

УДК 551.46.0:551.465

## ПРОГНОЗУВАННЯ ШТОРМОВИХ ВІДГІННО-НАГІННИХ КОЛИВАНЬ РІВНЯ МОРЯ В ПОРТАХ ОДЕСЬКОГО РАЙОНУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ

Ю. С. Тучковенко<sup>1</sup>, О. С. Матигін<sup>2</sup>, В. Ю. Чепурна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,  
tuch2001@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

<sup>2</sup> Гідрометцентр Чорного та Азовського морів, Французький бульвар, 89, 65009, Одеса, Україна,  
pgdgmcccham@meteo.gov.ua

Збільшення осадки суден, які може прийняти порт для завантаження біля причалів, є одним з основних напрямків розвитку і підвищення вантажообігу морських торговельних портів Одеського району північно-західної частини Чорного моря (Чорноморськ, Одеса, Південний). Для забезпечення безпеки судноплавства в акваторії портів і на підхідних каналах до них актуальною задачею є оперативне прогнозування викликаних штормовими вітрами короточасних коливань рівня моря. Стаття присвячена аналізу і обговоренню результатів випробування спрощеної 2-D гідродинамічної моделі для прогнозування викликаних штормовими вітрами відгінно-нагінних коливань рівня моря в районах морських портів Одеського району північно-західної частини Чорного моря. Просторово-часова мінливість вітрових умов на межі розділу «море-атмосфера» задавалась на основі даних синоптичного прогнозу на 10 діб наданого за глобальною атмосферною моделлю GFS (Global Forecast System). Аналізувались результати прогнозу значних (більше 30 см) короточасних знижень і підвищень рівня моря в портах, які спостерігались в 2016, 2017 та 2020 рр.

Встановлено, що при використанні даних GFS-прогнозу характер викликаних штормовими вітрами денівеляцій рівня моря та їх амплітуда, в переважній більшості розглянутих випадків, починають наближатися до спостережених при завчасності прогнозу не більше 4 діб. Тобто точність прогнозу мінливості вітрових умов за моделлю GFS з більшою завчасністю є недостатньою для прогнозування викликаних штормовими вітрами коливань рівня моря. Отримана прийнятна відповідність між прогнозованими із завчасністю 1-3 доби і спостереженими значеннями амплітуд денівеляцій рівня моря. Зокрема, при завчасності прогнозу  $\approx 2$  доби, для розглянутих штормових випадків середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди коливань рівня складала 7-8 см, при допустимому її значенні 15 см, а середня відносна – 16-18%. Зроблено висновок про те, що гідродинамічна модель, у варіанті із використанням прогностичної інформації щодо мінливості вітрових умов, яка одержується за допомогою моделі прогнозу погоди GFS, може застосовуватись для оперативного прогнозу викликаних штормовим вітром денівеляцій рівня моря із завчасністю до 4 діб.

**Ключові слова:** північно-західна частина Чорного моря, порти, штормові коливання рівня моря, прогнозування.

### 1. ВСТУП

Одним з напрямків розвитку і підвищення вантажообігу морських торговельних портів (МТП – Чорноморськ, Південний, Одеса) Одеського району північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ) є поглиблення підхідних каналів та операційної акваторії порту для збільшення можливої осадки суден, які може прийняти порт для завантаження біля причалів. В останні роки МТП Південний (Южний) приймав і обробляв біля причалів балкери (в тому числі типу «Capesize») дедвейтом 170-200 тис.тон з осадкою до 18,5 м, а МТП Чорноморськ – великото-

нажні судна з осадкою до 14,5 м типу Panamax і post-Panamax дедвейтом до 75 тис. тон (з навантаженням до повної місткості).

Для забезпечення безпеки судноплавства в акваторії портів і на підхідних каналах до них, при виході з порту максимально завантажених біля причалів суден, повинен дотримуватися встановлений для них мінімальний запас глибини під кілем. При сильних вітрах на запас глибини під кілем судна значно впливають викликані вітром відгінно-нагінні коливання рівня моря, які можуть призводити до швидкого підйому або спаду рівня моря в портах Одесько-

го району ПнЗЧМ до 0,9-1,0 м. Тому оперативне прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах і на підходах до них є актуальною задачею.

Різні методичні підходи до вирішення проблеми оперативного короткострокового прогнозування викликаних вітром коливань рівня моря в портах Одеського району ПнЗЧМ розглядалися в роботах [1-5]. Авторами [3] були виявлені ефективні напрямки вітру, які обумовлюють відгони і нагони в портах Південний та Чорноморськ, встановлені статистичні зв'язки між відгінно-нагінними коливаннями рівня моря та дією вітру, визначенні статистичні рівняння для розрахунків змін рівня, окремо, під час його спадку і підйому. Аргументами в розрахункових рівняннях є початкове значення рівня моря і сума проєкцій вітру на ефективні напрямки за попередні 30 годин. В роботі [4] визначались можливості застосування для прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району комплексу інтегрованих чисельних моделей Delft3D-FLOW + SWAN у варіанті з асиміляцією метеорологічної інформації, яка отримується із використанням глобальної чисельної моделі прогнозу погоди GFS (Global Forecast System) Національної метеорологічної служби США [6]. Застосовується метод «телескопізації» криволінійних розрахункових сіток з різною просторовою деталізацією для забезпечення необхідної роздільної здатності у просторі результатів прогнозування. Для акваторії Одеського району ПнЗЧМ деталізація розрахунків складала 90-250 м.

В роботах [1, 2, 5] для відтворення часової мінливості відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеса, Чорноморськ, Південний застосовувалась авторська чисельна гідродинамічна модель, яка заснована на вирішенні рівнянь теорії «мілкої води» у 2D наближенні [7-9]. Результати верифікації моделі з просторовим розділенням 1 км, при її застосуванні в імітаційному режимі з асиміляцією даних архівів реаналізу і прогнозу вітру, отриманих за моделлю GFS для 2010, 2016, 2017 рр., показали [5], що модель здатна правильно відтворювати мінливість коливань рівня моря в результаті вітрової дії. Отримано задовільну відповідність модельних і спостережених кривих часового ходу значних денівеляцій рівня моря, викликаних вітром, на підходах до портів Одеського регіону ПнЗЧМ. Забезпеченість імітаційних розрахунків за моделлю складала 84-91 %. Хоча модель [5] має

спрощену, порівняно з [4], математичну структуру, однак переваги її застосування в оперативній прогностичній практиці Гідрометцентру Чорного і Азовського морів (на даному етапі розбудови національної системи морських прогнозів) полягають у невибагливості до наявних комп'ютерних ресурсів.

Метою цієї роботи є викладення і обговорення результатів застосування 2-D гідродинамічної моделі, сукупно з даними прогнозу просторово-часової мінливості вітрових умов, отриманими за глобальною чисельною атмосферною моделлю GFS, для оперативного прогнозування викликаних штормовими вітрами значних відгінно-нагінних коливань рівня моря в районах морських портів Одеського району північно-західної частини Чорного моря.

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВХІДНІ ДАНІ

Система гідродинамічних рівнянь моделі записується у такому вигляді [1, 5]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sx} - \tau_{bx}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sy} - \tau_{by}), \quad (2)$$

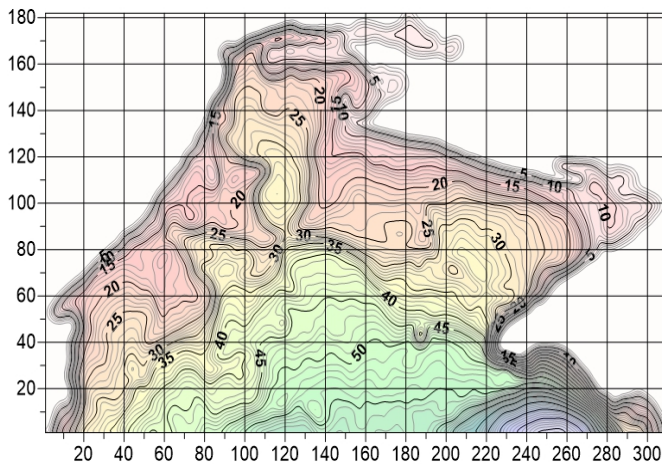
$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

де  $U, V$  – компоненти вектору  $\vec{V}(U, V)$  середньої за глибиною швидкості течій по осях  $x$  та  $y$ , відповідно;  $H = h + \xi$  – повна глибина;  $h$  – глибина на незбуреній воді;  $\xi$  – відхилення рівневої поверхні від незбуреного стану (денівеляція рівня);  $\rho_w$  – густина води;  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$  та  $\tau_{bx}, \tau_{by}$  – компоненти по осях  $x$  та  $y$  векторів дотичних напружень поверхневого  $\vec{\tau}_s(\tau_{sx}, \tau_{sy})$  і придонного  $\vec{\tau}_b(\tau_{bx}, \tau_{by})$  тертя;  $f = 2\omega \sin \varphi$  – параметр Коріолісу;  $\omega$  – вертикальна складова вектору кутового обертання Землі;  $\varphi$  – широта місця;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $t$  – час.

Граничні умови, які застосовуються для чисельного вирішення системи рівнянь (1)-(3), ви-

кладені в [5]. Рівняння моделі, з відповідними граничними умовами, апроксимуються на рівномірній просторовій сітці, що переважається, із застосуванням чисельного кінцево-різницевого методу викладеного в [1].

При розрахунках акваторія ПнЗЧМ (рис. 1) апроксимувалась рівномірною горизонтальною розрахунковою сіткою з просторовим кроком 1000 м. Просторовий розподіл глибин та берегова лінія задавались на основі інформації ФДУ «Одеський район Держгідрографії».



**Рис. 1** – Батиметрична карта розрахункової області гідродинамічної моделі (глибини в м) з осями розміченими в номерах розрахункових вузлів (просторовий крок сітки дорівнює 1 км)

Прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря виконувалось із використанням прогнозу просторово-часової мінливості вітрових умов (на 10 діб з часовою дискретністю 3 год) над ПнЗЧМ, наданому за глобальною чисельною моделлю прогнозу погоди GFS, веб-сервіс якої (National Operational Model Archive and Distribution System – NOMADS) знаходиться в США [10]. Просторова деталізація прогностичних даних моделі GFS у горизонтальній площині становить  $0,25^\circ$  за широтою та довготою.

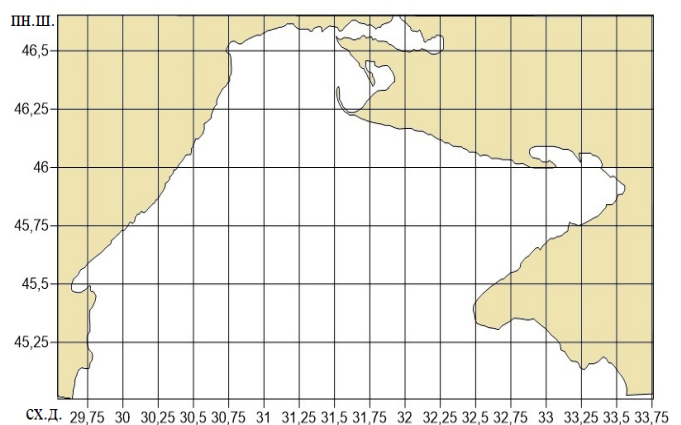
При прогнозуванні з різною завчасністю випадків значних ( $> 30$  см) відгінно-нагінних коливань рівня моря, спостережених в портах Одеського району ПнЗЧМ, використовувались дані прогнозів щодо мінливості вітрових умов в осінньо-зимовий період 2016, 2017 рр. взяті з архіву GFS-прогнозів [11], а також дані поточних GFS-прогнозів [12] вироблених у січнілютому 2020 р.

Для відтворення гідродинамічною моделлю передісторії прогнозу викликаних вітром денівеляцій рівня моря та адаптації моделі до вхідних метеоданих, які передують даті прогнозу, зчитування даних з архіву GFS-прогнозів здійсню-

валось за процедурою, яка максимально наближала їх до ре-аналізу вітрових умов з просторовим розділенням  $0,25^\circ$  за широтою і довготою. Ця процедура полягала у наступному. Модель GFS запускається чотири рази на добу – в 00:00, 6.00, 12:00 і 18:00 годин UTC. Кожен раз при запуску модель генерує прогностичні поля метеорологічних величин з 3-х годинною часовою дискретністю на період від 0 до 240 год. В кожен з цих основних термінів запуску моделі GFS (4 рази на добу), протягом заданого періоду, який передуює даті вироблення прогнозу (3-5 діб), з архіву GFS-прогнозів [11] зчитувався прогноз тільки на найближчі 6 годин. Далі, для вироблення прогнозу на наступні прогностичні 10 діб, зчитувались суто прогностичні дані [12] з інтервалом у часі 3 години і з просторовим розділенням координатної сітки  $0,25$  градусів за широтою та довготою.

Валідація моделі у прогностичному режимі виконувалась шляхом порівняння значень денівеляцій рівня моря, прогнозованих з різною завчасністю із використанням моделі та визначених з даних спостережень в період розвитку явища значних штормових нагонів або відгонів на морських гідрометеорологічних станціях (МГС) Гідрометцентру Чорного та Азовського морів «порт-Одеса» (код станції 98013), «Чорноморськ» (код станції 98008), «порт Південний» (код станції 980091).

Для перенесення полів компонент вектору швидкості вітру, представлених у вузлах сітки GFS моделі (рис. 2), на більш дрібну розрахункову сітку гідродинамічної моделі (рис. 1) з просторовою роздільною здатністю 1 км, виконувалась просторова інтерполяція за методом квадратичних (зворотних) зважених відстаней.



**Рис. 2** – Розташування вузлів сітки GFS моделі (з просторовою дискретністю  $0,25^\circ$  за широтою та довготою) в досліджуваній області

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати випробувального прогнозування окремих випадків значних відгінно-нагінних коливань рівня моря, для яких амплітуда денівеляції рівня перевищує 30 см, в портах ПнЗЧМ в штормові періоди 2016 та 2017 рр. наведені на рис. 3, 4. Нульова доба відповідає добі вироблення прогнозу, а інші значення – номерам діб на які надається прогноз від дати його складання (завчасність прогнозу).

Уявлення про результати поточного прогнозування динаміки вітрових денівеляцій рівня моря в період 26.11.-14.12.2017 р. надає рис. 5.

Додатково, у січні-лютому 2020 р. проводилось випробування гідродинамічної моделі із використанням даних поточних метеорологічних прогнозів мінливості вітрових умов над акваторією ПнЗЧМ за моделлю GFS в оперативному прогностичному режимі. Часова мінливість відміток рівня моря за даними спостережень у вказаний період в портах Одеського району наведена на рис. 6, а порівняння прогнозованих денівеляцій рівня моря зі спостереженими, в обрані штормові періоди, – на рис. 7. Від’ємні значення

діб на рис. 7 відповідають добам упередження прогнозу, в які вітрові умови зчитувались з архіву прогнозів, але за процедурою квазі ре-аналізу, описаною вище у розділі 2.

Аналіз наведених на рис. 3-5, 7 результатів прогнозування викликаних штормовими вітрами відгінно-нагінних коливань рівня моря дозволяє зробити наступні висновки.

Характер денівеляції рівня моря та її амплітуда, в переважній більшості розглянутих випадків, починають наближатися до спостережених при завчасності прогнозу не більше 4 діб. Це свідчить про те, що точність метеорологічного прогнозу за моделлю GFS з більшою завчасністю є недостатньою для прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря викликаних штормовими вітрами.

Зважаючи на те, що порти Одеського району розташовані досить близько один від одного на вигнутому узбережжі, то точність прогнозу викликаних вітром денівеляцій рівня моря, в кожному з них окремо, значною мірою визначається точністю метеорологічного прогнозу мінливості полів векторів вітру, причому, як за модулем, так і за напрямком. Наприклад, результати наведені на рис. 4б, де прогноз має задовільний збіг

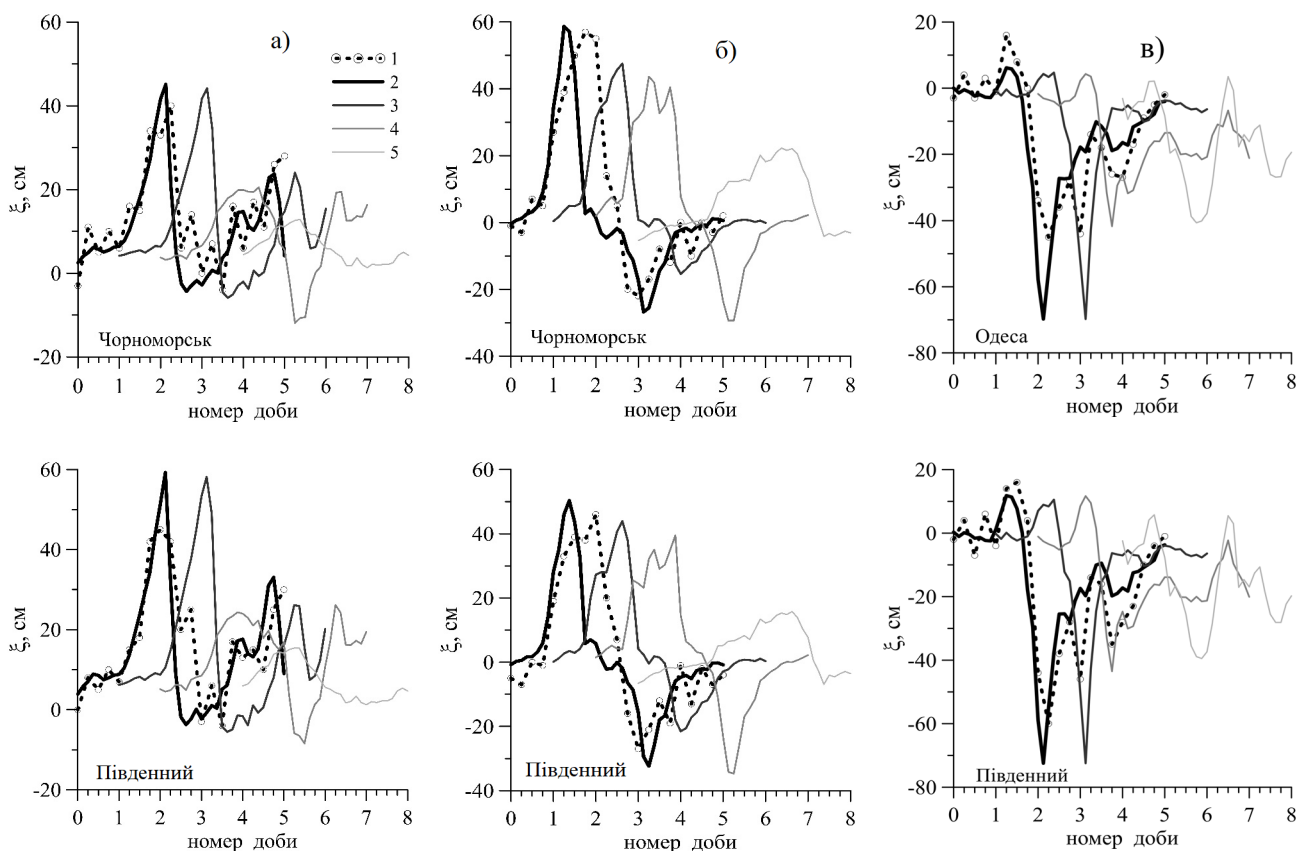


Рис. 3 – Викликані вітровою дією денівеляції рівня моря, в см, спостережені (крива 1) в портах ПнЗЧМ (а – 11.02.2016 р.; б – 13.10.2016 р.; в – 03.12.2016 р.) та отримані при прогнозуванні з різною завчасністю (криві: 2 – за 1,5-2 доби до спостереженого явища, 3 – за 3 доби, 4 – за 4 доби, 5 – за 6 діб)

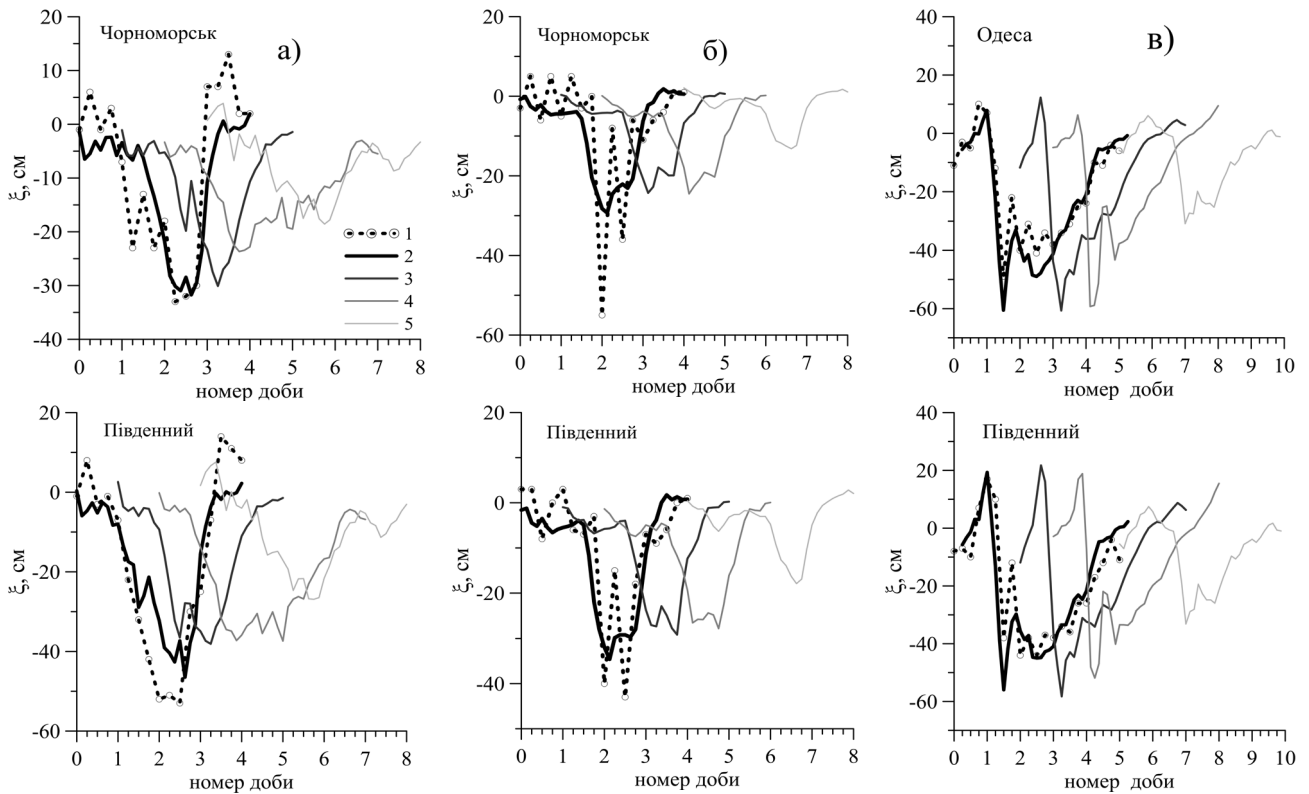


Рис. 4 – Викликані вітровою дією денівеляції рівня моря, спостережені (крива 1) в портах ПнЗЧМ (а – 07.01.2017 р.; б – 15.02.2017 р.; в – 30.10.2017 р.) та отримані при прогнозуванні з різною завчасністю (криві: 2 – за 1,5-2 доби до спостереженого явища, 3 – за 3 доби, 4 – за 4 доби, 5 – за 6 діб)

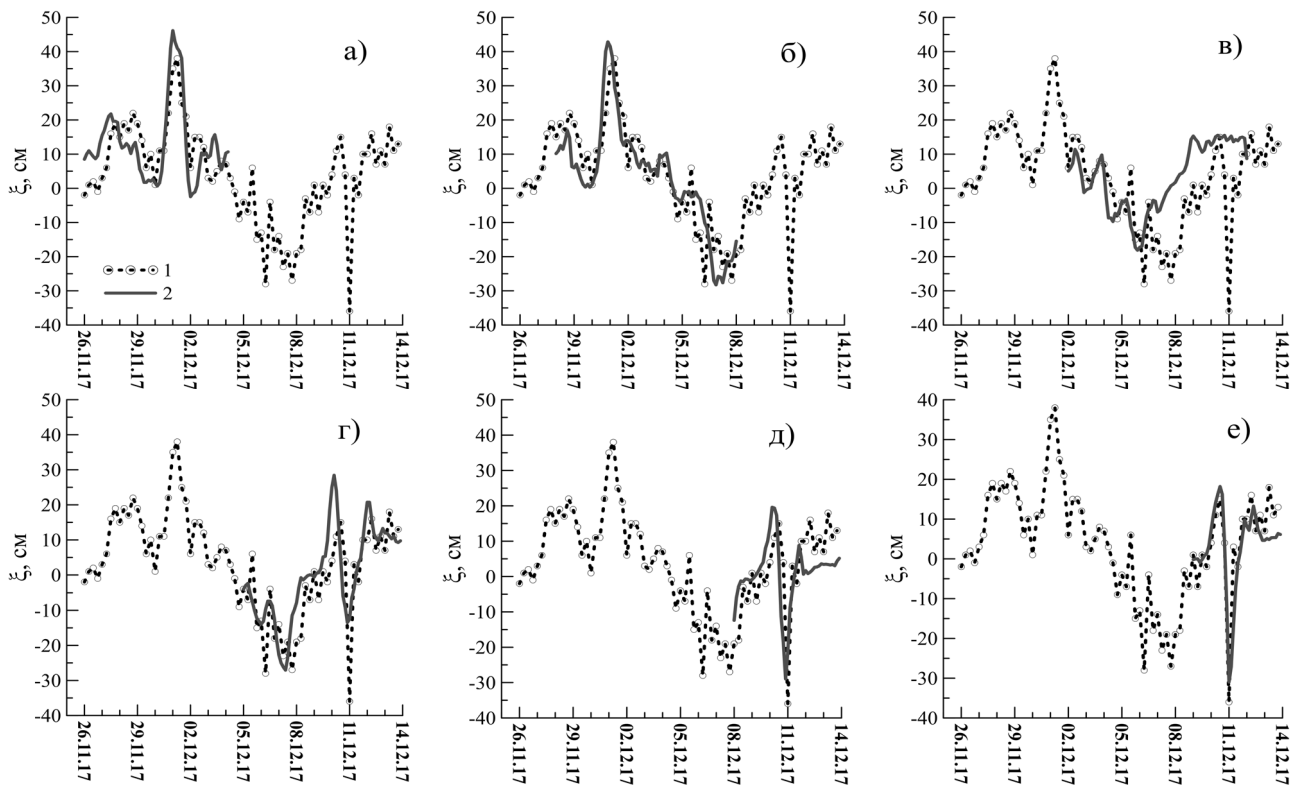
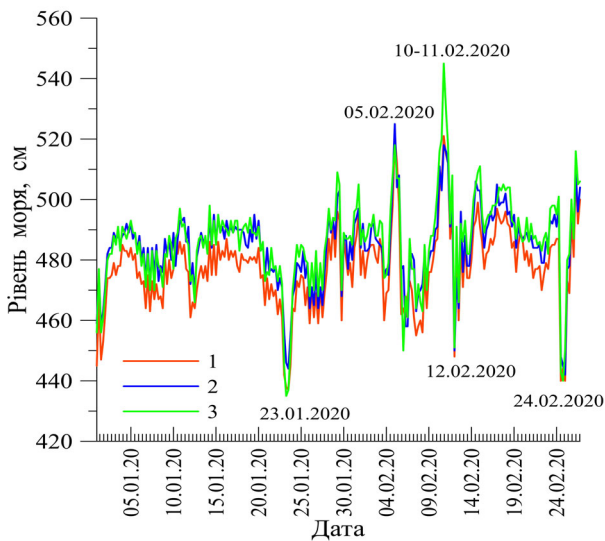


Рис. 5 – Результати поточного короткострокового прогнозування викликаних вітром денівеляцій рівня моря в порту Чорноморськ, в см, в період 26.11.-14.12.2017 р.: 1 – за даними спостережень; 2 – прогнозовані в дати: 26.11.2017; 28.11.2017; 02.12.2017; 05.12.2017; 08.11.2017; 09.11.2017 р.



зі спостереженнями для МГС «порт Південний» і незадовільний – для МГС «Чорноморськ», свідчить саме про неточність прогнозованого напрямку вітру. Окрім того, слід зважати на те, що математична структура гідродинамічної моделі, в рівняннях динаміки (1), (2) якої відсутні коефіцієнти горизонтального турбулентного обміну імпульсом, обумовлює її високу чутливість до похибок у визначенні вітрових умов. Модель практично без затримки у часі реагує на зміни вітру за напрямком і швидкістю.



**Рис. 6** – Мінливість відміток рівня моря в портах Одеса (1), Чорноморськ (2), Південний (3) в січні-лютому 2020 р. за даними спостережень. Вказані дати розвитку значних відгінно-нагінних коливань рівня моря, які прогнозувались

Зсуви у часі фаз розвитку відгінно-нагінних явищ, які проявляються у деякій завчасності або запізненні розвитку фаз підйому або зниження рівня моря, порівняно зі спостереженими (наприклад, рис. 3б, 4а), викликані наявністю таких зсувів у прогнозних даних мінливості вітрових умов, отриманих за атмосферою моделлю GFS, та вказаними вище особливостями математичної структури гідродинамічної моделі.

Вочевидь, що свій внесок в похибку, при розрахунках викликаних штормовими вітрами денівеляцій рівня моря, дає відносно груба просторова роздільна здатність метеорологічних прогнозів за моделлю GFS, через що зміна шорсткості підстильної поверхні на межі суша-море в метеорологічному прогнозі відбувається на масштабі  $\approx 25$  км, а не 3-7 км, як це дають мезомасштабні атмосферні моделі високої роздільної здатності WRF або Harmonie [13]. Зокрема, це

може призводити до завищення швидкості вітру, який спрямований з суші у бік моря, та, відповідно, амплітуди розрахованого відгону (як, наприклад, на рис. 3в, 7б, г).

З метою отримання кількісних оцінок точності прогнозу амплітуди розглянутих явищ значних нагонів і відгонів в портах (13 випадків в п.Південний, 12 – в п.Чорноморськ та 11 – в порту Одеса, оскільки в рядах спостережень за рівнем моря у відповідні проміжки часу були пропуски), для прогнозів із завчасністю  $\approx 2$  доби були розраховані середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди  $\bar{\Delta}_{abc}$  та середня відносна помилка прогнозу амплітуди  $\bar{\Delta}_{\%}$ :

$$\bar{\Delta}_{abc} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \xi_{\phi}^{\max} - \xi_{np}^{\max} \right|;$$

$$\bar{\Delta}_{\%} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\left| \xi_{\phi}^{\max} - \xi_{np}^{\max} \right|}{\left| \xi_{\phi}^{\max} \right|} \times 100,$$

де  $\xi_{np}^{\max}$ ,  $\xi_{\phi}^{\max}$  – амплітуда денівеляції рівня

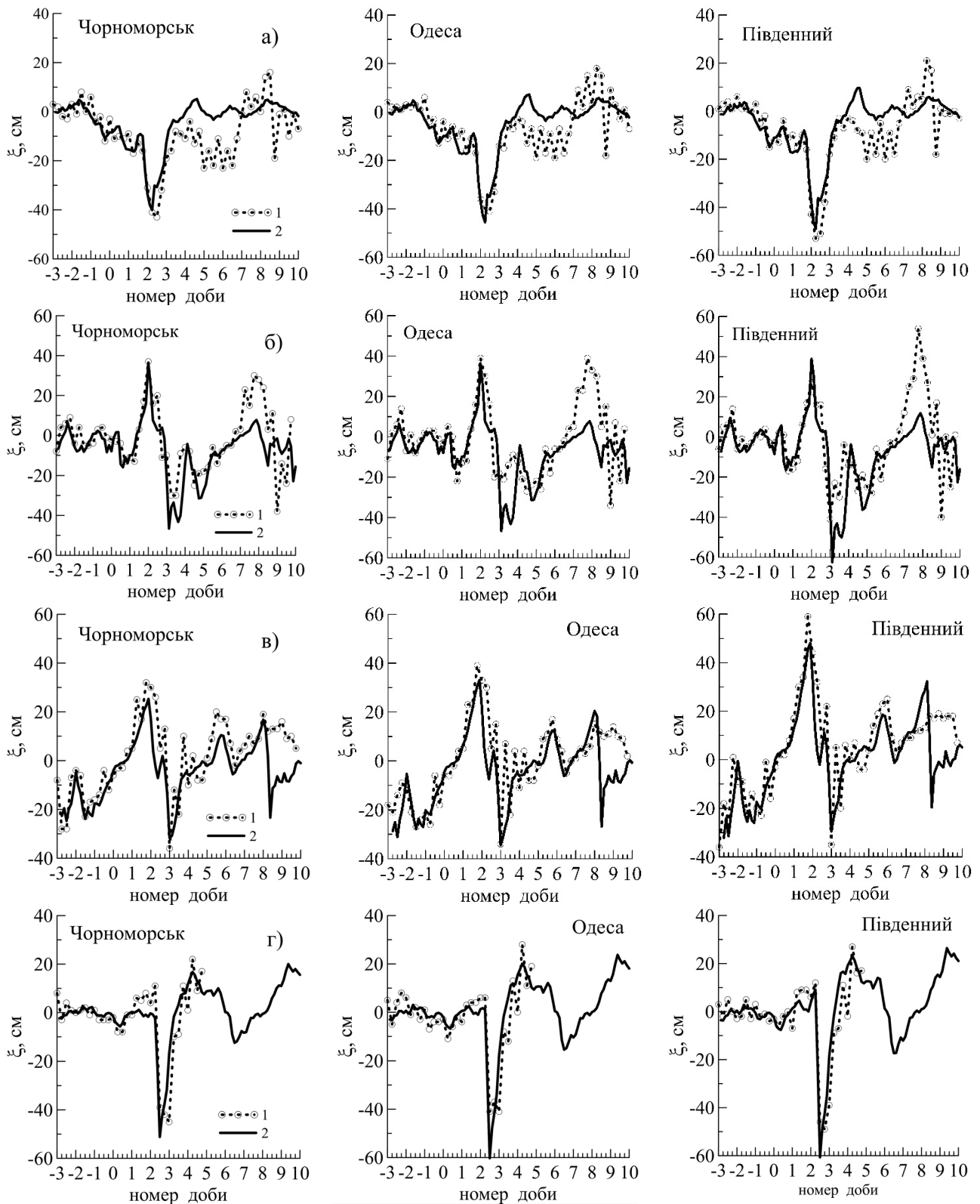
моря у розглянутих випадках за даними спостережень та прогнозу із завчасністю  $\approx 2$  доби,  $N$  – кількість випадків значних відгінно-нагінних денівеляцій рівня моря, які аналізувались, в кожному з портів.

За результатами розрахунків встановлено, що для портів ПнЗЧМ середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди складала 7-8 см, а середня відносна – 15,9-18,5%. Нижні граничні значення помилок прогнозу, з вказаних діапазонів, отримані для п. Одеса, а верхні – для п. Південний.

З усієї сукупності проаналізованих в роботі прогнозів значних, з амплітудою денівеляцій до 65 см, відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах ПнЗЧМ, лише в двох випадках (по 1 – для п. Одеса і п. Чорноморськ, рис. 3в, 4б) помилка прогнозу амплітуди перевищила визначене в [5] допустиме її значення 15 см. З урахуванням вказаних вище оцінок значень середніх абсолютної та відносної помилок прогнозу, можна зробити припущення, що модель попередньо має добрі перспективи щодо її застосування для оперативного прогнозування викликаних штормовими вітрами відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району ПнЗЧМ. Однак остаточні висновки можуть бути зроблені тільки

після довготривалого випробувального використання моделі в оперативній прогностичній практиці Гідрометцентру Чорного та Азовського морів і статистично обґрунтованої оцінки якості

прогнозів відгінно-нагінних коливань рівня моря, згідно настанови [14], із використанням рядів з більшою кількістю випадків.



**Рис. 7** – Викликані вітровою дією значні денівеляції рівня моря, см, спостережені (1) в портах Чорноморськ, Одеса, Південний (див. рис. 6) та отримані при оперативному прогнозуванні (2) із використанням 2-D гідродинамічної моделі в такі дати вироблення прогнозу (0 доба): а) 21.01.2020; б) 03.02.2020; в) 09.02.2020; г) 22.02.2020 р.

#### 4. ВИСНОВКИ

Результати випробувань спрощеної 2-D гідродинамічної моделі у прогностичному режимі, із використанням даних синоптичного прогнозу мінливості вітрових умов над акваторією північно-західної частини Чорного моря отриманих за глобальною атмосферною моделлю GFS, свідчать про можливість її застосування для прогнозування викликаних штормовими вітрами значних відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Чорноморськ, Одеса, Південний із завчасністю до 4 діб.

Отримана прийнятна відповідність прогнозованих із завчасністю 1-3 доби і спостережених значень денівеляцій рівня моря. Зокрема, при завчасності прогнозу  $\approx 2$  доби, середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди денівеляцій складала 7-8 см при допустимому її значенні 15 см, а середня відносна помилка прогнозу амплітуди – 15,9-18,5%.

Моделний комплекс переданий для випробувального використання в Гідрометцентр Чорного та Азовського морів Державної служби з надзвичайних ситуацій України. Перевагою застосування 2-D гідродинамічної моделі в оперативній прогностичній практиці Гідрометцентру Чорного та Азовського морів, на даному етапі розбудови національної системи морських прогнозів, є її невибагливість до наявних комп'ютерних ресурсів.

Спрощена математична структура моделі обумовлює її високу чутливість до точності метеорологічного прогнозу вітру, від якого значною мірою залежить якість прогнозу розвитку відгінно-нагінних коливань рівня моря. Точність прогнозу останніх, із використанням 2-D гідродинамічної моделі, може бути підвищена у разі застосування мезомасштабних метеорологічних моделей з високою просторовою роздільною здатністю, інтегрованих з глобальними атмосферними моделями прогнозу погоди – американського оперативного прогностичного комплексу GFS/WRF або європейського ARPEGE/IFS-Harmonie.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лонин С. А., Тучковенко Ю. С. Имитация сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : МГИ НАН Украины, 1999. С. 58-66.
2. Коморин В. Н., Тучковенко Ю. С. Использование численной гидродинамической модели для прогноза

- сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западного шельфа Черного моря. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2002. № 46. С. 324-331.
3. Гаврилюк Р. В., Ювченко Н. М. Згінно-нагінні коливання рівня моря в портах Южний і Чорноморськ та оцінка можливості їх прогнозування. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 100-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.09>
4. Кушнір Д. В., Тучковенко Ю. С., Попов Ю. И. Результаты адаптации 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>
5. Тучковенко Ю. С. Імітаційне моделювання відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району північно-західної частини Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 23. С. 109-120. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.10>
6. NOAA. GFS Global Forecast System. URL: [https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical\\_forecast\\_systems/gfs.php](https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php) (дата звернення 07.03.2020).
7. Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы : монография. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 207 с.
8. Герман В. Х., Левиков С. П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря: монография. Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. 231 с.
9. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря : монография / Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А. и др. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
10. NOAA, National Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS). URL: <https://nomads.ncep.noaa.gov/> (дата звернення 07.03.2020).
11. NCAR. Research Data Archive at the Computational and Information Systems Laboratory. *NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive*. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (дата звернення 25.11.2019).
12. NOMADS. *Data Transfer: NCEP GFS Forecasts (0.25 degree grid)*. URL: [http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter\\_gfs\\_0p25.pl](http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs_0p25.pl). (дата звернення 25.11.2019).
13. Иванов С. В., Рубан И. Г., Тучковенко Ю. С. Препимущества использования атмосферной мезомасштабной модели Harmonie для воспроизведения динамики вод в прибрежных районах моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
14. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. Росгидромет, 2011, 193 с.

#### REFERENCES

1. Lonin, S.A. & Tuchkovenko, Yu.S. (1999). Imitatsiya sgonno-nagonykh kolebaniy urovnya morya v portakh severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [Simulation of the inflow-outflow oscillations of the sea water level in the ports of the North-Western part of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon*



- i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shelf'a [Environmental safety of coastal and shelf zone and integrated usage of shelf resources]*. Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute of NASU, pp. 58-66. (in Russ.)
2. Komorin, V.N. & Tuchkovenko, Yu.S. (2002). Ispol'zovanie chislennoy gidrodinamicheskoy modeli dlya prognoza sgonno-nagonykh kolebaniy urovnya mora v portakh severo-zapadnogo shelf'a Chernogo mora [The Use of a Numerical Hydrodynamic Model for Forecasting Wind Fluctuations of the Sea Level at the Ports in the North-Western Shelf of the Black Sea]. *Meteorologiya, klimatologiya ta hidrolohiya [Meteorology, Climatology and Hydrology]*, 46, pp. 324-331. (in Russ.)
  3. Gavrilyuk, R.V. & Yuvchenko, N.M. (2018). Wind-induced sea level fluctuations at Yuzhnyi and Chornomorsk sea ports and evaluation of the possibility of their forecast. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 100-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.09> (in Ukr)
  4. Kushnir, D.V., Tuchkovenko, Yu.S. & Popov, Yu.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. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 23, pp. 95-108. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09> (in Ukr)
  5. Tuchkovenko, Y.S. (2019). Simulation modelling of wind-induced sea level fluctuations at the ports of the Odesa Region in the North-Western part of the Black Sea. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 23, pp. 109-120. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.10> (in Ukr)
  6. NOAA. *GFS Global Forecast System*. Available at: [https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical\\_forecast\\_systems/gfs.php](https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php) (Accessed: 07.03.2020).
  7. Volcinger, R.V. & Piskovskii, R.V. (1977). *Teoriya melkoy vody. Okeanologicheskie zadachi i chislennyye metody [The shallow-water theory. Oceanological Problems and Numerical Methods]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
  8. German, V.Kh. & Levikov, S.P. (1988). *Veroyatnostnyy analiz i modelirovanie kolebaniy urovnya mora [Probability Analysis and Simulation of Oscillations of the Sea Level]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
  9. Blatov, A.S., Bulgakov, N.P., Ivanov, V.A. et al. (1984). *Izmenchivost' gidrofizicheskikh poley Chernogo mora [Variability of Hydrophysical Fields of the Black Sea]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
  10. NOAA. *National Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS)*. Available at: <https://nomads.ncep.noaa.gov/> (Accessed: 07.03.2020).
  11. NCAR. *Research Data Archive at the Computational and Information Systems Laboratory. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive*. Available at: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (Accessed: 25.11.2019).
  12. NOMADS. *Data Transfer: NCEP GFS Forecasts (0.25 degree grid)*. Available at: [http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter\\_gfs\\_0p25.pl](http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs_0p25.pl). (Accessed: 25.11.2019).
  13. Ivanov, S.V., Ruban, I.G. & Tuchkovenko, Y.S. (2018). Advantages of using the Harmonie atmospheric mesoscale model for simulating water dynamics in offshore area. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
  14. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov [Guidance for the Forecasting Service]*. Section 3, Part 3: *Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov [The Service for Marine Hydrological Forecasts]*. (2011). Russian Hydrometeorological Service. (in Russ.)

## FORECASTING SEA LEVEL FLUCTUATIONS CAUSED BY STORM WINDS AT THE PORTS IN ODESA REGION OF THE NORTH-WESTERN PART OF THE BLACK SEA

Yu. S. Tuchkovenko<sup>1</sup>, O. S. Matygin<sup>2</sup>, V. Yu. Chepurna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Odessa State Environmental University, 15 Lvivska Str., Odesa, 65016, Ukraine, [tuch2001@ukr.net](mailto:tuch2001@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

<sup>2</sup> Hydrometeorological Center for Black and Azov Seas, 89 Frantsuzskiy Boulevard, Odesa, 65009, Ukraine [pgdgmccham@meteo.gov.ua](mailto:pgdgmccham@meteo.gov.ua)

Increasing the draught of ships that may be accepted by ports for loading at their loading berths is one of the main tasks aimed at development and freight turnover enhancement of sea trade ports located in Odesa Region of the north-western part of the Black Sea (cities of Chornomorsk, Odesa and Pivdennyi). An operational forecasting of short-term sea level fluctuations caused by storm winds presents a critical task for ensuring safe navigation across the ports' water area and approach channels. The article is devoted to analysing and discussing the results of tests of a simplified 2D hydrodynamic model designed for forecasting such phenomena as upsurge and downsurge of the sea level caused by storm winds in the vicinity of sea ports in Odesa Region of the north-western part of the Black Sea. Spatio-temporal variability of wind conditions at the sea-to-atmosphere boundary was set based on the data retrieved from a 10-day synoptic forecast using global atmospheric prediction model GFS (Global Forecast System). The study analyses the results of forecast of significant (the ones exceeding 30 cm) short-term sea level drops and rises at the ports which were observed in 2016, 2017 and 2020.

It was established that, in case of use of the GFS forecast data, the pattern of sea level denivelations caused by storm winds and their amplitude in the majority of events start approximating to the observed values provided the forecast has a 4-day lead time. Therefore the

accuracy of wind conditions variability forecast with application of the GFS model having a longer lead advance time is not sufficient for forecasting the sea level fluctuations caused by storm winds. The study made it possible to get an acceptable equivalence between the values of sea level denivellation amplitudes which were forecast with a 1-to-3-day lead time and the ones observed afterwards. In particular, when the forecast lead time is equal to  $\approx 2$  days, in relation to the expected storm conditions, the average absolute error for the forecast of sea level fluctuations amplitude constituted 7-8 cm, while its permissible value was defined as 15 cm, and the average relative error – 16-18%. It allowed making a conclusion that a hydrodynamic model option, applied alongside with the forecasting information on wind conditions variability retrieved with the help of the GFS weather prediction model, may be used for operational forecasting of short-term sea level fluctuations caused by storm winds with the forecast lead time of up to 4 days.

Keywords: north-western part of the Black Sea; ports; sea level storm fluctuations; forecasting

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШТОРМОВЫХ СГОННО-НАГОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ПОРТАХ ОДЕССКОГО РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Ю. С. Тучковенко<sup>1</sup>, А. С. Матыгин<sup>2</sup>, В. Ю. Чепурна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [tuch2001@ukr.net](mailto:tuch2001@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

<sup>2</sup> Гидрометцентр Черного и Азовского морей, Французский бульвар, 89, 65009, Одесса, Украина, [pgdgmccham@meteo.gov.ua](mailto:pgdgmccham@meteo.gov.ua)

Увеличение осадки судов, которые может принять порт для загрузки у причалов, является одним из основных направлений развития и повышения грузооборота морских торговых портов Одесского района северо-западной части Черного моря (Черноморск, Одесса, Южный). Для обеспечения безопасности судоходства в акватории портов и на подходных каналах к ним, актуальной задачей является оперативное прогнозирование вызванных штормовыми ветрами краткосрочных колебаний уровня моря. Статья посвящена анализу и обсуждению результатов испытания упрощенной 2-D гидродинамической модели для прогнозирования вызванных штормовыми ветрами сгонно-нагонных колебаний уровня моря в районах морских портов Одесского района северо-западной части Черного моря. Пространственно-временная изменчивость ветровых условий на границе раздела «море-атмосфера» задавалась на основе данных синоптического прогноза на 10 суток с использованием глобальной атмосферной модели GFS (Global Forecast System). Анализировались результаты прогноза значительных (больше 30 см) кратковременных снижений и повышений уровня моря в портах, которые наблюдались в 2016, 2017 и 2020 гг.

Установлено, что при использовании данных GFS-прогноза характер вызванных штормовыми ветрами денивеляций уровня моря и их амплитуда, в преобладающем числе случаев, начинают приближаться к наблюдаемым значениям при заблаговременности прогноза не более 4 суток. То есть точность прогноза изменчивости ветровых условий по модели GFS с большей заблаговременностью недостаточна для прогнозирования вызванных штормовыми ветрами колебаний уровня моря. Получено приемлемое соответствие между прогнозируемыми с заблаговременностью 1-3 суток и наблюдаемыми значениями амплитуд денивеляций уровня моря. В частности, при заблаговременности прогноза  $\approx 2$  суток, для рассмотренных штормовых случаев средняя абсолютная ошибка прогноза амплитуды колебаний уровня составила 7-8 см, при допустимом ее значении 15 см, а средняя относительная – 16-18%. Сделан вывод о том, что гидродинамическая модель, в варианте с использованием прогностической информации об изменчивости ветровых условий, получаемая с помощью модели прогноза погоды GFS, может применяться для оперативного прогноза вызванных штормовым ветром колебаний уровня моря с заблаговременностью до 4 суток.

**Ключевые слова:** северо-западная часть Черного моря; порты; штормовые колебания уровня моря; прогнозирование

Подання до редакції : 25. 03. 2020  
Надходження остаточної версії : 22. 04. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020