

УДК 551.46.0:551.465

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДГІННО-НАГІННИХ КОЛИВАНЬ РІВНЯ МОРЯ В ПОРТАХ ОДЕСЬКОГО РАЙОНУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ

Ю. С. Тучковенко

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

Стаття присвячена обговоренню перспектив використання спрощеної 2-D гідродинамічної моделі для прогнозування ініційованих вітром відгінно-нагінних коливань рівня моря в районах морських портів (Чорноморськ, Одеса, Южний) Одеського району північно-західній частині Чорного моря. Просторово-часова мінливість вітрових умов на межі розділу «море-атмосфера» задається на основі даних глобальної чисельної моделі прогнозу погоди GFS (Global Forecast System). Наведено опис математичної структури гідродинамічної моделі і результати її адаптації до умов модельованої області моря. Представлені результати верифікації моделі у варіанті з засвоєнням даних про мінливість вітрових умов з архівів GFS-аналізу і GFS-прогнозів за 2010, 2016 і 2017 рр.

Верифікація виконувалася шляхом порівняння розрахованих при моделюванні і встановлених на основі даних спостережень (з дискретністю 6 годин) викликаних вітром денівеляцій рівня моря в портах Чорноморськ, Одеса, Южний. Кількісна оцінка точності розрахунку виконувалася для випадків, коли денівеляції рівня за даними спостережень перевищували значення середньоквадратичного відхилення всього ряду. З наборів вибірок, які відповідають цій умові, були сформовані нові ряди спостережених і розрахованих за моделлю значних відгінно-нагінних денівеляцій рівня моря в кожному з портів. З використанням цих рядів були отримані оцінки середньоквадратичної помилки розрахунків, допустимої помилки розрахунків, коефіцієнта кореляції між фактичними і розрахованими величинами денівеляцій рівня, забезпеченості методу розрахунку при допустимій помилці розрахунків. Встановлено, що в разі використання при моделюванні даних GFS-аналізу вітру (з просторовою роздільною здатністю $0,5^\circ$ за широтою та довготою) забезпеченість розрахунку значних денівеляцій рівня моря становить 84-85%, а при використанні даних GFS-архіву прогнозів вітру (з просторовою роздільною здатністю $0,25^\circ$) – 88-91%.

Зроблено висновок про те, що модель має добрі перспективи застосування для оперативного прогнозу викликаних штормовим вітром коливань рівня моря у варіанті з асиміляцією прогностичної інформації щодо просторово-часової мінливості вітрових умов, яка одержується за допомогою глобальної моделі прогнозу погоди GFS.

Ключові слова: північно-західна частина Чорного моря, відгінно-нагінні коливання рівня моря, імітаційне моделювання, верифікація.

1. ВСТУП

Відновлення функціонування сучасної системи оперативного прогнозу гідрологічних та гідрофізичних параметрів стану морського середовища української частини акваторії Азово-Чорноморського басейну, втраченої після виходу з під юрисдикції України кримських наукових установ, є актуальною задачею.

У переліку гідрологічних параметрів, що підлягають визначенню при прогнозуванні, перш за все слід відзначити рівень моря. Ініційовані штормовими вітрами відгінно-нагінні коливання рівня моря можуть призводити до катастрофічних наслідків на узбережжі і впливати на судно-

плавство. Зокрема, у разі штормових нагонів відбувається підтоплення прибережних територій, на яких розташовані портові, рекреаційні та оздоровчі об'єкти, гідротехнічні споруди, транспортні комунікації. Штормові відгони створюють загрозу безпеці мореплавання великотоннажних суден з осадкою більше 10 м в акваторіях портів та на підходах до них. Наприклад, оскільки акваторія п. Чорноморськ штучно поглиблена до 14 м, а великотоннажні судна мають осадку до 13,8 м, то запас глибини під кілем становить в підхідних каналах всього 0,20 м. Отже, при значному спаді рівня виникає реальна загроза посадки суден на донні ґрунти.

Наприкінці 1990-х років для оперативного прогнозу відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах північно-західної частини Чорного моря в Гідрометцентрі Чорного та Азовського морів (ГМЦ ЧАМ) використовувалась авторська чисельна гідродинамічна модель [1, 2] заснована на вирішенні рівнянь теорії «мілкої води» у 2D наближенні [3-5], яка потім була втрачена. Зважаючи на те, що ця модель має спрощену відносно сучасних 3D моделей математичну структуру, спрямовану тільки на прогнози коливань рівня моря і, відповідно, потребує мінімальних комп'ютерних ресурсів для практичного застосування, було прийняте рішення про відновлення її застосування в ГМЦ ЧАМ, який на даний час не має доступу до потужних серверів для проведення прогностичних розрахунків.

За оновленою прогностичною схемою вищевказану модель пропонується використовувати з даними прогнозу вітру (на 10 діб з часовою дискретністю 3 год), отриманими за глобальною чисельною моделлю прогнозу погоди GFS (Global Forecast System), веб-сервіс (National Operational Model Archive and Distribution System – NOMADS) якої знаходиться в США [6, 7]. Просторова деталізація прогностичних даних моделі GFS у горизонтальній площині становить $0,25^\circ$ за широтою та довготою. Національна метеорологічна служба США надає безкоштовний доступ до прогностичних даних моделі GFS, тому їх використання є виправданим та перспективним. Прогностична продукція за моделлю GFS використовується, зокрема, в оперативній діяльності Українського гідрометеорологічного центру.

Метою роботи є визначення перспектив використання спрощеної 2-D гідродинамічної моделі для відтворення та прогнозування ініційованих вітром відгінно-нагінних коливань рівня моря в районах морських портів (Чорноморськ, Одеса, Южний) Одеського району північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ) із засвоєнням даних щодо просторово-часової мінливості вітрових умов над акваторією ПнЗЧМ, отриманих за глобальною чисельною атмосферою моделлю GFS.

2. МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Математична структура моделі

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; ξ – відхилення рівневої поверхні від незбуреного стану; ρ_w – густина води; $\tau_{sx}, \tau_{sy}; \tau_{bx}, \tau_{by}$ – 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; ω – вертикальна складова вектору кутового обертання Землі; φ – широта місця; g – прискорення вільного падіння; t – час.

Рівняння (1)-(3) вважаються заданими в деякій області просторових змінних з достатньо гладкою границею, яка співпадає з природними границями ПнЗЧМ.

Як було показано в [1], зовнішній радіус деформації Росії, на якому відбувається геострофічне пристосування довгохвильових (баротропних) мод, в умовах північно-західної частини Чорного моря складає ≈ 170 км. Тобто при моделюванні відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах ПнЗЧМ необхідно проводити моделювання для всієї цієї акваторії.

В якості граничних умов на твердих границях $\Gamma_{\text{тв}}$ розрахункової області для системи (1)-(3) ставиться умова непроточності: $V_{\vec{n}} = 0$, а на рідкій границі $\Gamma_{\text{р}}$ – умова випромінювання:

$$V_{\vec{n}} = \xi \sqrt{g/H}; \quad \partial V_{\vec{\tau}} / \partial \vec{n} = 0,$$

де $V_{\vec{n}}$ і $V_{\vec{\tau}}$ – нормальна та тангенціальна до границі складові вектора швидкості течії; \vec{n} – одинична зовнішня нормаль до граничного контуру Γ .

Компоненти вектора дотичного напруження тертя вітру на верхній межі (повітря-вода) роз-

рахункової області визначаються за такими залежностями:

$$\tau_{sx} = \rho_a C_a W_{10} W_x, \quad (4)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_a W_{10} W_y, \quad (5)$$

де ρ_a – щільність повітря ($\rho_a = 1,25 \text{ кг/м}^3$); W_x й W_y – складові вектора швидкості вітру на висоті 10 м над рівнем моря по осях x і y , відповідно; W_{10} – модуль швидкості вітру на висоті 10 м; C_a – коефіцієнт поверхневого тертя:

$$C_a = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-3}, & \text{якщо } W_{10} \leq 5,0 \text{ мс}^{-1} \\ (0,8 + 0,065 W_{10}) \cdot 10^{-3}, & \text{якщо } W_{10} > 5,0 \text{ мс}^{-1} \end{cases}$$

Компоненти вектора дотичного напруження донного тертя на нижній межі (вода-дно) розрахункової області визначаються наступним чином

$$\tau_{bx} = \Phi U \quad \text{і} \quad \tau_{by} = \Phi V, \quad (6)$$

де $\Phi = \rho_w C_b (U^2 + V^2)^{1/2}$. Тут ρ_w – густина морської води ($\rho_w = 1015 \text{ кг/м}^3$); $C_b = 2,6 \cdot 10^{-3}$ – коефіцієнт донного тертя.

За початкові умови приймається стан спокою:

$$\vec{V}(x, y) = 0, \quad \zeta(x, y) = 0, \quad \text{якщо } t = 0.$$

Рівняння моделі (1)-(3), з відповідними граничними умовами, апроксимувалися на рівномірній просторовій сітці (рис. 1), що перемежається, за допомогою чисельного кінцево-різницевого методу запропонованого в [8] і реалізованого в [1].

2.2 Постановка задачі і вихідні дані

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».

З метою адаптації та перевірки працездатності описаної вище гідродинамічної моделі, з точки зору можливості її використання для прогнозування викликаних вітром відгінно-нагінних коливань рівня води в портах ПнЗЧМ, було проведено ряд чисельних експериментів.

В першій серії чисельних експериментів з моделлю, які виконувались з метою адаптації

моделі та перевірки її працездатності, задавались однорідні у просторі і стаціонарні у часі штормові вітрові умови. Визначався час встановлення баротропної вітрової циркуляції та очікувані величини відхилення рівня моря від незбуреного стану (денівеляції) в різних районах досліджуваної акваторії при сталих штормових вітрах різних напрямків.

Наступні серії чисельних експериментів з моделлю проводилась в імітаційному режимі з метою її верифікації

В другій серії чисельних експериментів моделювання виконувались протягом тривалого періоду часу із засвоєнням даних ре-аналізу вітру за моделлю GFS, які були зчитані з архіву на веб-ресурсі [9]. При розрахунках використовувались задані з дискретністю 3 години поля компонент швидкості вітру з просторовою роздільною здатністю $0,5^\circ$ за широтою і довготою. Моделювання виконувалось для тривалих штормових періодів 2010 та 2016 рр.: 05.01-18.03.2010 р.; 22.09-23.10.2010 р.; 06.01-26.02.2016 р.; 01.10-30.12.2016 р.

Третя серія чисельних експериментів з моделювання викликаних вітром денівеляцій водної поверхні в ПнЗЧМ виконувалась із засвоєнням даних архіву прогнозів за моделлю GFS, зчитаних з веб-ресурсу [10]. На відміну від архіву ре-аналізу, архів GFS-прогнозів містить дані щодо мінливості компонент швидкості вітру з більш детальним просторовим розділенням – $0,25^\circ$ за широтою і довготою. При цьому використовувалась наступна процедура зчитування даних. 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. Оскільки на даному етапі роботи архів GFS-прогнозів використовувався для верифікації гідродинамічної моделі, то в кожен з основних термінів запуску моделі GFS протягом доби (4 рази на добу) зчитувався прогноз тільки на найближчі 6 годин. Моделювання виконувалось для тривалих штормових періодів 2016-2017 рр.: 01.10-15.12.2016 р.; 02.01-23.02.2017 р.; 02.10-06.11.2017 р.; 18.11-22.12.2017 р.

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

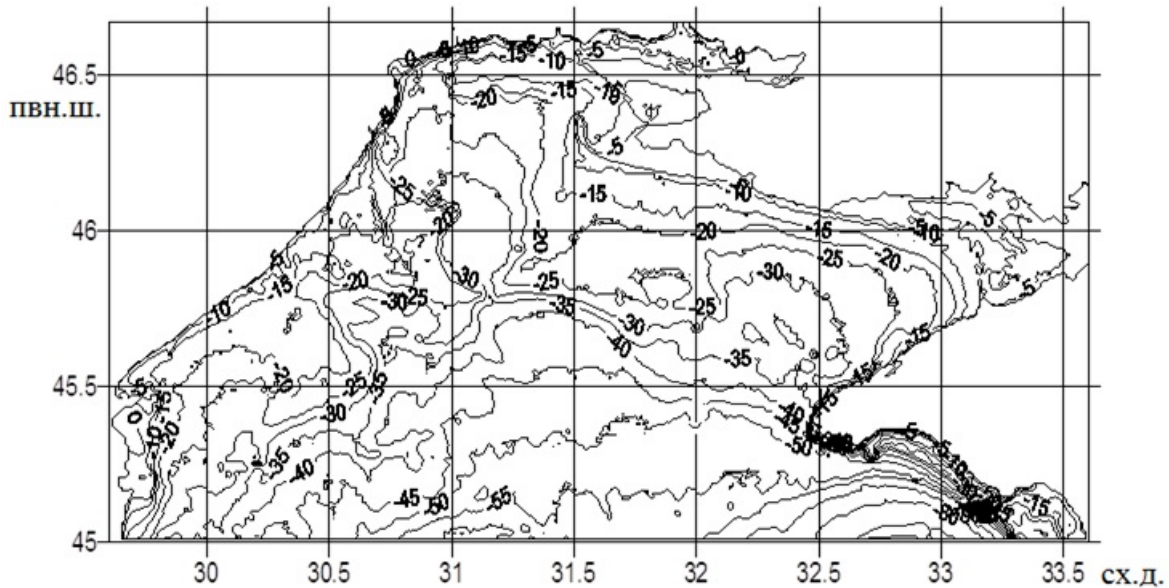


Рис. 1 – Акваторія північно-західної частини Чорного моря, яка апроксимувалась рівномірною горизонтальною розрахунковою сіткою з просторовим кроком 1000 м, та розподіл глибин в ній за даними ФДУ «Одеський район Держгідрографії»

Верифікація моделі виконувалась із використанням архівних даних спостережень за рівнем моря на морських гідрометеорологічних станціях (МГС) Гідрометцентру Чорного та Азовського морів «порт-Одеса» (код станції 98013), «Чорноморськ» (код станції 98008), «порт Южний» (код станції 980091), виконаних в осінньо-зимовий період 2010, 2016, 2017 рр. Обрані роки характеризуються наявністю часових відрізків з потужними штормовими вітрами, які викликали значні відгінно-нагінні коливання рівня моря. Отримані за результатами моделювання денівеляції рівня моря, спричинені дією вітру, порівнювались з їх значеннями, розрахованими за результатами спостережень на МГС як різниця між спостереженою відміткою рівня моря та осередненою за 11 добовий інтервал часу з центром в розрахунковій добі.

3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В першій серії чисельних експериментів з моделлю, яка виконувалась за однорідних у просторі і стаціонарних у часі штормових вітрових умов, було встановлено, що модель зберігає сталість при стаціонарних вітрах різних напрямків швидкістю до 25 м/с при розрахунковому кроці у часі 10 сек. Розрахунок протягом 10 діб модельного часу виконується за 20 хвилин реального часу на стандартному персональному комп'ютері. Модельний час, протягом якого відбувається встановлення відхилень рівня моря

від незбуреного вітром стану, при сталих штормових вітрах швидкістю 15-20 м·с⁻¹, дорівнює 20-30 годинам (рис. 2). Аналіз результатів розрахунків для портів Чорноморськ, Одеса, Южний показав, що, наприклад, у разі штормового північного вітру швидкістю 20 м·с⁻¹ максимальний відгін слід очікувати в районі порту Южний (-70 ÷ -85 см), а мінімальний – в районі порту Чорноморськ (-45 ÷ 60 см). При сталому південно-східному вітрі швидкістю 20 м·с⁻¹ підвищення рівня моря в портах Южний і Одеса складе 70 ÷ 90 см. Наведені значення відповідають спостереженням.

Уявлення про усталені (отримані в результаті розрахунків протягом 5 діб модельного часу) просторові розподіли на акваторії ПнЗЧМ відхилень рівня моря від стану спокою при стаціонарних вітрах різних напрямків надає рис. 3.

Попередні чисельні експерименти з гідродинамічною моделлю, із засвоєнням при розрахунках полів компонент швидкості вітру отриманих за атмосферою моделлю GFS, показали, що хоча на якісному рівні модель правильно відтворює часову динаміку викликаних вітром денівеляцій рівня моря в портах Одеського району ПнЗЧМ, однак амплітуда цих коливаний явно занижується. В ході модельних експериментів було встановлено, що досягнути задовільного збігу змодельованих і визначених за даними спостережень значень денівеляцій рівня моря можна у разі введення для компонент швидкості вітру за моделлю GFS збільшуючого множника, який повинен дорівнювати 1,7-1,75. Необхід-

ність застосування цього множника можливо пояснюється тим, що в рівняннях моделі безпосередньо не враховується вплив на коливання рівня моря градієнтів атмосферного тиску. Введення множника опосередковано враховує цей вплив. Подальша верифікація моделі, результати якої наведені нижче, виконувалась із застосування множника 1,75.

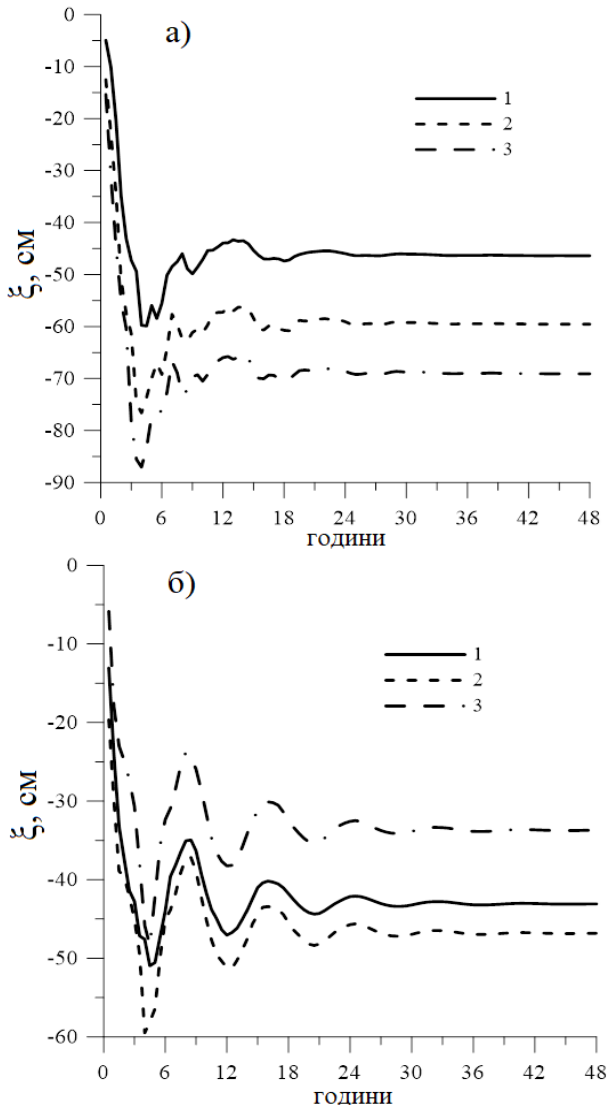


Рис. 2 – Відхилення рівня моря від незбуреного стану в портах Одеського району ПнЗЧМ (1– Чорноморськ, 2 – Одеса, 3 – Южний) при сталих північних (а) і західних вітрах швидкістю 20 м·с⁻¹

Часова мінливість розрахованих за гідродинамічною моделлю і визначених за даними спостережень вітрових денівеляцій рівня моря в портах Чорноморськ, Одеса, Южний у штормові періоди 2010, 2016, 2017 рр. представлена на рис. 4-6. Візуальний аналіз наведених результатів свідчить, що модель добре відображає тенденції викликаніх вітром коливань рівня моря

в розрахункові періоди. В той же час мають місце окремі випадки значних похибок при оцінці величин екстремальних відгінно-нагінних коливань рівня моря, які у більшості таких випадків полягають у недооцінці нагонів і переоцінці відгонів. Ці похибки можуть бути викликані як неточністю або недостатнім просторовим розрешенням вітрових умов, так і впливом місцевих умов розташування водомірних постів в портах.

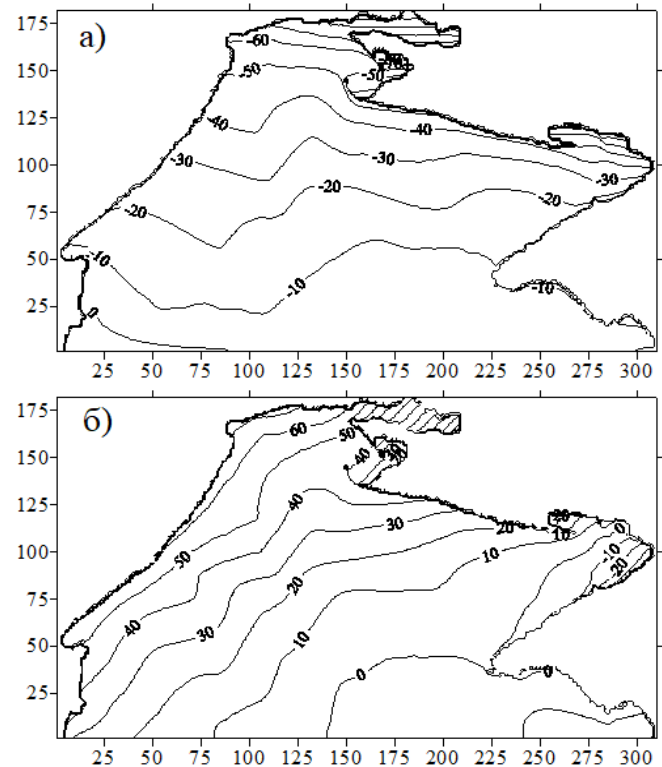


Рис. 3 – Розраховані за моделлю поля відхилень рівня моря ξ (в см) від незбуреного стану в ПнЗЧМ при сталих північних (а) і південно-східних (б) вітрах швидкістю 20 м·с⁻¹. По осях координат вказані номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 1000 м

Кількісна оцінка прогностичної здатності моделі виконувалась із використанням рекомендацій [11].

За результатами статистичного аналізу рядів денівеляцій рівня моря, розрахованих за даними спостережень в портах Одеського регіону у відрізки часу, для яких виконувалось моделювання в 2-й і 3-й серії чисельних експериментів, було встановлено, що середньоквадратичне відхилення рівня моря від незбуреного вітром стану становило ≈ 13 см. Це значення було прийняте як граничне для подальшої ідентифікації значних відгінно-нагінних коливань рівня моря. З вихідних рядів спостережених значень денівеляцій рівня моря (з дискретністю 6 годин) були зроблені вибірки випадків,

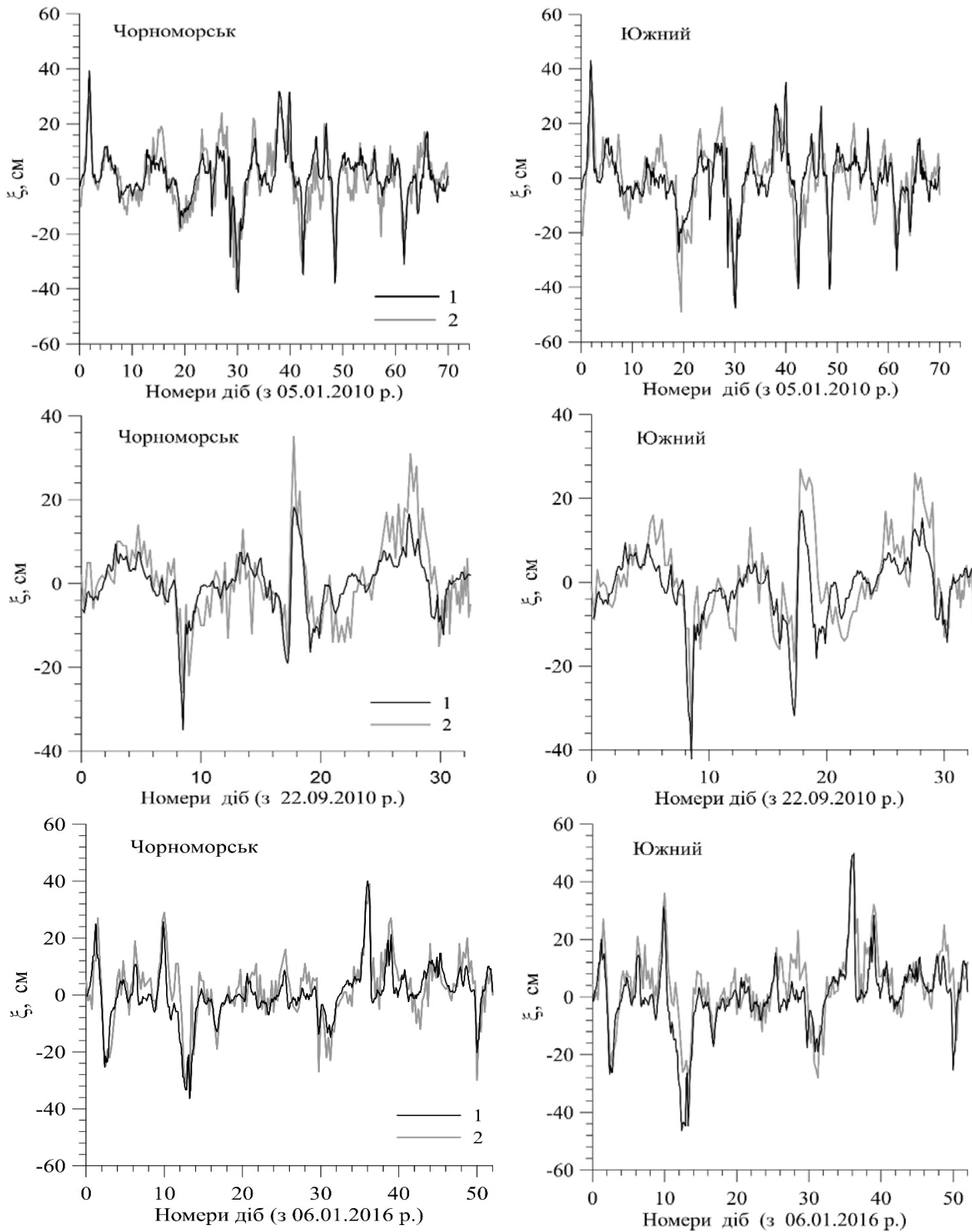


Рис. 4 – Часова мінливість розрахованих за моделлю (1) із засвоєнням даних GFS аналізу вітру і спостережених (2) вітрових денівеляцій рівня моря (в см) в портах Чорноморськ і Южний у штормові періоди: 05.01-18.03.2010 р.; 22.09-23.10.2010 р.; 06.01-26.02.2016 р.

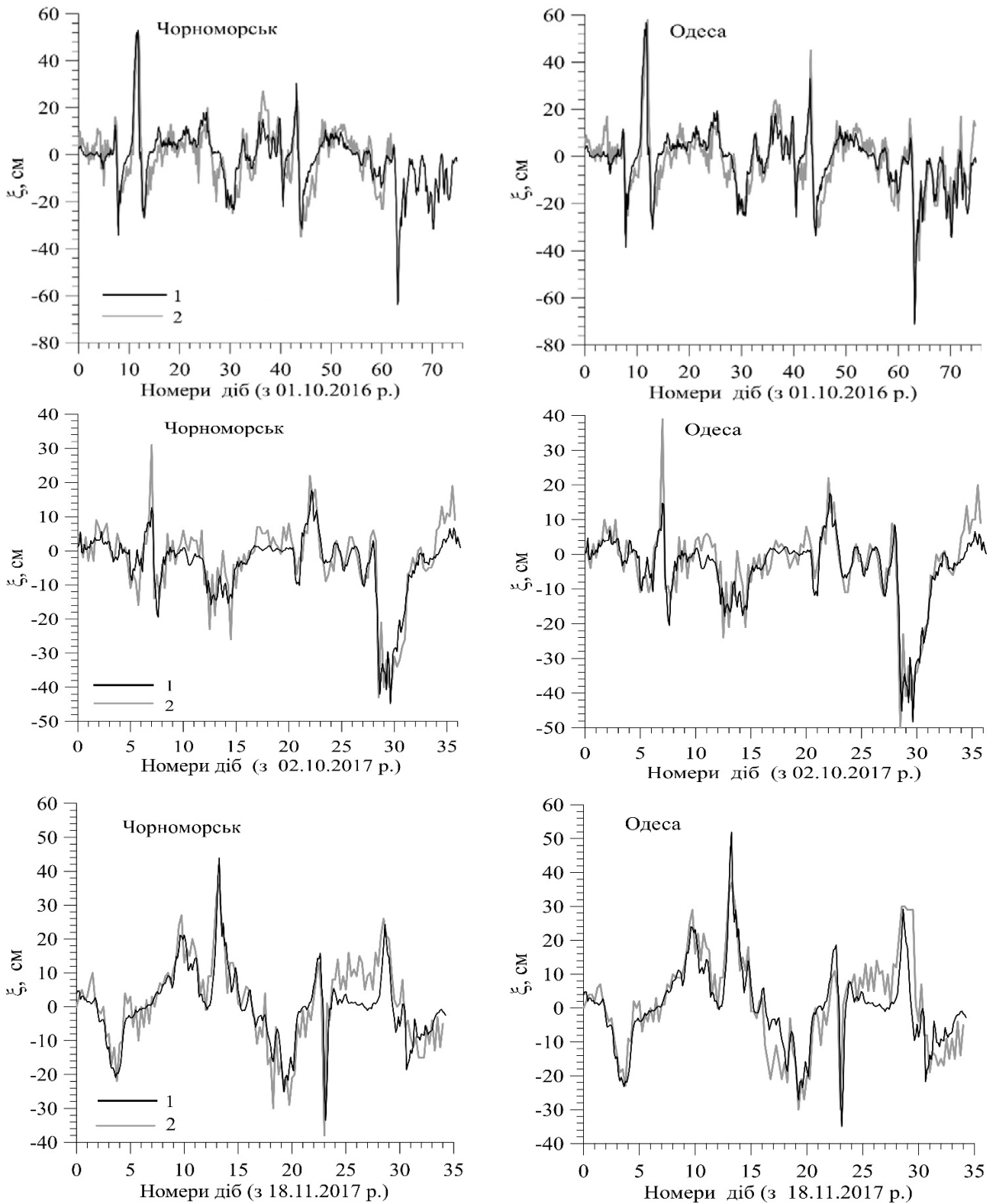


Рис. 5 – Часова мінливість розрахованих за моделлю (1) із засвоєнням даних архіву GFS прогнозів вітру і спостережених (2) вітрових денівеляцій рівня моря (в см) в портах Чорноморськ і Одеса у штормові періоди: 01.10 - 15.12.2016 р.; 02.10 - 06.11.2017 р.; 18.11 - 22.12.2017 р.

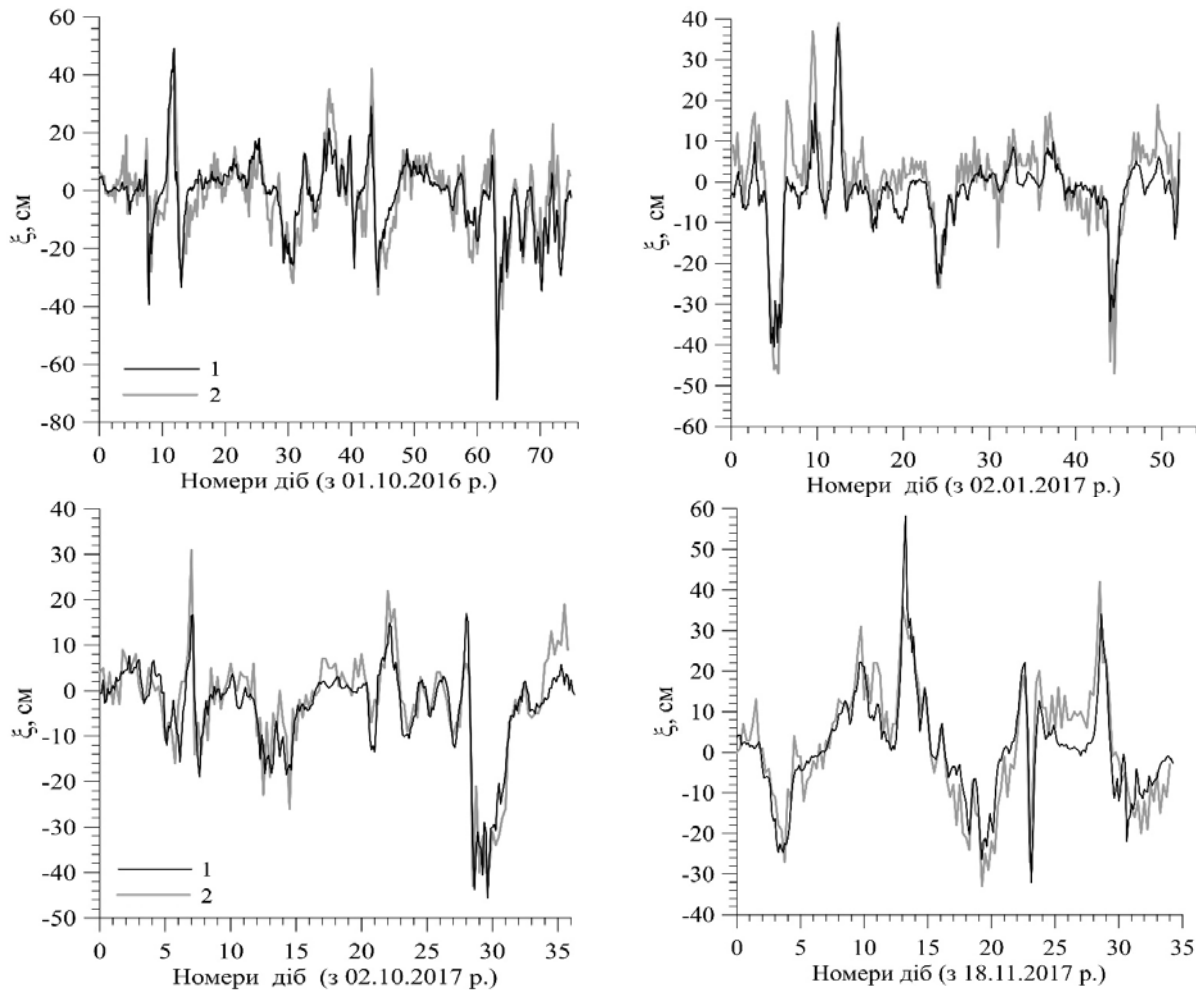


Рис. 6 – Часова мінливість розрахованих за моделлю (1) із засвоєнням даних архіву GFS прогнозів вітру і спостережених (2) вітрових денівеляцій рівня моря (в см) в порту Южний у штормові періоди: 01.10 - 15.12.2016 р.; 02.01 - 23.02.2017 р.; 02.10 - 06.11.2017 р.; 18.11 – 22.12.2017 р.

коли величина денівеляцій дорівнювала або перевищувала граничне значення. Виділені вибірки об'єднувалися в новий ряд для кожного з портів. Такі ж ряди були сформовані з розрахованих за моделлю значень денівеляцій рівня у відповідні моменти часу. Саме ці ряди використовувалися для оцінки точності розрахунку за моделлю. Довжина рядів склала 275-296 значень (в залежності від порту) для 2-ої серії чисельних експериментів (з використанням даних GFS аналізу вітру) та 180-207 значень – 3-ої серії (з використанням даних GFS прогнозу вітру). За ними розраховувались наступні характеристики [11]: σ – середнє квадратичне відхилення спостережених значень денівеляцій рівня моря від середнього, S – середня квадратична помилка розрахунків, δ – допустима помилка розрахунків, R – коефіцієнт кореляції між фактичними і розрахованими величинами, P – забезпеченість методу розрахунку за допустимої помилки δ , де

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\xi_{\phi} - \xi_{\text{м}})_i^2}, \quad \delta = \pm 0,674\sigma,$$

$$P = \frac{m}{n} \cdot 100\%,$$

$$R = \frac{\frac{1}{n-1} \sum (\xi_{\text{м}} - \bar{\xi}_{\text{м}})(\xi_{\phi} - \bar{\xi}_{\phi})}{\left[\frac{1}{n-1} \sum (\xi_{\text{м}} - \bar{\xi}_{\text{м}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{n-1} \sum (\xi_{\phi} - \bar{\xi}_{\phi})^2 \right]^{\frac{1}{2}}},$$

n – кількість членів ряду для кожного з портів; ξ_{ϕ} – фактична (розрахована за даними спостережень) денівеляція рівня моря; $\xi_{\text{м}}$ – розраховане за моделлю відхилення рівня моря від незбуреного вітром стану; $\bar{\xi}_{\phi}$ – середнє значення ряду денівеляцій рівня моря за даними спостережень, $\bar{\xi}_{\text{м}}$ – середнє значення ряду денівеляцій рівня моря отриманих при моделюванні,

Таблиця 1 – Кількісні оцінки точності розрахунків денівеляцій відгінно-нагінних коливань рівня моря (наведені діапазони значень отриманих для різних портів)

Вітрові умови	σ , см	S , см	S/σ	δ , см	R	P, %
GFS - аналіз	20,16-21,70	9,84-10,72	0,48-0,49	13,59-14,62	0,87-0,88	84-85
GFS – архів прогнозів	21,73-23,36	8,62-10,10	0,40-0,43	14,64-15,74	0,91-0,92	88-91

m – кількість модельованих значень денівеляцій рівня моря, які відрізняються від спостережених на величину меншу ніж допустима помилка розрахунків.

Результати розрахунку кількісних показників, які визначають точність розрахунку відгінно-нагінних коливань рівня моря за моделлю в 2-й і 3-й серії чисельних експериментів, наведені в таблиці 1. Вони свідчать про те, що при використанні для моделювання даних GFS аналізу вітру забезпеченість розрахунку значних денівеляцій рівня моря за моделлю складає 84-85 %, а при використанні в розрахунках даних GFS архіву прогнозів вітру – 88-91 %. Тобто модель має добрі перспективи для використання її для прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району ПнЗЧМ.

Загальне уявлення про помилки при моделюванні відгінно-нагінних коливань рівня моря для кожного з портів Одеського району ПнЗЧМ дають діаграми відхилень змодельованих вітрових денівеляцій рівня моря від спостережених у відповідні моменти часу (з дискретністю 6 годин), представлені на рис. 7. Зауважимо, що наведене порівняння є досить жорстким, оскільки помилка розрахунку визначається не тільки величинами змодельованих і спостережених відгінно-нагінних денівеляцій рівня моря, а і повною відповідністю динаміки їх розвитку за часом. У разі виникнення короткочасних значних денівеляцій рівня моря, помилки при порівнянні можуть виникати за рахунок надто великої часової дискретності спостережених значень.

4. ВИСНОВКИ

Результати верифікації авторської 2D чисельної гідродинамічної моделі для прогнозу відгінно-нагінних коливань рівня моря у варіантах із засвоєнням даних архіву ре-аналізу і архіву прогнозів вітру отриманих за моделлю GFS для 2010, 2016, 2017 рр. свідчать, що модель здатна правильно відтворювати мінливість коливань рівня моря в результаті вітрової дії. Отримано задовільну відповідність модельних і спостере-

жених кривих часового ходу значних денівеляцій рівня моря, викликаних вітром, на підходах до портів Одеського регіону ПнЗЧМ. Забезпеченість імітаційних розрахунків за моделлю складає 84-91 %.

Валідацію моделі планується провести при вирішенні задач прогнозування з різною завчасністю випадків значних відгінно-нагінних коливань рівня моря, спостережених в портах Одеського району ПнЗЧМ, із використанням прогнозів мінливості вітрових умов, складених в дати, які передують спостереженому явищу, взятих з архіву прогнозів за GFS моделлю.

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. Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы : монография. Ленинград : Гидрометеоздат, 1977. 207 с.
4. Герман В. Х., Левиков С. П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря: монография. Ленинград : Гидрометеоздат, 1988. 231 с.
5. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря : монография / Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А. и др. Ленинград : Гидрометеоздат, 1984. 240 с.
6. The GFS Atmospheric Model. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (дата звернення 15.10.2017).
7. NOAA. National Weather Service. Environmental Modeling Center. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/.php> (дата звернення 11.11.2017).
8. Lui S. K., Leendertse J. J. Multidimensional numerical modeling of estuaries and coastal seas. *Adv. Hydrosoci.* 1978. No 11. Pp. 95-164.

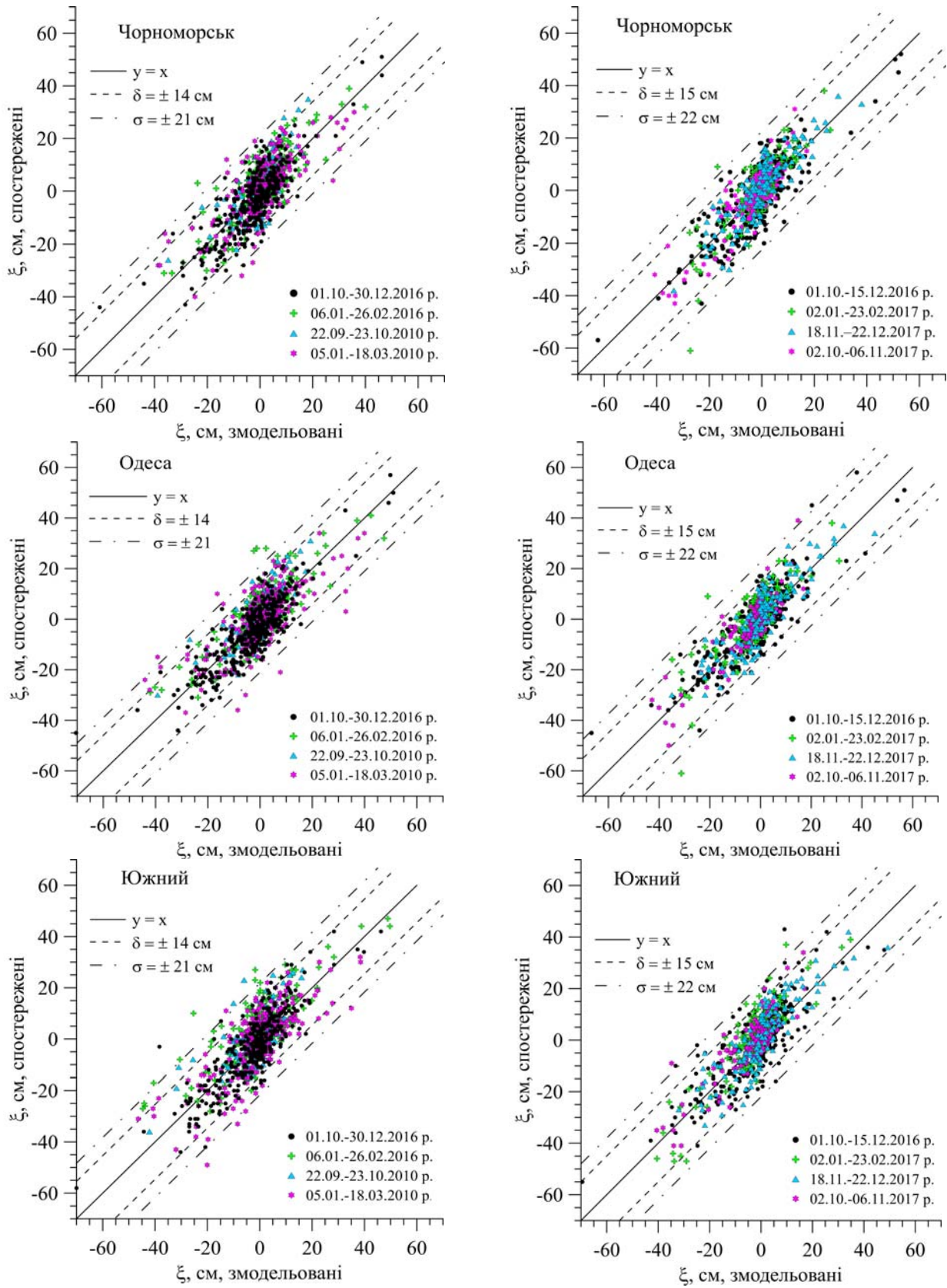


Рис. 7 – Діаграми відхилень змодельованих вітрових денівеляцій рівня моря від спостережених у відповідні моменти часу (з дискретністю 6 годин) в портах Одеського району ПнЗЧМ при використанні даних щодо мінливості вітрових умов з архівів GFS-аналізу (ліворуч) GFS-прогнозів (праворуч)

9. NOAA. Global Forecast System (GFS). GFS Analysis. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. GFS-ANL 004 (0.5°). URL: <https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsanl/...> (дата звернення 15.07.2016)
 10. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/#!access> (дата звернення 21.10.2017)
 11. 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-nagonnykh kolebaniy urovnya mora v portakh severo-zapadnoy chasti Chernogo mora [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 shel'fa [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-nagonnykh kolebaniy urovnya mora v portakh severo-zapadnogo shel'fa 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 hidrolohiia [Meteorology, Climatology and Hydrology]*, 46, pp. 324-331. (in Russ.)
 3. Volcinger, R.V. & Piskovskii R.V. (1977). *Teoriya melkoy vody. Okeanologicheskie zadachi i chislennye metody [The shallow-water theory. Oceanological Problems and Numerical Methods]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
 4. 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.)
 5. 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.)
 6. *The GFS Atmospheric Model*. Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (Accessed: 15.10.2017).
 7. NOAA. National Weather Service. Environmental Modeling Center. Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/.php> (Accessed: 11.11.2017).
 8. Lui, S.K. & Leendertse, J.J. (1978). Multidimensional numerical modeling of estuaries and coastal seas. *Adv. Hydrosci.*, 11, pp. 95 - 164.
 9. NOAA. Global Forecast System (GFS). GFS Analysis. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. GFS-ANL 004 (0.5°). Available at: <https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsanl/...> (Accessed: 15.07.2016)
 10. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Available at: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/#!access> (Accessed: 21.10.2017).
 11. *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.)

SIMULATION MODELLING OF WIND-INDUCED SEA LEVEL FLUCTUATIONS AT THE PORTS OF THE ODESA REGION IN THE NORTH-WESTERN PART OF THE BLACK SEA

Yu. S. Tuchkovenko

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

The paper is devoted to discussion of the prospects of simplified 2D hydrodynamic model use aimed at forecasting the wind-induced sea level fluctuations within the area of sea ports (Chornomorsk, Odesa and Yuzhnyi) of the Odesa Region in the North-Western part of the Black Sea. Spatio-temporal variability of wind conditions at the sea-atmosphere division is specified based on the data of the global numerical weather prediction model of the Global Forecast System (GFS). The research includes the description of the mathematical structure of the hydrodynamic model and the results of its adaptation to the conditions of the simulated sea area. It presents the results of model verification in the version which implies adoption of wind data from the archives of GFS-analysis and GFS-forecasts for 2010, 2016 and 2017.

The verification was performed by comparing wind-induced denivelations of the sea level at the ports of Chornomorsk, Odesa and Yuzhnyi calculated over the course of modelling and those established on the basis of observational data (with the discreteness of 6 hours). A quantitative assessment of the calculation accuracy was performed for the cases where, according to the

observational data, level denivellations exceeded the value of the standard deviation for the entire series. New series of the observed and calculated model-based significant wind-induced denivellations of sea level were formed for each of the ports from the sets of samples that met this condition. Using these series estimates of the mean square error of the calculations, allowable error of calculations, correlation coefficient between the actual and calculated values of the level denivellations, the probability of the calculation method under the allowable error were obtained. It was established that in the case of use of the data from wind GFS-analysis (with spatial resolution of 0.5° both latitudinally and longitudinally) over the course of modelling the probability of calculation of significant sea level denivellation constitutes 84-85%, and in case of using the data from the GFS-archive of wind forecasts (with spatial resolution of 0.25°) – 88-91%.

This allowed making a conclusion that the model has good prospects of use for operational forecast of the sea level fluctuations caused by storm wind in the version implying assimilation of the predicted information on the spatio-temporal variability of wind conditions obtained by means of the GFS global weather forecast model.

Keywords: North-Western part of the Black Sea, wind-induced sea level fluctuations, simulation modelling, verification.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СГОННО-НАГОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ПОРТАХ ОДЕССКОГО РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Ю. С. Тучковенко

*Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,
tuch2001@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

Статья посвящена обсуждению перспектив использования упрощенной 2-D гидродинамической модели для прогнозирования инициированных ветром сгонно-нагонных колебаний уровня моря в районах морских портов (Черноморск, Одесса, Южный) Одесского района северо-западной части Черного моря. Пространственно-временная изменчивость ветровых условий на границе раздела «море-атмосфера» задается на основе данных глобальной численной модели прогноза погоды GFS (Global Forecast System). Приведено описание математической структуры гидродинамической модели и результатов ее адаптации к условиям моделируемой области моря. Представлены результаты верификации модели в варианте с усвоением данных о ветре из архивов GFS-анализа и GFS-прогнозов за 2010, 2016 и 2017 гг. Верификация выполнялась путем сравнения рассчитанных при моделировании и установленных на основе данных наблюдений (с дискретностью 6 часов) вызванных ветром денивеляций уровня моря в портах Черноморск, Одесса, Южный. Количественная оценка точности расчета выполнялась для случаев, когда денивеляции уровня по данным наблюдений превышали значение среднеквадратического отклонения всего ряда. Из наборов выборок, соответствующих этому условию, были сформированы новые ряды наблюдаемых и рассчитанных по модели значительных сгонно-нагонных денивеляций уровня моря в каждом из портов. С использованием этих рядов были получены оценки средней квадратической ошибки расчетов, допустимой ошибки расчетов, коэффициента корреляции между фактическими и рассчитанными величинами денивеляций уровня, обеспеченности метода расчета при допустимой ошибке расчетов. Установлено, что в случае использования при моделировании данных GFS-анализа ветра (с пространственной разрешающей способностью $0,5^\circ$ по широте и долготе) обеспеченность расчета значительных денивеляций уровня моря составляет 84-85%, а при использовании данных GFS-архива прогнозов ветра (с пространственной разрешающей способностью $0,25^\circ$) – 88-91%. Сделан вывод о том, что модель имеет хорошие перспективы использования для оперативного прогноза вызванных штормовым ветром колебаний уровня моря, в варианте с ассимиляцией прогностической информации о пространственно-временной изменчивости ветровых условий, получаемой при помощи глобальной модели прогноза погоды GFS.

Ключевые слова: северо-западная часть Черного моря, сгонно-нагонные колебания уровня моря, имитационное моделирование, верификация.

Подання до редакції : 07. 03. 2019

Надходження остаточної версії : 18. 03. 2019

Публікація статті : 30. 05. 2019