

УДК 519.2:626.9

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ НА ЗАМУЛЕННЯ МОРСЬКОГО ПІДХІДНОГО КАНАЛУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА НАТУРНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Б. М. Островерх<sup>†</sup>, Л. С. Потапенко

*Інститут гідромеханіки НАН України  
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна*

<sup>†</sup>*E-mail: [ostro@ukr.net](mailto:ostro@ukr.net)*

*Отримано 25.06.2018*

Роботу присвячено дослідженню морфодинаміки прибережної зони глибоководного суднового ходу р. Дунай – Чорне море задля визначення впливу вітрових хвиль на замулення морського підхідного каналу на базі застосування комплексу числових математичних моделей та геоінформаційних систем. Дослідження виконано за результатами математичного моделювання та натурного спостереження протягом кількох років на базі сумісного використання розрахункових комплексів і застосування геоінформаційної системи для генерування розрахункових сіток і аналізу результатів. Вітрове хвилювання розраховувалось за спектральною хвильовою моделлю CMS-Wave, а течія та морфодинаміка – за моделлю мілкої води CMS-Flow. Для підготовки вихідних даних, аналізу та обробки числових результатів і натурних спостережень використовувалась геоінформаційна система. Проведено оцінку трансформації хвиль на огорожувальній дамбі морського підхідного каналу. Визначено зони акумуляції та розмиву каналу, які утворились у результаті моделювання 48 годин дії штормового хвилювання. Для верифікації отриманих даних проведено геоінформаційний аналіз за результатами промірів глибин у каналі та на його брівках до та після шторму. Продемонстровано відповідність результатів моделювання й спостережених зон акумуляції та розмиву. Визначено, що зони акумуляції наносів в каналі розташовані біля оголовку дамби на вході в морський підхідний канал. У зоні руйнування хвиль на правій брівці каналу спостерігається послідовність барів поперечного типу, пов'язаних з морфодинамічною нестійкістю, яка виникає при взаємодії хвиль і течій. Досліджено довгострокові морфологічні зміни під дією штормового хвилювання в зоні глибоководного суднового ходу. Визначено вплив захисних споруд на замулення каналу. Умови течії поступово наближаються до річкових, а основні зони акумуляції наносів переміщуються до входу в морський підхідний канал. Ці зміни відбуваються в результаті зведення захисної дамби, яка природним чином входить у структуру лівого берега каналу, та утворення бару на його правому березі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** морфодинаміка дна, течія, гирло, морський підхідний канал, зона акумуляції

## 1. ВСТУП

Прибережні зони морів та океанів в усі часи відігравали видатну роль у розвитку людства завдяки своїм унікальним природним і господарським якостям. Водночас, вони перебувають під суттєвим впливом метеорологічних і геофізичних факторів, які змінюють ці зони і стимулюють проведення робіт щодо захисту від їхньої негативної дії. Зокрема, постійна дія вітрових хвиль істотно впливає на морські берегові лінії, утворюючи достатньо стійкі природні морфологічні форми. Більш складні й динамічні формації утворюються в гирлових ділянках морів, на які одночасно впливає взаємодія руслових річкових течій з морськими вздовжбереговими течіями та припливними явищами. Особливо ускладнюються морфологічні процеси при наявності техногенних втручань, пов'язаних зі зведенням прибережних споруд, прокладанням навігаційних каналів задля забезпечення руху транспортних плавучих засобів у підхідних каналах та відкритому морі. Потребою в спорудженні нових захисних конструкцій обумовлюється необхідність розвивати й створювати теоретичні основи для обґрунтування й удосконалення їхніх експлуатаційних якостей.

Оцінка впливу вітрового хвилювання в прибережній зоні – необхідна складова проектних розрахунків для зведення та реконструкції захисних споруд, мінімізації замулення підхідних каналів та еволюції берегів, спричинених інженерними заходами. Урахування одночасної дії вітрових хвиль і процесів річкових та хвильових течій породжує складну математичну задачу, яку можна розв'язати лише чисельними методами з залученням наземних і донних спостережень.

У результаті багаторічних спостережень та досліджень було визначено основні фактори, які діють на прибережні утворення. До них належать вітрові, хвильові й потікові навантаження та систематизовані головні гідродинамічні процеси в прибережній смузі [1–5]. Останню зазвичай поділяють на три зони:

- суто берегова дюнова та пляжна зона, де переважають дії вітру та хвиль набігання;
- зона прибою або верхня берегова поверхня, де переважають хвилі, що руйнуються (за спокійних умов вона скорочується до вузької зони заболочення, але при штормі може поширюватись на море глибиною від 8 до 10 м, де хвилі втрачають енергію через руйнування);
- середня й нижня частини берегової зони, де переважають незруйновані хвилі та потоки, викликані припливом, вітром та ротацією.

Незважаючи на те, що за останні десятиліття в результаті численних польових досліджень у наших знаннях про прибережні процеси досягнуто значного прогресу, багато деталей гідродинаміки прибережної зони ще недостатньо вивчені. Розвиток математичних методів удосконалювався від використання спрощених рівнянь Кортевега – де Вріза до планових рівнянь в'язкої течії Нав'є–Стокса з залученням спектральної теорії утворення, поширення та руйнування хвиль у береговій зоні, які розв'язувалися числовими методами [1–4].

Дослідження морфодинаміки прибережної зони в гирлі р. Дунай виконано в рамках проекту «Створення глибоководного суднового ходу р. Дунай – Чорне море на

українській ділянці дельти», в якому проводились дослідження гідроморфологічних і техногенних процесів під час експлуатації.

Слід відзначити великий обсяг досліджень, проведених для визначення зміни берегової лінії та сучасного стану дельтової зони Дунаю під впливом природних і антропогенних факторів на базі інструментальних і космічних методів спостереження за морфодинамікою [6–8]. Однак моделювання задля обґрунтування прийнятих конструктивних рішень і прогнозування впливу морських факторів значно відстає від потреб розвитку річкового господарства.

Інститутом гідромеханіки НАН України проведено роботи щодо обґрунтування та моніторингу конструктивних рішень на українській ділянці глибоководного суднового ходу Кілійським гирлом і його дельтою з виходом через гирло Бистре, обладнане захисними та струмененапрямними спорудами для зменшення замулення морського підхідного каналу [9–11]. Розроблені методики щодо визначення впливу морських факторів морфодинаміки можуть бути використані для подальших потреб природокористування й судноплавства. Виконано порівняння числових даних щодо трансформації гармонічних хвиль і замулення каналу без урахування огорожувальної дамби з результатами фізичного моделювання барової ділянки каналу в хвильовому басейні [9]. Для математичного моделювання вітрового хвилювання можна також використати модель SWAN, яка базується на числовому розв'язанні рівняння балансу хвильової енергії в спектральній формі [12, 13]. У роботах [10, 11] досліджено індуковані штормовим хвилюванням нестационарні прибережні течії в районі гирла Бистре, для розрахунку яких використано програму XBeach [14].

Мета цієї роботи полягає в узагальненні найважливіших характеристик гідродинаміки прибережної зони та виборі комплексної математичної моделі для отримання числових розв'язків і аналізу результатів. Тут для моделювання вітрового хвилювання, визначення рефракції, дифракції та руйнування хвиль на критичних глибинах в зоні каналу застосовано спектральну хвильову модель CMS-Wave [1], а для моделювання течії та морфодинаміки – модель CMS-Flow [4]. Суттєвою характеристикою роботи є порівняння результатів моделювання та натурних спостережень за допомогою геоінформаційної системи. Геоінформаційну систему також використано для підготовки вихідних даних, створення розрахункових сіток і аналізу результатів моделювання.

Проведено оцінку трансформації хвиль на огорожувальній дамбі підхідного каналу, яка зазнала руйнування й потребує реконструкції. Визначено зони акумуляції та розмиву підхідного каналу, отримані в результаті моделювання 48 годин дії штормового хвилювання. Для підтвердження результатів моделювання проведено геоінформаційний аналіз за результатами промірів глибин в каналі та його брівках до й після шторму. Продемонстровано хороший збіг результатів моделювання й натурних спостережень зон акумуляції та розмиву.

## 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВІТРОВОГО ХВИЛЮВАННЯ ТА МОРФОДИНАМІКИ

Для моделювання вітрового хвилювання застосовувалась стаціонарна спектральна хвильова модель CMS-Wave [1], яка базується на числовому розв'язанні рівняння балансу хвильової енергії. Стаціонарне рівняння балансу хвильової енергії в спектральній

формі за умови присутності фонових течій має вигляд [1]:

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\sigma} \left[ (cc_g \cos^2 \theta N_y)_y - \frac{cc_g}{2} \cos^2 \theta N_{yy} \right] - \varepsilon_b N \tilde{S}. \quad (1)$$

Тут формулою

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (2)$$

задано щільність хвильової дії, яка є функцією частоти  $\sigma$  та напрямку  $\theta$ ;  $E(\sigma, \theta)$  – щільність хвильової енергії. За умови присутності фонових течій уздовж хвильового променя зберігається щільність хвильової дії, а щільність хвильової енергії – ні. Перший і другий доданки в рівнянні (1) описують перенесення енергії вздовж координат  $x$ ,  $y$ , а третій – враховує ефекти рефракції хвиль на рельєфі дна і течіях. Величини  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_\theta$  – швидкості перенесення щільності хвильової дії уздовж відповідних просторових і кутової координат. Перший доданок у правій частині рівняння (1) враховує ефекти дифракції. Тут  $\kappa$  – параметр інтенсивності дифракції;  $N_y$  та  $N_{yy}$  позначають першу та другу похідну по  $y$ , де координату  $y$  направлено вздовж берега (Рис. 1). Величина  $\varepsilon_b N$  задає швидкість дисипації енергії при обваленні хвиль, де коефіцієнт  $\varepsilon_b$  визначають за модифікованим критерієм Гола [1]. Функція  $S$  у правій частині рівняння (1) описує джерело генерації хвиль вітром і дисипацію енергії, обумовлену донним тертям, обваленням хвильових гребенів і нелінійною взаємодією спектральних гармонік.

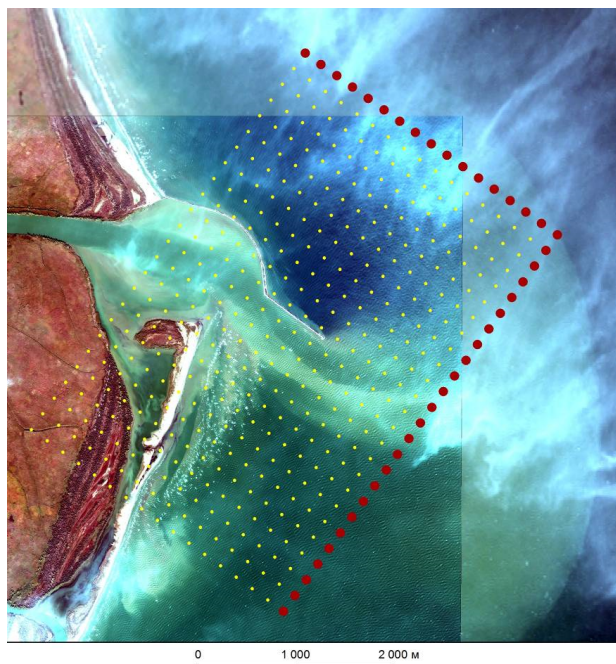


Рис. 1. Зона дослідження

До рівняння (1) додаються співвідношення для фазової та групової швидкості хвиль:

$$c = \frac{\sigma}{k}, \quad c_g = \frac{1}{2}c \left( 1 + \frac{2kh}{\text{sh}(2kh)} \right), \quad (3)$$

де  $h$  – глибина;  $k$  – хвильове число, яке є коренем дисперсійного рівняння

$$\sigma^2 = kg \text{th}(kh). \quad (4)$$

Хвилі на морській межі області моделювання задаються частотно-кутовим спектром, тобто розподілом хвильової енергії за періодом та напрямком хвиль

$$E(\sigma, \theta) = S_{TMA}(\sigma)Q(\theta), \quad (5)$$

де  $S_{TMA}(\sigma)$  – частотний спектр, що визначається спектральною функцією

TMA [2];  $Q(\theta)$  – функція кутового розподілу. Спектр TMA задається як добуток спектра JONSWAP і коригуючої функції  $\Phi(\omega, h)$ , яка враховує вплив скінченної глибини:

$$S_{TMA}(\sigma) = Ag^2 \theta^{-5} e^{\alpha} \gamma^b \Phi(\sigma, h). \quad (6)$$

Коефіцієнти  $A$ ,  $a$ ,  $b$  залежать від висоти значних хвиль  $H_s$ , пікової частоти  $\sigma_p$ , довжини хвилі на ній  $L_p$ , пікового періоду  $T_p$ , параметра крутизни (шпилястості)  $\gamma$ .

Енергія в кутовому спектрі розподіляється пропорційно  $\cos^m(\theta - \theta_m)$ , а саме:

$$Q(\theta) = C_m \cos^m(\theta - \theta_m), \quad \theta - \theta_m \leq \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

де  $\theta$  – напрямок спектральної компоненти;  $\theta_m$  – середній напрямок хвилі;  $m$  – коефіцієнт кутового розподілу.

Рівняння (1) розв'язується за числовою схемою [3]. Похідні першого порядку апроксимуються кінцевими різницями на прямокутній сітці (див. Рис. 1).

Двовимірний спектр задається на морській межі розрахункової сітки, яку позначено червоним кольором. Для кожної пари значень  $(\sigma, \theta)$  величина  $E(\sigma, \theta, x, y)$  визначається з рівняння балансу хвильової енергії в скінченно-різницевої формі, починаючи з морської межі в напрямку поширення хвиль. Основні характеристики хвилювання – висота значних хвиль  $H_s$ , середній напрямок  $\bar{\alpha}$  і тензор радіаційних напруг  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  – визначаються через енергетичний спектр подвійним інтегруванням по частоті та по напрямку [1]. Наприклад, висота значних хвиль задається співвідношенням

$$H_s(x, y) = 4 \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} E(\omega, \alpha, x, y) d\omega d\alpha}. \quad (8)$$

Для моделювання течій, транспорту наносів та морфодинаміки застосовано модель CMS-Flow [4], яка базується на теорії мілкої води. Вітрові хвилі індукують течії, які описуються осередненими за глибиною рівняннями нерозривності та збереження імпульсу:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{F_x - \tau_{bx}}{\rho h}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{F_y - \tau_{by}}{\rho h}, \quad (11)$$

У формулах (9)–(11) використані такі позначення:  $\eta$  – рівень поверхні води;  $h$  – динамічна глибина;  $u$ ,  $v$  – компоненти швидкості течії;  $f$  – параметр Коріоліса;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $\mu$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості;  $\rho$  – густина води;  $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$  – компоненти придонної дотичної напруги тертя;  $F_x$ ,  $F_y$  – градієнти радіаційних напруг, обчислені через тензор радіаційних напруг за формулами

$$\begin{aligned} F_x &= -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}, \\ F_y &= -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}. \end{aligned} \quad (12)$$

Потоки наносів визначаються виразами

$$\begin{aligned} Q_x &= hCu - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial x}, \\ Q_y &= hCv - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial y}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тут  $C$  – усереднена по глибині концентрація наносів;  $\mu_c$  – коефіцієнт турбулентної дифузії. Зміни величини  $C$  описуються адвективно-дифузійним рівнянням

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = h \frac{C_{eq} - C}{T_s}, \quad (14)$$

де  $C_{eq}$  – рівноважна концентрація;  $T_s$  – час адаптації концентрації до рівноважного стану [4].

Якщо відомі  $Q_x$  і  $Q_y$ , то за балансовим рівнянням можна розрахувати зміни відміток дна:

$$(1 - p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0, \quad (15)$$

де  $z_b$  – ордината донної поверхні;  $p$  – пористість ґрунту.

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ХВИЛЬ У ЗОНІ МОРСЬКОГО ПІДХІДНОГО КАНАЛУ

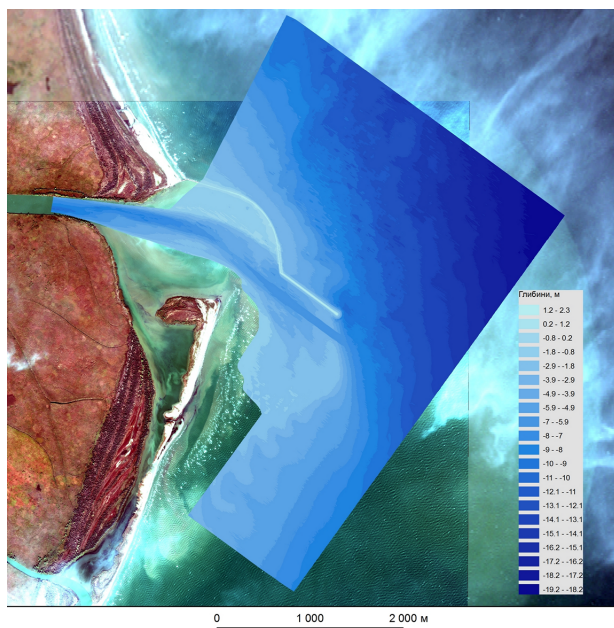


Рис. 2. Батиметрія прибережної зони

Розглянемо приклад апробації та застосування даної методики на базі матеріалів натурних спостережень, які проводилися на протязі останніх років в рамках моніторингу реалізованого проектування, будівництва та експлуатації глибоководного суднового ходу з р. Дунай у Чорне море на українській ділянці дельти. В ІГМ проводились дослідження гідроморфологічних і техногенних процесів для потреб проектування та експлуатації глибоководного суднового ходу р. Дунай – Чорне море гирлом Бистре. На його гирловій ділянці обладнано морський підхідний канал-МПК (Рис. 2). Його довжина становить 3.3 км, проектна ширина – (85 ... 100) м, глибина – (7.65 ... 9.52) м. Довжина огорожуючої дамби на барі, призначеної

для захисту каналу від замулення під дією хвиль та для забезпечення входу в канал суден з моря при сильних північно-східних та східних вітрах, становить 2.73 км. Найбільш уразливі частини дамби – прямолінійна ділянка та оголовок, який починаючи з

2010 року неодноразово зазнавав руйнувань у процесі експлуатації внаслідок дії хвиль, висота яких не була передбачена проектом.

Моделювання проведено на базі вимірів батиметрії, проведених 2015 року (див. Рис. 2). Із графіка видно, що досліджуваний район має складний рельєф дна. З морського боку дамби глибини змінюються від (2 ... 3) м в її верхній частині до 10 м біля оголовку. З боку МПК глибини біля дамби не перевищують 6 м.

Розрахунки проводились на сітці 10 м × 10 м. Для побудови хвильового спектру використані оцінки висот і періодів хвиль 2%-ої забезпеченості, можливих раз на сто років в районі гирла Бистре. Найбільш інтенсивні вітрові хвилі ( $H_s \geq 4$  м) у досліджуваний район приходять зі сходу й південного сходу.

Для південно-східного вітру зі швидкістю 21 м/с, вітровому хвилюванню 2%-ої забезпеченості відповідають висота значних хвиль  $H_s = 6.3$  м, піковий період  $T_p = 11$  с, а також параметри  $\gamma = 4$  і  $m = 8$ , які визначають ширину частотного й кутового спектрів. На Рис. 3 наведено просторові розподіли висоти й напрямку хвиль, отримані в результаті моделювання при заданих вхідних даних. Як свідчать розрахунки, висота хвиль з морського боку дамби біля оголовка перед бермою не перевищує 4.5 м, а на бермі вона знижується до 0.5 м. Висота хвиль, які набігають на дамбу з боку МПК, не перевищує 2 м і далі знижується в напрямку дамба-берег. Ширина зони руйнування хвиль в оголовку дамби становить 45 м.

Основний внесок у гідроморфодинаміку зони морського підхідного каналу вносять індуковані вітровим хвилюванням течії, дисипація енергії хвиль, які поширюються в напрямку берега, а також внесок річкового стоку рукава Бистрий.

Було проведено числовий експеримент з моделювання 48-годинної еволюції руслових процесів з початковими умовами, що відповідають шторму, який відбувся з 30 січня по 1 лютого 2015 р. Табл. 1 містить дані штормового циклу тривалістю 48 годин, з яких

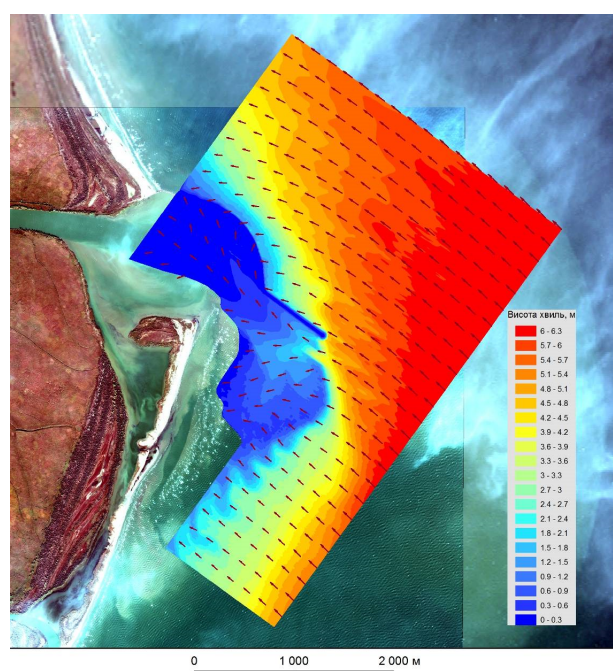


Рис. 3. Висота й напрям хвиль при південно-східному вітрі

Табл. 1. Напрямок та швидкість вітру за даними строкових спостережень на МП Усть-Дунайськ 30, 31 січня та 1 лютого 2015 р.

ДАТА	ГОДИНИ								
	00	03	06	09	12	15	18	21	
30.01	Пд 2	Пд 10	Пд 12	Пд 15	Пд 15	Пд 15	Пд 15	Пд 2	
31.01	Пд 19	Пд 20	Пд 22	Пд 22	ПдЗх 13	ПдЗх 13	ПдЗх 13	Пд 19	
01.02	Пд 10	ПдСх 9	Сх 10	ПнСх 8	ПнСх 8	Пн 2	ПнЗх 2	ПдЗх 10	

протягом 36 годин спостерігались вітри з південного сектора.

На морській межі розрахункової області задавались такі параметри частотно-кутового спектру: напрямок вітру південний; висота значних хвиль  $H_s = 2$  м, що відповідає штормовим вітрам (15 ... 17) м/с; піковий період  $T_p = 5$  с;  $\gamma = 3.3$ ;  $m = 4$ .

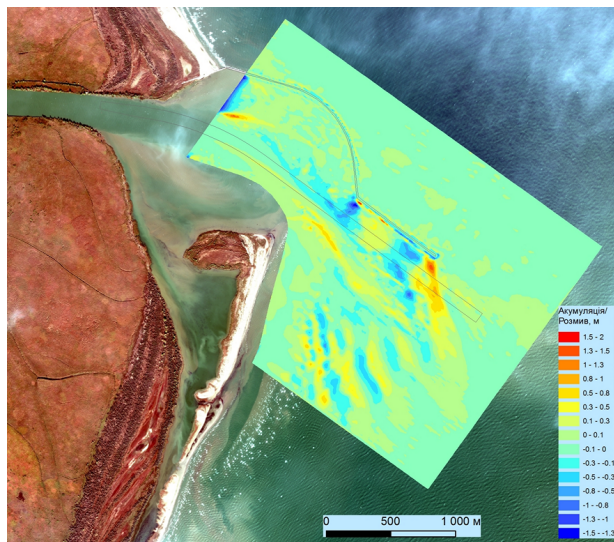


Рис. 4. Моделювання морфодинаміки в зоні МПК за період з 30.01.2015 по 01.02.2015 при вітровому хвилюванні південного напрямку

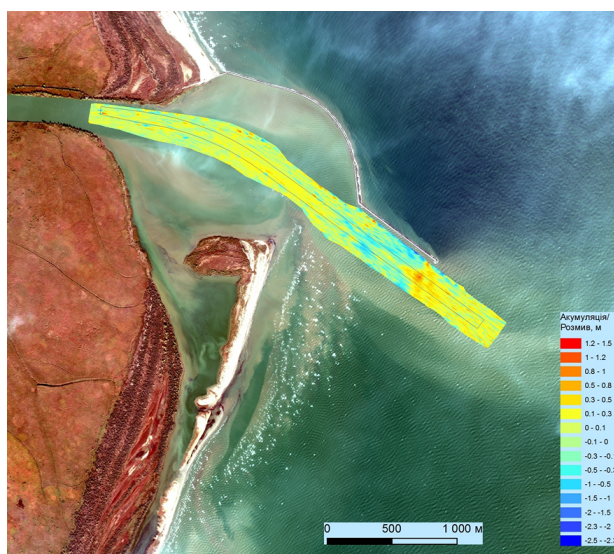


Рис. 5. Зміни в зоні МПК за результатами промірів глибин за період з 29.01.2015 по 04.02.2015

гаємо утворення послідовності барів поперечного типу, пов'язане з морфодинамічною нестійкістю, яка виникає при взаємодії хвиль і течій (утворення такого явища в природних умовах помітно на Рис. 6а).

Моделювання морфодинаміки виконувалось у два етапи. Спершу за моделлю CMS-Wave [1] визначались просторові розподіли висоти й напрямку хвиль, градієнти радіаційних напруг та дисипація енергії в зоні руйнування хвиль. Далі для розрахунку морфодинаміки застосовувалась числова модель CMS-Flow [4], в яку закладалися розраховані характеристики хвилювання, а також додаткові вихідні дані:  $Q = 500$  м<sup>3</sup>/с, що відповідає мінімальній витраті рукава Бистрий, густину донних наносів  $\rho = 2650$  кг/м<sup>3</sup> та середній діаметр їхніх частинок  $d = 0.2$  мм.

На Рис. 4 представлені зони акумуляції та розмиву підхідного каналу, отримані в результаті моделювання 48-годинної дії штормового хвилювання. Для верифікації цих даних був проведений геоінформаційний аналіз за результатами промірів глибин в каналі та його брівках до та після шторму, а саме: 29.01.2015 і 04.02.2015. Деформацію дна в результаті дії шторму розраховано як різницю його поверхонь на початку і в кінці розрахункового періоду. Результати аналізу промірів природнього замулення наведені на Рис. 5.

Графіки свідчать про суттєвий збіг результатів математичного моделювання й натурних спостережень зон акумуляції та розмиву. Зони акумуляції наносів в каналі розташовані біля оголовку дамби на вході в морський підхідний канал (див. Рис. 4 і 5). В зоні руйнування хвиль на правій брівці каналу спостерігаємо



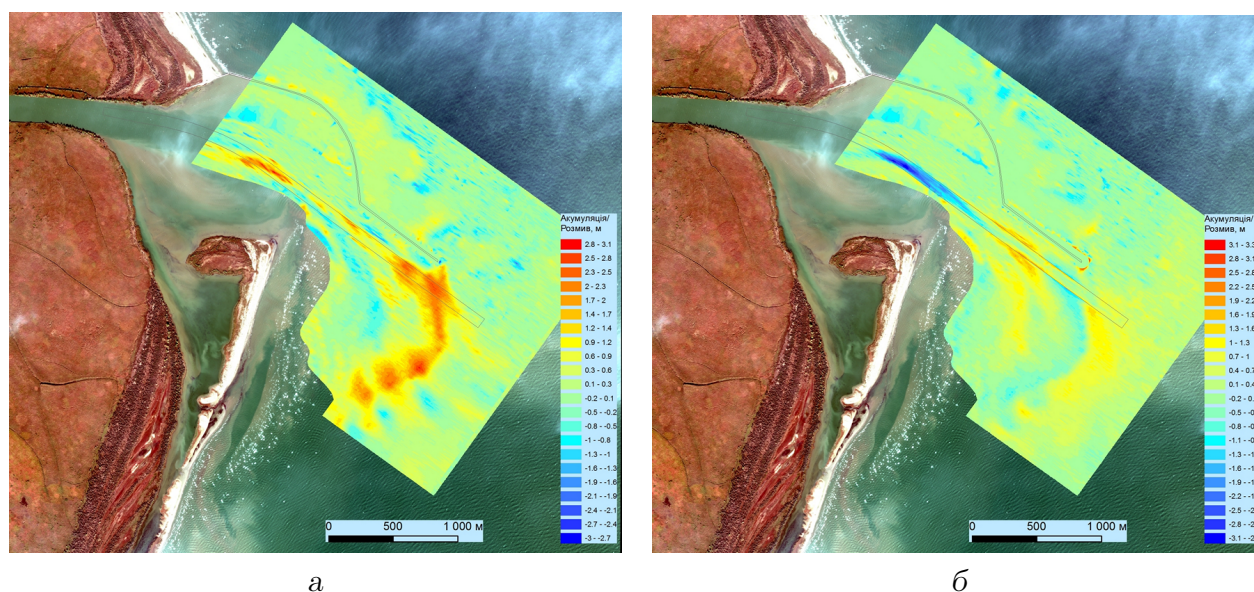


Рис. 6. Зміни за результатами промірів глибин:

а — за період з 04.06.2014 по 22.06.2015, б — за період з 22.06.2014 по 03.08.2015

Аналіз довгострокових морфологічних змін у прибережній зоні проводився за результатами натурних спостережень за період 2014–2016 рр. У статті представлені різниці поверхонь дна, обчислені на базі промірів глибин з 04.06.2014 по 22.06.2015 (Рис. 6а) та з 22.06.2015 по 03.08.2016 (Рис. 6б).

#### 4. ВИСНОВКИ

Розроблено методика визначення впливу вітрових хвиль на замулення в гирловій частині річок за результатами математичного моделювання й натурних спостережень на базі розрахункових комплексів і застосування геоінформаційної системи для генерування розрахункових сіток і аналізу результатів. Для моделювання вітрового хвилювання застосовано спектральну хвильову модель CMS-Wave, для моделювання течії та морфодинаміки – модель мілкої води, реалізовану в обчислювальному комплексі CMS-Flow. Для підготовки вихідних даних, аналізу та обробки результатів моделювання та наземних спостережень також використовувалась геоінформаційна система.

Результати математичного моделювання й аналіз натурних спостережень зон акумуляції та розмиву свідчать про задовільний збіг прогнозованого розташування та обсягів зони акумуляції наносів в каналі, розташованих біля оголовку дамби на вході в морський підхідний канал. У зоні руйнування хвиль на правій брівці каналу виявлено утворення послідовності підводних барів поперечного типу, пов'язане з морфодинамічною нестійкістю, яка виникає при взаємодії хвиль і течій. Аналогічні процеси спостерігаються за результатами математичного моделювання в рамках теорії мілкої води. Це свідчить про зародження на правобережному боці гирла (брівці підхідного каналу) форми типу природної коси, утворення якої буде сприяти зменшенню замулення каналу.

Аналіз довгострокових змін за результатами промірів глибин, свідчить, що внаслідок зведення захисної дамби, яка природним чином входить в структуру лівого берега

каналу, та утворення бару на його правому березі умови течії поступово наближаються до річкових. При цьому основні зони акумуляції наносів переміщуються до входу в морський підхідний канал. Використання даних оцінки обсягів замулення елементів гирла та судноплавного каналу для вчасного поглиблення фарватеру допоможе забезпечити судноплавство на цій ділянці р. Дунай.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] CMS-wave: A nearshore spectral wave processes model for coastal inlets and navigation : techreport : TR-08-13 / US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory ; executor: Lin L., Demirbilek Z., Mase H. et al. — Vicksburg, MS : 2008. — 120 p.
- [2] Wave response of Kahului Harbor, Maui, Hawaii : techreport : CERC-96-11 / US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory ; executor: Thompson E. R., Hadley L. L., Brandon W. A. et al. — Vicksburg, MS : 1996. — 230 p.
- [3] Mase H. Multidirectional random wave transformation model based on energy balance equation // *Coastal Engineering Journal*. — 2001. — Vol. 43, no. 4. — P. 317–337.
- [4] Coastal Modeling System: Mathematical formulations and numerical methods : techreport : ERDC-CHL-TR-14-2 / US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory ; executor: Sanchez A., Beck T., Lin L. et al. — Vicksburg, MS : 2014. — 230 p.
- [5] van Rijn L. C. Basic hydrodynamic processes in the coastal zone. — 2013. — Режим доступу: <https://www.leovanrijn-sediment.com/>.
- [6] Wave climate, coastal sediment budget and shoreline changes for the Danube Delta / Dan S., Stive M. J. F., Walstra D.-J. R., and Panin N. // *Marine Geology*. — 2009. — Vol. 262, no. 1-4. — P. 39–49.
- [7] Panin N., Jipa D. Danube river sediment input and its interaction with the northwestern Black Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. — 2002. — Vol. 54, no. 3. — P. 551–562.
- [8] Dan S. Sediment budget along the Danube Delta: Coastal currents vs Danube river input // *Danube News*. — 2007. — Vol. 12, no. 22. — P. 4–6.
- [9] Математическое и физическое моделирование заносимости морского подходного канала на баровом участке судоходного рукава Килийской дельты Дуная / Островерх Б. Н., Хомицкий В. В., Яковлев В. В., Ткаченко В. А. и Терещенко Л. Н. // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. — 2009. — № 12. — С. 125–135.
- [10] Прогнозування хвильового режиму на фарватерах зі складними умовами підходу / Хомицький В. В., Фомін В. В., Ткаченко В. О., Терещенко Л. М. і Горбатенко Є. Г. // Водний транспорт. — 2013. — № 3 (18). — С. 45–55.

- [11] Прогнозування прибережних течій на баровій частині фарватеру зі складними умовами підходу / Горбатенко Є. Г., Хомицький В. В., Фомін В. В., Терещенко Л. М. і Кремез В. С. // Водний транспорт. — 2014. — № 2. — С. 54–62.
- [12] Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1999. — Vol. 104, no. C4. — P. 7649–7666.
- [13] Ris R. C., Holthuijsen L. H., Booij N. A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1999. — Vol. 104, no. C4. — P. 7667–7681.
- [14] XBeach model description and manual. — Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, 2010. — 106 p.

## REFERENCES

- [1] L. Lin, Z. Demirbilek, H. Mase, J. Zheng, and F. Yamada, “CMS-wave: A nearshore spectral wave processes model for coastal inlets and navigation,” 2008.
- [2] E. R. Thompson, L. L. Hadley, W. A. Brandon, D. D. McGehee, and J. M. Hubertz, “Wave response of Kahului Harbor, Maui, Hawaii,” 1996.
- [3] H. Mase, “Multidirectional random wave transformation model based on energy balance equation,” *Coastal Engineering Journal*, vol. 43, no. 4, pp. 317–337, 2001.
- [4] A. Sanchez, T. Beck, L. Lin, Z. Demirbilek, M. Brown, and H. Li, “Coastal Modeling System: Mathematical formulations and numerical methods,” 2014.
- [5] L. C. van Rijn, “Basic hydrodynamic processes in the coastal zone,” 2013.
- [6] S. Dan, M. J. F. Stive, D.-J. R. Walstra, and N. Panin, “Wave climate, coastal sediment budget and shoreline changes for the Danube Delta,” *Marine Geology*, vol. 262, no. 1-4, pp. 39–49, 2009.
- [7] N. Panin and D. Jipa, “Danube river sediment input and its interaction with the north-western Black Sea,” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 54, no. 3, pp. 551–562, 2002.
- [8] S. Dan, “Sediment budget along the Danube Delta: Coastal currents vs Danube river input,” *Danube News*, vol. 12, no. 22, pp. 4–6, 2007.
- [9] B. N. Ostroverkh, V. V. Khomitsky, V. V. Yakovlev, V. A. Tkachenko, and L. N. Tereshchenko, “Mathematical and physical modeling of the sea approach channel drifting on the bar section of the navigable arm of the Kiliya Delta of the Danube river,” *Problemy Vodopostachannya, Vodovidvedennya ta Hidravliky*, no. 12, pp. 125–135, 2009.

- [10] V. V. Khomytskyi, V. V. Fomin, V. O. Tkachenko, L. M. Tereshchenko, and E. G. Horbatenko, "Prediction of the wave regime on fairways with difficult approach conditions," *Vodny Transport*, no. 3 (18), pp. 45–55, 2013.
- [11] E. G. Horbatenko, V. V. Khomytskyi, V. V. Fomin, L. M. Tereshchenko, and V. S. Kremez, "Forecasting of coastal currents on the bar part of the fairway with difficult approach conditions," *Vodny Transport*, no. 2, pp. 54–62, 2014.
- [12] N. Booij, R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen, "A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 104, no. C4, pp. 7649–7666, 1999.
- [13] R. C. Ris, L. H. Holthuijsen, and N. Booij, "A third-generation wave model for coastal regions: 2. verification," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 104, no. C4, pp. 7667–7681, 1999.
- [14] *XBeach model description and manual*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, 2010.

**Б. Н. Островерх, Л. С. Потапенко**

**Исследование влияния ветровых волн на заиливание морского  
подходного канала по результатам моделирования и натурального  
наблюдения**

Работа посвящена исследованию морфодинамики прибрежной зоны глубоководного судового хода р. Дунай – Черное море для определения влияния ветровых волн на заиливание морского подходного канала на базе применения комплекса числовых математических моделей и геоинформационных систем. Исследование выполнено по результатам математического моделирования и натурального наблюдения в течение нескольких лет на основе совместного использования расчетных комплексов и применения геоинформационной системы для генерирования расчетных сеток и анализа результатов. Ветровое волнение рассчитывалось по спектральной волновой модели CMS-Wave, а течение и морфодинамика – по модели мелкой воды CMS-Flow. Для подготовки исходных данных, анализа и обработки численных результатов и натуральных наблюдений использовалась геоинформационная система. Проведена оценка трансформации волн на ограждающей дамбе морского подходного канала. Определены зоны аккумуляции и размыва канала, образовавшиеся в результате моделирования 48 часов воздействия штормового волнения. Для верификации полученных данных проведен геоинформационный анализ по результатам промеров глубин в канале и на его бровках до и после шторма. Продемонстрировано соответствие результатов моделирования и наблюдаемых зон аккумуляции и размыва. Установлено, что зоны аккумуляции наносов в канале расположены у оголовка дамбы на входе в морской подходной канал. В зоне разрушения волн на правой бровке канала наблюдается последовательность баров поперечного типа, связанных с морфодинамической неустойчивостью, возникающей при взаимодействии волн и течений. Исследованы долгосрочные морфологические изменения под действием штормового волнения в зоне глубоководного судового хода. Определено влияние защитных сооружений на заиливание канала. Условия течения постепенно

приближаются к речным, а основные зоны аккумуляции наносов перемещаются ко входу в морской подходной канал. Эти изменения происходят в результате строительства защитной дамбы, которая естественным образом входит в структуру левого берега канала, и образования бара на его правом берегу.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** морфодинамика дна, течение, устье, морской подходной канал, зона аккумуляции

***B. M. Ostroverh, L. S. Potapenko***

**Study of the influence of wind waves on the siltation of the sea approach channel based on the results of modeling and field observation**

The work is devoted to the study of the morphodynamics of the coastal zone of the deep water passage of the Danube – Black Sea to determine the effect of wind waves on the silting of the marine approach channel based on the use of a complex of numerical mathematical models and geographic information systems. The study was carried out based on the results of mathematical modeling and field observation for several years based on the joint use of computational complexes and applying a geographic information system for generating computational grids and analyzing the results. Wind waves and the flow and morphodynamics were calculated using the CMS-Wave spectral wave model and CMS-Flow shallow water model, respectively. A geographic information system was used to prepare initial data and analyze and process numerical results and field observations. Wave transformation was evaluated on the protecting dam of the sea approach channel. Zones of accumulation and erosion of the channel formed as a result of modeling 48 hours of storm wave impact were determined. To verify the obtained data a geographic information analysis was carried out based on the results of depth measurements in the channel and on its edges before and after the storm. The correspondence between the simulation results and the observed zones of accumulation and erosion is demonstrated. The zones of sediment accumulation in the channel occur at the head of the dam entering the sea approach channel. A sequence of bars of the transverse type associated with morphodynamic instability arising from the interaction of waves and currents occurs in the zone of wave destruction on the right edge of the channel. The long-term morphological changes under the action of storm waves in the zone of deep-water navigation were studied. The influence of protective structures on the silting of the canal is determined. An analysis of morphological changes in the coastal area indicates that currents gradually approach the river currents and the main zones of sediment accumulation are moving toward the entrance to the marine approach channel. These changes are caused by the construction of a protective dam, which naturally enters the structure of the left bank of the canal and bar formation on its right bank.

**KEY WORDS:** *bottom morphodynamics, current, estuary, sea access channel, accumulation zone*