, м, отриманий за результатами моделювання на 18:00 26 листопада 2023 р. (ліворуч) при проходженні циклону "Phil" та на 00:00 29 листопада 2023 р. під час проходження циклону "Oliver" (праворуч)



Джарилгацька коса



Тендрівська коса



Рис. 5. Поля векторів та модуля швидкості поверхневих течій, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, отримані в результаті моделювання (ліворуч) для 18:00 26 листопада 2023 р. (зверху) та 00:00 29 листопада 2023 р. (знизу), а також супутникові зображення кіс на початку та після штормів

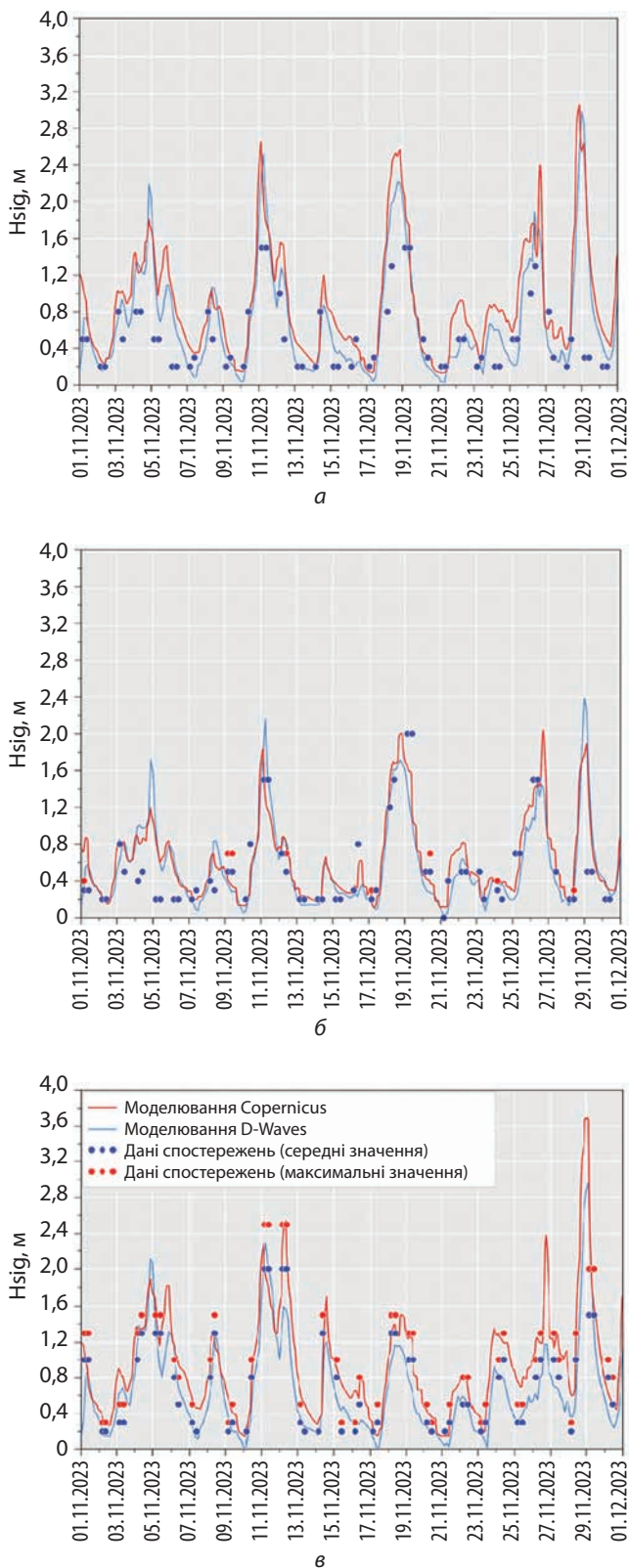


Рис. 6. Мінливість висот вітрових хвиль, м, у листопаді 2023 року, в районах підходів до портів Чорноморськ (а), Одеса (б), Південний (в) за даними візуальних спостережень на відповідних ГМС та за результатами моделювання (значних висот хвиль) із застосуванням модельного комплексу D-Waves + D-Flow FM та зчитаних із веб-ресурсу Copernicus

гацької (26.11.2023 р.) та Тендровської (29.11.2023 р.) кіс, внаслідок чого вони зазнали значних руйнувань. Аналіз супутникових знімків показав, що стихійне лихо помітно змінило вигляд цих територій. Штормові хвилі та течії утворили сім промоїн на Тендровській і три — на Джарилгацькій косі. Піщаний пляж зменшився на 70–100 метрів.

Мінливість просторового розподілу висот значних хвиль та середнього напрямку поширення хвилювання в районах розташування морських портів Одеської агломерації на акваторії ПнЗЧМ обумовлена особливостями трансформації та рефракції вітрових хвиль при вході їх у зони малих глибин із відкритого моря. Зазначимо, що максимальні висоти хвиль у портах східного узбережжя ПнЗЧМ, включно з портом Одеса, спостерігаються переважно у період тривалої дії вітру північно-східного та східного напрямків (Гидрометеорологические..., 2012). У районі порту Південний на північному узбережжі Одеського району ПнЗЧМ висота хвиль досягає максимальних значень при посиленні вітрів південних румбів. Також слід зазначити, що спостереження за хвилюванням проводяться на всіх українських морських ГМС виключно візуально у світлу пору року, що потрібно враховувати при порівнянні натурних та модельних даних.

На рис. 6 наведені результати моделювання часової мінливості протягом листопада 2023 року значних висот хвиль на підході до портів Одеського району ПнЗЧМ, отримані із застосуванням комплексу інтегрованих моделей D-Waves + D-Flow FM. Для верифікації отриманих результатів використовувались дані візуальних спостережень в світлу пору дня на портових гідрометеорологічних станціях, а також результати незалежного моделювання вітрового хвилювання за допомогою спектральної хвильової моделі WAM Cycle 6 із використанням даних реаналізу вітру Європейського центру середньострокових прогнозів погоди ECMWF, взяті з веб-ресурсу Copernicus (Staneva et al, 2022). Результати моделювання мінливості значних висот хвиль, розрахованих із використанням хвильових моделей SWAN (D-Waves) та WAM (CMEMS), добре узгоджуються між собою і, в цілому, з даними спостережень. Результати розрахунків за моделлю WAM Cycle 6 із атмосферним форсингом з реаналізу ECMWF дають у ряді випадків трохи більші висоти хвиль, ніж отримані із використанням SWAN (D-Waves)/GFS (наприклад, у другій половині листопада в порту Південний, рис. 6в).

Порівняльний аналіз результатів моделювання із застосуванням двох незалежних модельних комплексів із даними спостережень дозволяє діагностувати і можливі похибки прогнозу вітрового

хвилювання. Наприклад, спостереження на ГМС "порт Чорноморськ" і "Одеса-порт" не зафіксували збільшення висот вітрових хвиль 29 листопада 2023 року, в той час як модельні розрахунки у всіх трьох портах показали наявність їх різкого зростання до максимальних значень. Такі розбіжності можуть бути викликані похибками у розрахунку напрямку вітру і, відповідно, розповсюдження вітрового хвилювання, і, як наслідок, відмінностями у довжинах розгону хвиль.

Уявлення про просторову мінливість висот вітрових хвиль на акваторії всього Чорного моря в період проходження штормів у листопаді 2023 року дають результати моделювання із застосуванням модельного комплексу D-Waves + D-Flow FM, представлені на рис. 7. Видно, що висота хвиль у районах морських портів Одещини була значно меншою, ніж у відкритих районах моря, через обмежену берегами довжину розгону (вітер дув від північного і північно-західного берегів (рис. 7а-в) або вплив від-

носно малих глибин (рис. 7г). Наприклад, 19.11.2023 року висота значних хвиль в акваторії західної частини Чорного моря досягала 7,0–8,5 м, а 26.11.2023 року — 7,0–8,5 м в центральній частині моря.

На останок розгляду результатів верифікації гідротермодинамічної моделі D-Flow FM для ПнЗЧМ наведемо результати моделювання поверхневої температури морської води в точці з координатами 46,516° пн. ш., 30,785° сх. д. (на межі Одеської затоки), які порівнюються із даними натурних спостережень на ГМС "порт Південний", "Одеса-порт" та "порт Чорноморськ" (рис. 8). У цілому, модель добре відтворює процес охолодження поверхневої водної маси на близько 9°C протягом листопада 2023 р. Найбільша відповідність між змодельованими та спостереженими значеннями температури води має місце для портів "Одеса" та "Чорноморськ". Значення температури води за даними ГМС "порт Південний" знаходяться дещо нижче змодельованих (у середньому на 0,9°C). Зауважимо, що в пе-

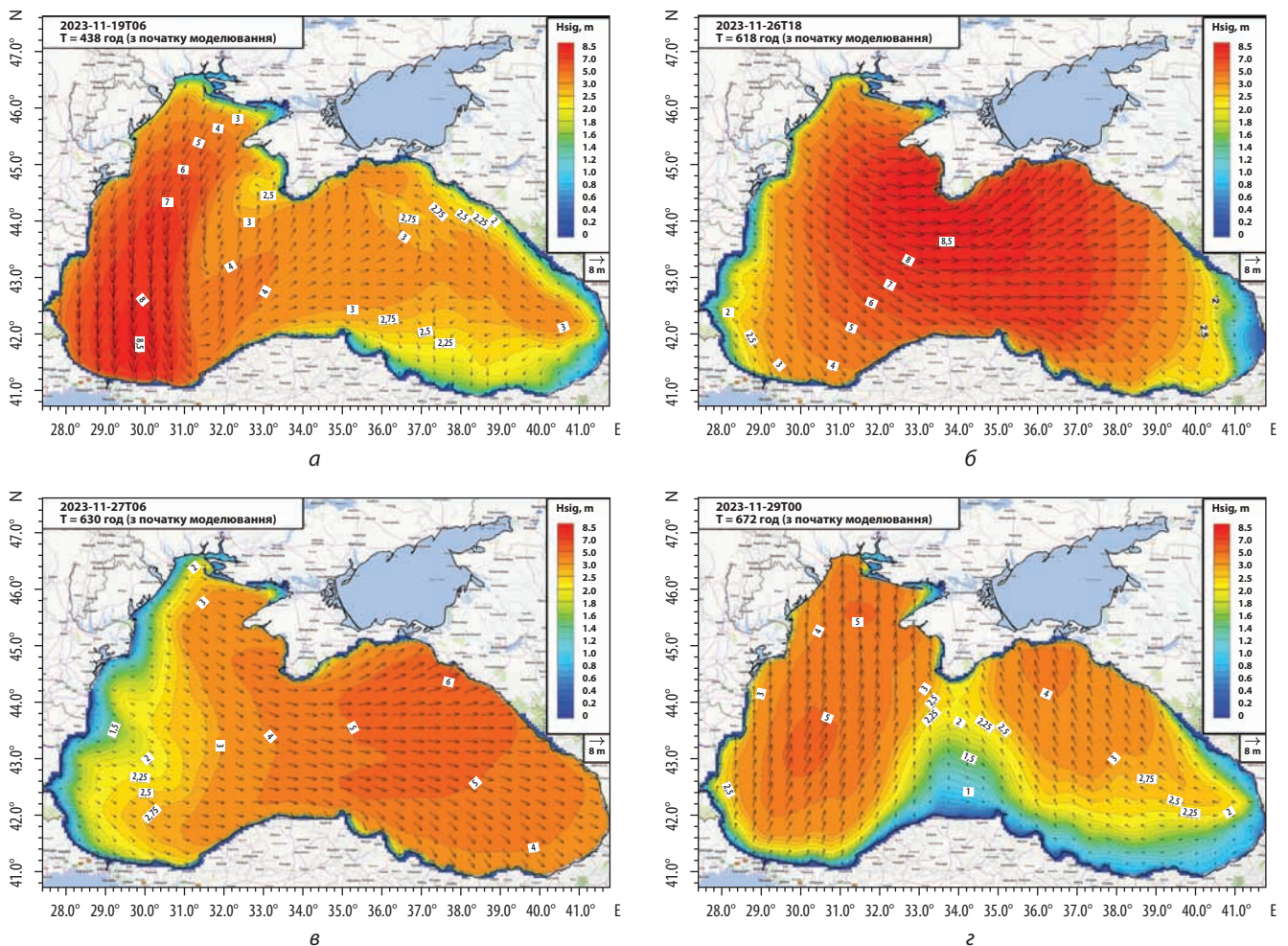


Рис. 7. Поле значних висот хвиль, м, та векторів середнього напрямку хвиль, отримане за результатами моделювання при проходженні циклонів "Linas" — 19.11.2023 р. 06:00 (а); "Phil" — 26.11.2023 р. 06:00 (б) та 27.11.2023 р. 06:00 (в); "Oliver" — 29.11.2023 р. 00:00 (г)

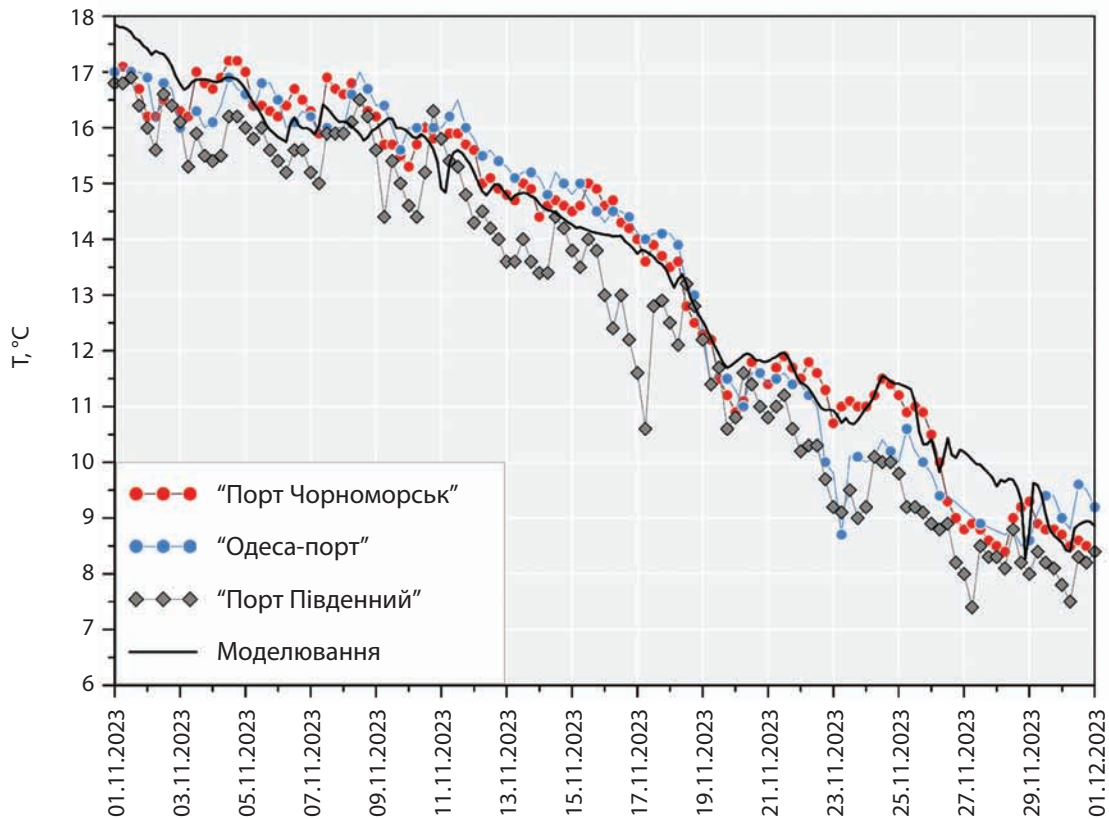


Рис. 8. Результати моделювання температури морської води, °С, у поверхневому шарі вод (чорна крива) та дані натурних спостережень за температурою води протягом листопада 2023 р. на морських припортових ГМС (точки)

ріод пізньої осені на температуру води значний вплив надає глибина місця (шару), якій охоплюється конвективним перемішуванням. На мілководді вихолоджування відбувається інтенсивніше. Це підтверджують результати моделювання просторового розподілу температури поверхневого шару води наведені на *рис. 9*.

Солоність морської води в період моделювання змінювалась в акваторіях поблизу морських портів Одеського району ПнЗЧМ незначно — у межах декількох проміле. Тому, у рамках цієї статті, обговорювати її мінливість із точки зору верифікації модельних результатів не має сенсу.

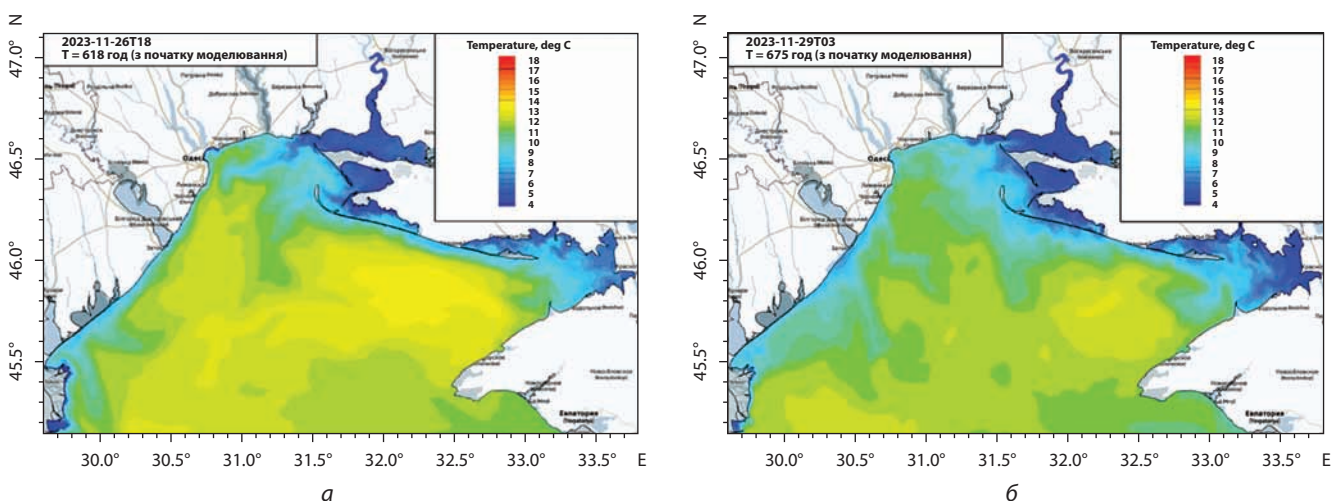


Рис. 9. Поля температури води, °С, у поверхневому шарі ПнЗЧМ, отримані за результатами моделювання: а — 18:00 26.11.2023 р.; б — 03:00 29.11.2023 р.

ВИСНОВКИ

Використання комплексу інтегрованих між собою чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh (гідродинамічний блок D-Flow FM) і спектральної хвильової моделі SWAN (вітрохвильовий блок D-Waves), із засвоєнням метеорологічних даних із архіву прогнозів глобальної атмосферної моделі GFS, дозволило відтворити цілісну картину просторово-часової мінливості океанографічних характеристик в штормові періоди листопада 2023 року, як на акваторії всього Чорного моря, так і в його північно-західній частині. Отримано добру кількісну та якісну узгодженість між результатами моделювання мінливості рівня моря, висот вітрових хвиль, температури морської води та даними спостережень на ГМС у районі морських портів Одеської агломерації (Одеса, Чорноморськ, Південний).

Отримані результати свідчать, що вказаний комплекс інтегрованих чисельних математичних моделей D-Flow FM + D-Waves (SWAN) має добрі

перспективи використання в системі діагнозу і оперативного прогнозу мінливості океанографічних параметрів стану морського середовища Чорного моря та його окремих районів.

У подальшому планується продовжити роботи з випробування оновленої версії автоматизованого модельного комплексу для визначення його спроможності адекватно відтворювати такі океанографічні процеси як розповсюдження трансформованих річкових вод на акваторії північно-західної частини Чорного моря в паводкові періоди, прибережний апвелінг у літню пору року, мінливість термохалінної структури вод.

Подяка. Дослідження здійснено в Одеському національному університеті імені І.І. Мечникова в рамках виконання НДР за фінансуванням МОН України “Діагноз та прогноз океанографічних умов в акваторіях Чорного та Азовського морів для забезпечення гідрометеорологічної безпеки України” (2024–2026 рр., номер державної реєстрації 0124U000 771).

ЛІТЕРАТУРА

- Гидрометеорологические условия морей Украины (2012). Т. 2: Черное море / Ильин, Ю.П., Репетин, Л.Н., Белокопытов, В.Н., Горячкин, Ю.Н., Дьяков, Н.Н., Кубряков, А.А., Станичный, С.В.; МЧС и НАН Украины, Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. Севастополь, 2012, 307–340.
- Тучковенко Ю.С., Гаврилюк Р.В., Кушнір Д.В. (2021). Прогнозування океанографічних характеристик в українській частині Азово-Чорноморського басейну: монографія / Одеський державний екологічний університет, Одеса: ОДЕКУ. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9344/>
- Кушнір, Д.В., Тучковенко, Ю.С., Попов, Ю.І. (2019). Результати адаптації та верифікації комплексу інтегрованих чисельних моделей для прогнозування мінливості океанографічних характеристик в північно-західній частині Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*, **23**, 95–108. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09>
- Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В., Гончаренко, Р.В., Титюк, Т.Г., Щипцов, О.А. (2020). Автоматизований модельний комплекс для забезпечення діяльності Військово-Морських Сил України оперативними прогнозами океанографічних умов. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України ім. І. Черняхівського*, **3(70)**, 75–83. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83>
- Deltares (2025, April 22). D-Flow Flexible Mesh — Computational Cores and User Interface — User Manual, released for: Delft3D FM Suite 2D3D 2025, version: 2025, revision: 80249. Deltares, Delft, the Netherlands. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf
- Deltares (2024a, December 24). D-Waves. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual, version: 1.20, revision: 79761. Deltares, Delft, the Netherlands. 146 pp. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/D-Waves_User_Manual.pdf
- Deltares (2024b, November 14). Delta Shell — User Manual, version: 1.20, revision: 79761. Deltares, Delft, the Netherlands. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/Delta_Shell_User_Manual.pdf
- Duong, T., Ranasinghe, R., Thatcher, M., Mahanama, S., Wang, Z., Dissanayake, P., Hemer, M., Luijendijk, A., Bamunawala, J., Roelvink, D., Walstra, D. (2018) Assessing climate change impacts on the stability of small tidal inlets: Part 2 — Data rich environments. *Marine Geology*, **395**(1), 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.09.007>
- GFS Atmospheric Model (2003). URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>
- Grasmeijer, B., Huisman, B., Luijendijk, A., Schrijvershof, R., van der Werf, J., Zijl, F., Looft, H., Vries, W. (2022). Modelling of annual sand transports at the Dutch lower shoreface. *Ocean & Coastal Management*, **217**. 105984. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105984>
- Habib, M.A., Zarillo, G.A. (2023) Construction of a Real-Time Forecast Model for Coastal Engineering and Processes Nested in a Basin Scale Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, **11**(7), 1263. <https://doi.org/10.3390/jmse11071263>
- Jansen, E., Martins, D., Stefanizzi, L., Ciliberti, S. A., Gunduz, M., Ilicak, M., Lecci, R., Creti, S., Causio, S., Aydoğdu, A., Lima, L., Palermo, F., Peneva, E. L., Coppini, G., Masina, S., Pinardi, N., Palazov, A., & Valchev, N. (2022). Black Sea Physical Analysis and Forecast (Copernicus Marine Service BS-Currents, EAS5 system) (Version 1). Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5
- Matala, A., Hunter, J., Robinson, K., Bennett, J. Building a modern, all-purpose hydrological forecasting system. In: MODSIM 2023; 09 to end of 13 Jul 2023; Darwin. MSSANZ; 2023. 567. csiro:EP2023-3167. <http://hdl.handle.net/102.100.100/488600?index=1>
- NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive (2024, October 14). <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/>
- Solano, M., Canals, M., & Leonardi, S. (2018). Development and validation of a coastal ocean forecasting system for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. *Journal of Ocean Engineer-*

- ing and Science*, **3** (3), 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2018.08.004>
- Staneva, J., Ricker, M., & Behrens, A. (2022). Black Sea Waves Analysis and Forecast (CMEMS BS-Waves, EAS5 system) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_ANALYSISFORECAST_WAV_007_003_EAS5
- Valchev, N., Eftimova, P., & Andreeva, N. (2018). Implementation and Validation of a Multi-Domain Coastal Hazard Forecasting System in an Open Bay. *Coastal Engineering*, **134**, 212–228. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.008>
- Veeramony, J., Blain, C. A., Campbell, T., Martin, P., & Edwards, K. (2018). Momentum exchanges in coupled ocean-wave modeling system. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. <https://doi.org/10.1109/oceans.2018.8604926>
- Zijl, F., Veenstra, J., Groenenboom, J. (2018). The 3D Dutch Continental Shelf Model — Flexible Mesh (3D DCSM-FM). Setup and validation. Report 1220339-000-ZKS-0042. Technical report, Deltares, Delft, The Netherlands. URL: <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@46869/the-3d-dutch-continental-shelf-model/>

REFERENCES

- Ilyin, Yu.P. et al. (2012). Gidrometeorologicheskie usloviya morey Ukrainy [Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine]. Vol. 2: Chernoe more [Black Sea]. Marine Department of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute Sevastopol, pp. 307–340. [In Russian]
- Tuchkovenko, Yu. S., Gavrilyuk, R. V., Kushnir, D. V. (2021). Forecasting of the oceanographic parameters in the Ukrainian part of the Azov-Black Sea basin: monograph. Odesa: Odessa State Environmental University. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9344/> [In Ukrainian]
- 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> [In Ukrainian]
- Tuchkovenko, Y. S., Kushnir, D. V., Goncharenko, R. V., Tytiuk, T. G., Shchypytsov, O. A. (2020). An automatized modeling complex to support the activity of the Naval Forces of Ukraine by providing the operational forecasts of oceanographic conditions. *Collection of Scientific Works of the Center for Military and Strategic Research of the National Defense University of Ukraine*, **3**(70). 75–83. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83> [In Ukrainian]
- Deltares (2025, April 22). D-Flow Flexible Mesh — Computational Cores and User Interface — User Manual, released for: Delft3D FM Suite 2D3D 2025, version: 2025, revision: 80249. Deltares, Delft, the Netherlands. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf
- Deltares (2024a, December 24). D-Waves. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual, version: 1.20, revision: 79761. Deltares, Delft, the Netherlands. 146 pp. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/D-Waves_User_Manual.pdf
- Deltares (2024b, November 14). Delta Shell — User Manual, version: 1.20, revision: 79761. Deltares, Delft, the Netherlands. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3dfm2d3d/Delta_Shell_User_Manual.pdf
- Duong, T., Ranasinghe, R., Thatcher, M., Mahanama, S., Wang, Z., Dissanayake, P., Hemer, M., Luijendijk, A., Bamunawala, J., Roelvink, D., Walstra, D. (2018) Assessing climate change impacts on the stability of small tidal inlets: Part 2 — Data rich environments. *Marine Geology*, **395**(1), 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.09.007>
- GFS Atmospheric Model (2003). URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>
- Grasmeijer, B., Huisman, B., Luijendijk, A., Schrijvershof, R., van der Werf, J., Zijl, F., Loeff, H., Vries, W. (2022). Modelling of annual sand transports at the Dutch lower shoreface. *Ocean & Coastal Management*, **217**. 105984. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105984>
- Habib, M.A., Zarillo, G.A. (2023) Construction of a Real-Time Forecast Model for Coastal Engineering and Processes Nested in a Basin Scale Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, **11**(7), 1263. <https://doi.org/10.3390/jmse11071263>
- Jansen, E., Martins, D., Stefanizzi, L., Ciliberti, S. A., Gunduz, M., Ilicak, M., Lecci, R., Cretí, S., Causio, S., Aydoğdu, A., Lima, L., Palermo, F., Peneva, E. L., Coppini, G., Masina, S., Pinardi, N., Palazov, A., & Valchev, N. (2022). Black Sea Physical Analysis and Forecast (Copernicus Marine Service BS-Currents, EAS5 system) (Version 1). Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5
- Matala, A., Hunter, J., Robinson, K., Bennett, J. Building a modern, all-purpose hydrological forecasting system. In: MODSIM 2023; 09 to end of 13 Jul 2023; Darwin. MSSANZ; 2023. 567. <http://hdl.handle.net/102.100.100/488600?index=1>
- NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive (2024, October 14). <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/>
- Solano, M., Canals, M., & Leonardi, S. (2018). Development and validation of a coastal ocean forecasting system for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. *Journal of Ocean Engineering and Science*, **3**(3), 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2018.08.004>
- Staneva, J., Ricker, M., & Behrens, A. (2022). Black Sea Waves Analysis and Forecast (CMEMS BS-Waves, EAS5 system) (Version 1) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_ANALYSISFORECAST_WAV_007_003_EAS5
- Valchev, N., Eftimova, P., & Andreeva, N. (2018). Implementation and Validation of a Multi-Domain Coastal Hazard Forecasting System in an Open Bay. *Coastal Engineering*, **134**, 212–228. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.008>
- Veeramony, J., Blain, C. A., Campbell, T., Martin, P., & Edwards, K. (2018). Momentum exchanges in coupled ocean-wave modeling system. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. <https://doi.org/10.1109/oceans.2018.8604926>
- Zijl, F., Veenstra, J., Groenenboom, J. (2018). The 3D Dutch Continental Shelf Model — Flexible Mesh (3D DCSM-FM). Setup and validation. Report 1220339-000-ZKS-0042. Technical report, Deltares, Delft, The Netherlands. URL: <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@46869/the-3d-dutch-continental-shelf-model/>

Yurii Tuchkovenko^{1,2*}

ORCID: 0000-0003-3275-9065

tuch2001@ukr.net

Dmytro Kushnir¹

ORCID: 0000-0003-4556-0143

dkush@ukr.net

Oleksandr Matygin³

ORCID: 0000-0002-0206-3414

acm32alex@ukr.net

¹ Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

² Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa, Ukraine

³ Hydrometeorological Center for Black and Azov Seas, Odesa, Ukraine

RESULTS OF THE MODELING OF VARIABILITY OF OCEANOGRAPHIC PARAMETERS IN THE UKRAINIAN SECTOR OF THE BLACK SEA DURING STORMY PERIODS IN NOVEMBER 2023

Results of application of the complex of coupled numerical models Delft3D Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) and D-Waves (spectral wave model SWAN) to the oceanographic conditions of the Black Sea and its north-western part during stormy periods in November 2023 are discussed. The modelling complex was set up in simulation mode to reproduce the spatial and tempo-

ral variability of oceanographic parameters in the water areas under consideration. Simulation was performed as a part of the modelling complex verification procedure. Meteorological data obtained from the forecast archive of the GFS (Global Forecasting System) global numerical weather prediction model was used as atmospheric forcing. Simulation results were compared against the observational data on oceanographic parameters at coastal hydrometeorological stations located in the ports of the Odessa region at the north-western coast of the Black Sea (Chornomorsk, Odesa, Pivdennyi). In addition, results of wind wave simulation, obtained from the modelling complex, were compared with the results of independent modelling via spectral wave model WAM Cycle 6 that assimilates wind reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The use of the modelling complex made it possible to reconstruct a complete picture of the spatial and temporal variability of oceanographic parameters during the stormy periods of November 2023 both in the entire Black Sea basin and in its north-western part. Good quantitative and qualitative consistency between the modelling results of sea level variability, wind wave heights, sea water temperature and observational data, collected at hydrometeorological stations in the area of seaports of the Odessa region, was obtained. The conclusion was made that the aforementioned complex of coupled numerical models D-Flow FM + D-Waves (SWAN) has good prospects for use in the system of hindcast and operative forecast of variability of oceanographic parameters of marine environment in the Black Sea and its distinct areas.

Keywords: the Black Sea, oceanographic parameters, modelling of variability, results verification.

