



## МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ШТУЧНИХ РИФІВ З ХВИЛЕВИМ ПОЛЕМ (НА ПРИКЛАДІ ОДЕСЬКОГО УЗБЕРЕЖЖЯ)

*Муркалов О.Б.* – к.г.н.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова  
ugeocoast@gmail.com

*Рижко В.Є.* – головний біолог

лабораторії гідравлічних досліджень портових акваторій ДП «ЧОРНОМОРНДПРОЕКТ»  
blasgipa17@gmail.com

*Калініченко В.І.* – завідувач лабораторії

гідравлічних досліджень портових акваторій  
ДП «ЧОРНОМОРНДПРОЕКТ»  
blasgipa17@gmail.com

Створення штучних рифів – один з перспективних напрямів сучасного морського й океанічного природокористування. Практичні успіхи цього напрямку спираються на комплексний підхід у відновленні водних екосистем. Природні умови і видовий склад водних організмів у північно-західній частині Чорного моря істотно відрізняються від умов інших акваторій Світового океану, де традиційно створюються та експлуатуються штучні рифи. У статті узагальнені результати експериментальних робіт зі створення штучних рифів у регіональних природних умовах Одеського узбережжя в ХХ столітті. Проаналізовано міжнародний досвід створення штучних рифів із заданими властивостями та розглянуто особливості застосування математичного моделювання хвильових процесів у разі проектування штучних рифів.

Одним з перспективних напрямів є створення на Одеському узбережжі штучних рифів комбінованого призначення: альтернативний варіант реконструкції та ремонту гідротехнічних споруд; хвилегасні та берегозахисні споруди пристосовані також для заселення водними організмами і продукування наносів та уламкового матеріалу для живлення берегової зони.

Викладено результати дослідження взаємодії трьох варіантів штучних рифів з полем вітрових хвиль. Застосована хвилева модель третього покоління SWAN version 41.10. Вхідними параметрами моделі є: розрахункові параметри хвиль хвиленебезпечних напрямків 4% забезпеченості в режимі, цифрова модель рельєфу дна, глибина розташування та геометричні параметри штучних рифів.

За результатами моделювання встановлено, що досліджені варіанти штучних рифів виконують хвилезахисну функцію. Залежно від співвідношення глибини та геометричного місця розташування хвилегасні (берегозахисні) функції виконують не тільки окремі споруди, а їх сукупність – рифовий комплекс.

Спостерігається зменшення висоти хвиль на 0,1–0,2 м у місці їх розташування. Придонні хвилеві орбітальні швидкості мають максимальні значення на гребнях ШР, мінімальні – на відстані 0,25 довжини набігаючої штормової хвилі від споруди. За цих значень не буде розмиватися матеріал гребенів розміром  $\geq 10$ –20 мм та  $\geq 4$ –10 мм основи ШР.

**Ключові слова:** моделювання, поле хвиль, Одеське узбережжя, штучний риф, SWAN.

### Вступ

Одними з актуальних сучасних проблем північно-західної частини Чорного моря є деградація водних екосистем, погіршення якості прибережних вод та руйнування морських берегів. Запобігання цим ризикам, які виникли внаслідок господарської діяльності, дослідниками бачиться в комплексній біологічній меліорації водного середовища (Александров

2008; Виноградов и др. 2014; Воробьева и др. 2019, Крючков и др. 2017). Перспективним на тепер є застосування в комплексі біологічної меліорації екологічного методу (природних аналогів), який ґрунтується на закономірностях, пов'язаних із життєдіяльністю водних організмів у сприятливих природних або штучно створених умовах. Як показали багаторічні дослідження і міжнародний практичний досвід,

одним з ефективних рішень є спорудження штучних рифів (ШР) (Искусственные рифы ... 1990; Fabi et al. 2015; Sato 1985). Згідно із сучасними уявленнями, ШР – доволі гнучкий інструмент, який може виконувати одночасно декілька функцій (Александров 2008; Fabi et al. 2015; What is ...; Seaman 2019), приваблення риб і концентрація безхребетних; роль штучного субстрату, сприятливого для відкладення ікри і прикріплення личинок та іншої молоді; створення притулку для молоді риб та інших тварин; створення оптимальних штучних умов існування водних організмів; біофільтр для очищення води від забруднюючих речовин та замулення; захист від дії хвиль і течій; виконання берегозахисної функції; привабливість для дайвінгу, фрідайвінгу та інших водних видів спорту.

ШР незалежно від конструкції та призначення споруджуються шляхом розміщення у водній екосистемі твердого субстрату. Тому вони можуть бути за характером свого впливу біологічно негативними, нейтральними та позитивними (Зайцев 1983; Кузнецов и др. 2015; Шахин 2019; Kim et al. 2021). Одним із негативних наслідків створення ШР є вторинне забруднення водного середовища, наприклад, у разі їх руйнування. В іншому випадку прогнозовані біопозитивні властивості, конструкція та матеріали, зміна і контроль абіотичних факторів середовища забезпечують стійкість та високу ефективність споруди (Fabi et al. 2015). Вони досягаються у разі врахування таких аспектів, як: геологічна стабільність середовища; глибина розташування та параметри ШР; вітро-хвильові умови та режим течій; літодинамічні процеси; солоність та інші океанологічні процеси і характеристики водного середовища, в якому буде розташовано ШР.

Розмір ШР більшою мірою визначається його ієрархічною підпорядкованістю: окремий ШР – 800–1000 м<sup>3</sup>, група ШР – 8000–10000 м<sup>3</sup>, рифовий комплекс – 80000–100000 м<sup>3</sup> (Александров 2008; Зайцев 1987; Fabi et al. 2015). Мінімальний розмір ШР відповідає мінімальному масовому об'єму – 400 м<sup>3</sup> (Sato 1985). Окремі ШР можуть бути представлені скелями (брилами), штучними кубами, рифболами та ін. Розрізняють структурний об'єм і внутрішній об'єм ШР. Під структурним об'ємом розуміють об'єм матеріалу споруди. Внутрішній об'єм – життєвий простір водних організмів, сукупність вільного простору в ШР. Під час проектування залежно від призначення ШР співвідношення між об'ємами змінюється або для досягнення стійкості споруди, або посилення біопозитивного ефекту. Більш вагоме значення, ніж структура та дизайн ШР, має зменшення розмірів елементів їх конструкції та встановлення залежно від напрямку переважаючих на акваторії течій.

У кожному випадку під час проектування враховується оптимальна поверхня та матеріал ШР. До матеріалу висуваються такі вимоги (Fabi et al. 2015; De Rijcke and Maarten 2021; Sato 1985), як:

- стабільність та вага (щонайменше подвійна питома вага морської води; альтернативою є фізичне встановлення структури на якір на дні);
- довговічність (опір хімічним і фізичним чинникам впливу водного середовища на споруди впродовж часу не менше мінімальної тривалості життя виду, для якого створюється ШР  $\geq 30$  років);
- інертність (уникання забрудненню і біоакмулюванню забруднень у довіллі і водних організмах);
- придатність для колонізації придонними угрупованнями;
- економічність.

Наведений стислий огляд публікацій показав, що перелік характеристик та вимог до ШР значний, що ускладнює проектування цих структур. Одним з методів визначення абіотичних параметрів водного середовища та коригування параметрів ШР, прийняття експертних рішень є, наприклад, математичне моделювання хвилевих процесів. Застосування такого методу дозволяє прогнозувати експлуатацію ШР впродовж певного відрізка часу, навіть за обмеженості вхідних параметрів моделі (De Rijcke and Maarten 2021; Kim et al. 2021). Результат моделювання визначається якістю і повнотою вхідних даних та калібруванням застосованої моделі, особливо в регіональних і локальних умовах.

У зв'язку з цим потрібно проаналізувати досвід створення ШР у північно-західній частині Чорного моря. Природні умови і видовий склад водних організмів тут суттєво відрізняються від умов акваторій Світового океану, де традиційно споруджуються і експлуатуються ШР. У північно-західній частині Чорного моря ШР створювалися переважно в минулому сторіччі з урахуванням сучасних на той час теоретичних і практичних розробок. З експериментальним характером створення структур пов'язані різні глибини їх встановлення, застосовані матеріали, конструктивні особливості та параметри. Географія створення ШР тут доволі значна та охоплює природні умови лиманів, заток та відкритого моря (табл. 1).

Аналіз формування зооценозів трьох ШР, споруджених на Одеському узбережжі (Алексеев и др. 1987), та дослідження фітообрастання твердих субстратів (Миничева и др. 1998) показали, що найбільш сприятливими для чорноморських видів є активні поверхні з понтичного вапняку. Атрактивні властивості бетону та гуми займають проміжний стан, гладкі поверхні з граніту виявилися несприятливими для формування зоо- і фітоценозів.

## Історія створення і параметри ШР у північно-західній частині Чорного моря

Рік	Місце встановлення	Глибина	Матеріал	Параметри	Джерело
1980	Чорне море, північно-західна частина, Дністровський лиман	?	1000 автомобільних покриттів	4500 м <sup>2</sup>	Гончаров 1981
1982	Чорне море, північно-західна частина, на захід від входу до Малого Аджалицького лиману	0–1,0 м	Різномірні ґрунти, облямування брилами вапняку	50000 м <sup>2</sup>	Зайцев и Яценко 1983
1982?	Чорне море, північно-західна частина, Одеське узбережжя	1,5–2,0 м	Хвилем розпластаного типу, гранітне відсіпання накрите решітчастими бетонними секціями	?	Александров 2008
1983	Чорне море, північно-західна частина, Одеське узбережжя, м. Великий Фонтан	11,0 м	Конструкція «Риф»: 9 6-метрових металічних труб діаметром 20 см, вертикально закріплених у бетонній плиті (основі) з габаритами 2 м x 2 м	20 конструкцій (80 м <sup>2</sup> )	Витюк и др. 1987
1985	Чорне море, північно-західна частина, Одеська затока, м. Північний Одеський	3,5–4,0 м	Багатоярусна конструкція, 160 автомобільних покриттів	5 м x 5 м x 2 м (25 м <sup>2</sup> )	Александров 2008
2002	Чорне море, північно-західна частина, Одеська затока, с. Крижанівка	?	Збірна конструкція, 120 автомобільних покриттів	?	Чекотун и Цыкало

Таким чином, головні закономірності, сформульовані вітчизняними дослідниками під час натурних спостережень у разі експериментального будівництва ШР на Одеському узбережжі, відповідають отриманим на інших акваторіях Світового океану. Застосування методу математичного моделювання окремо в публікаціях не розглянуто, що може являти новизну дослідження.

Об'єктом дослідження є штучні рифи. Предмет дослідження – взаємодія штучних рифів з хвилевим полем залежно від їх розташування.

Головною метою проведеного дослідження є отримання закономірностей взаємодії штучних рифів у регіональних природних умовах Одеського узбережжя з хвилевим полем за результатами математичного моделювання.

#### Матеріали та методи досліджень

Дослідження взаємодії ШР з хвилевим полем виконано для ділянки узбережжя північно-західної частини Чорного моря, яка знаходиться у складі Одеського берегозахисного комплексу (рис. 1).

Під час дослідження ШР використано обмежений перелік вихідних даних моделювання, який включав у себе:

- гідрометеорологічні умови акваторії;
- рельєф дна;
- глибину розташування та геометричні параметри ШР;
- розмір ШР (ієрархічність).

У цьому дослідженні геологічна будова, донні відклади, матеріал та характер поверхні, дані про внутрішній об'єм ШР у разі моделювання не були враховані, оскільки потребують додаткового дослідження та застосування інших моделей.

Інформація про гідрометеорологічні умови акваторії досліджень отримана з довідників та публікацій (Гидрометеорологические условия ... 2012; Виноградов и др. 2014; Тучковенко и Сахненко 2008). Хвиленебезпечними для акваторії досліджень є вітри північно-східного (ПнС), східного (С) та південно-східного напрямків (ПдС). Їх повторюваність протягом середньостатистичного року дорівнює 7,6%, 9,2% та 12,5% відповідно (Гидрометеорологические условия ... 2012).

З огляду літератури, що наведений вище, відомо, що довговічність ШР повинна становити не менше 30 років, тому під час їх проєктування потрібно виконувати такі ж розрахунки характеристик вітрових хвиль, як для берегозахисних споруд. Параметри вітрових хвиль хвиленебезпечних напрямків розраховані відповідно до обов'язкового додатку 1 БНіП (СНіП 1986) графічно за номограмами та перевірені розрахунком за формулами (Лаппо и др. 1990). Вхідні параметри вітрового хвилювання моделі представлені в таблиці 2.

Дослідження взаємодії поля вітрових хвиль з ШР виконано із застосуванням хвилевої моделі третього покоління SWAN (SWAN 2016). На відміну від БНіП, у SWAN реалістично моделюються процеси взаємодії

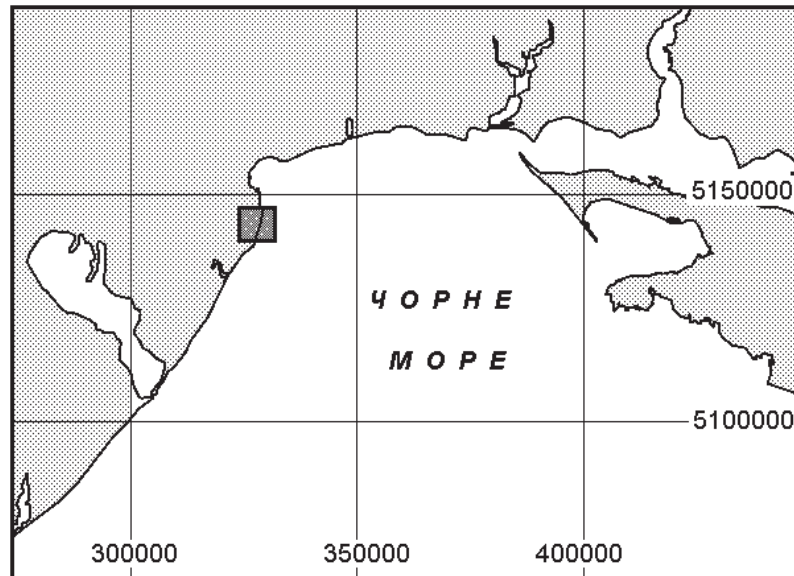


Рис. 1. Карта-схема місцезонашування ділянки досліджень (позначено квадратом, система координат: WGS 84 / UTM zone 36N)

Таблиця 2

Розрахункові параметри вітру та хвиль 4% забезпеченості

Румби	Швидкість вітру, $W_{10}$ , м/с	Висота хвиль, $H_{13\%}$ , м	Ср. довжина, $\lambda$ , м	Період, $T$ , с
ПнС	24,0	1,98	28,0	4,30
С	22,0	1,93	34,8	4,75
ПдС	23,0	2,98	48,3	5,63

хвилювання зі складним рельєфом дна та гідротехнічними спорудами, які мають складні контури. Це дозволяє моделювати ШР як низько гребеневі структури (НГС) (De Rijcke and Maarten 2021). У SWAN використовується характерна або значуща висота хвиль ( $H_s$ ). Вона визначається як середня з 1/3 найбільш високих хвиль та відповідає забезпеченості близько 13% (Лаппо и др. 1990; Леонтьев 2001). За розрахунковою швидкістю вітру 4% забезпеченості були отримані вхідні модельні параметри вітрових хвиль 13% забезпеченості в кінці зони генерації на глибинах 15–20 м.

Однією зі складових частин моделювання поля вітрових хвиль на ділянці розташування ШР є створення якісної цифрової моделі рельєфу дна (ЦМРД). Практика створення ШР зазвичай базується на вимірюванні глибин різної детальності (Кузнецов и др. 2015; Fabi et al. 2015). Використання результатів промірів для побудови ЦМРД дозволяє отримати актуальний рельєф дна і передати суттєві деталі його будови. У разі використання гідрографічних і топографічних карт на якість ЦМРД впливає їх масштаб та вік (Нарожная и Буряк 2016). У разі створення ЦМРД вирішується питання вкладання

сіток з різною деталізацією глибин – детальної сітки на ділянці розташування споруди і більшої за площею крупної сітки розрахункової області. Застосування вкладених сіток дозволяє зменшити похибки розрахунків на «мокрих межах» моделі. Малий розмір вічка дозволяє наблизити параметри моделі до фізичних розмірів ШР, але може знизити «адекватність» моделювання. У разі крупної розрахункової сітки у SWAN передбачена можливість врахування позамасштабних перешкод. У дослідженні використана розрахункова регулярна дрібна сітка з розміром вічка 2 м x 2 м (рис. 2). Найвні гідротехнічні споруди задаються SWAN як позамасштабні об'єкти.

Моделювалось три варіанти ШР (рис. 3): А – ШР сховище, може бути альтернативним варіантом ремонту ушкоджених ділянок гідротехнічних споруд; Б – окремі ШР у вигляді ланцюга модулів – орієнтирів; В – рифовий комплекс. На досліджуваній акваторії відбувається пересування маломірних суден та інших плавзасобів. У зв'язку з цим параметри ШР не повинні створювати небезпеку для судноплавства. Вибрано модельні розміри ШР (варіанти А, Б), які відповідають мінімальному масовому

об'єму 400 м<sup>3</sup>. Вони задані на ЦМРД прямо шляхом моделювання глибин на дрібній сітці. Варіант (А) моделювався у вигляді споруди розмірами 10 м x 10 м з гребенем на рівні гребню підводного хви-

лелому. Варіант (Б) моделювався у вигляді ланцюга окремих рифів розмірами 20 м x 20 м та висотою над оточуючим дном 1 м. ШР варіант (В) має висоту над дном 1 м, ширину – 10–20 м та довжину 100 м.

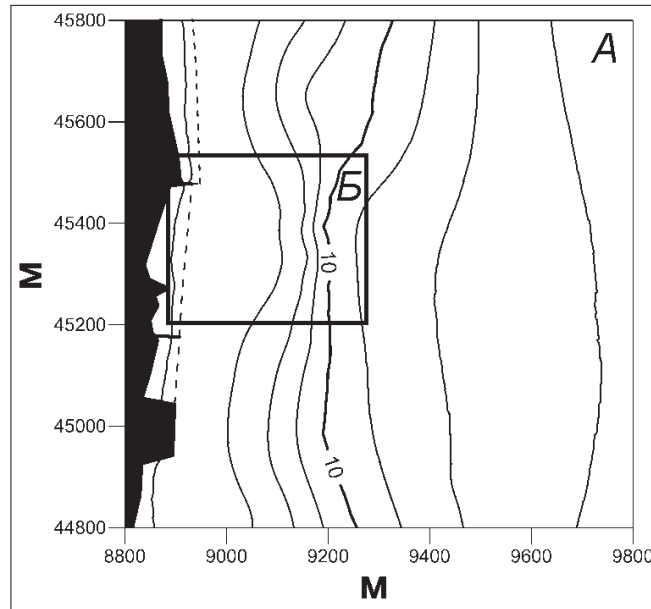


Рис. 2. Цифрова модель рельєфу дна розрахункової області: А – велика сітка, Б – вкладена дрібна сітка (крок ізобат 2 м)

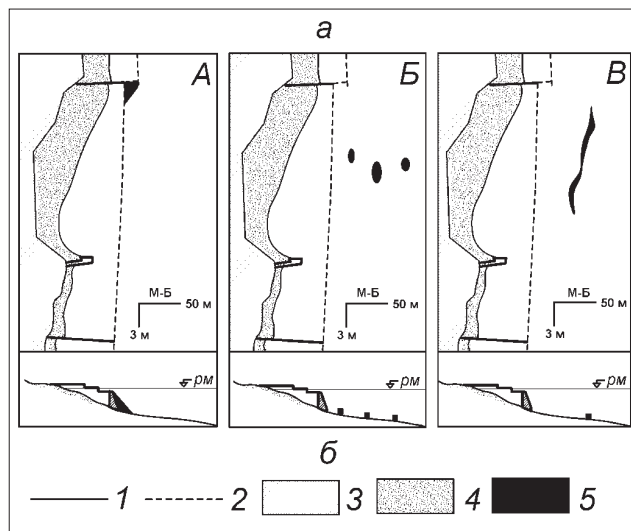


Рис. 3. Планове положення (а) та поперечний профіль від берега через захищену акваторію в море (б) варіантів розміщення ШР (А, Б, В – пояснення в тексті): 1 – буни; 2 – підводний хвилелом; 3 – берег; 4 – штучний пляж; 5 – ШР

### Результати та обговорення

Моделювання хвильового поля на рельєфі із заданими параметрами та розташуванням ШР

виконано для розрахункового шторму 4% забезпеченості в режимі, можливого на акваторії дослідження 1 раз у 25 років. Зважаючи на це, отримані



результати моделювання відповідають екстремальним умовам, тому дозволяють дослідити берегозахисну функцію споруди та побічно оцінити її стійкість в умовах екстремального хвилювання. Для цього аналізуються висоти значних хвиль ( $H_s$ , м) та середньоквадратичне значення максимальної придонної орбитальної швидкості ( $U_b$ , м/с), які враховуються в більшості гідравлічних і гідротехнічних розрахунків.

*ШР (варіант А).* Взаємодія поля вітрових хвиль з підводним хвилеломом складної конфігурації у разі зведення ШР (варіант А) представлена на рисунку 4. Відзначається зменшення висот хвиль у місці розташування ШР на 0,1–0,2 м у разі штормів ПнС та С напрямків. Найбільший хвилегасний ефект, а відповідно й берегозахисний, відзначається у разі шторму ПдС напрямку. Висота значущих хвиль у місці розташування ШР у цій штормовій ситуації зменшується на 0,3–0,4 м. У всіх штормових ситуаціях  $H_s$  над гребенем ШР не перевищує 1 м.

Одним з вірогідних негативних проявів взаємодії поля вітрових хвиль зі спорудою є, як можна побачити з рисунку 4, формування відбитих хвиль. Осо-

бливо погіршується хвильова ситуація споруди у разі шторму С напрямку. Це потенційно може привести до зростання висоти хвиль на підходах до споруди.

Максимальні розрахункові придонні орбитальні швидкості досягають над гребенем ШР у всіх штормових ситуаціях 1,1 м/с. Зростання  $U_b$  над гребенем споруди пов'язане з їх обваленням. Без ШР  $U_b$  дорівнюють 0,6–0,8 м/с. На відстані 0,25 довжини набігаючої вітрової хвилі від ШР  $U_b$  дорівнюють, як і без споруди, залежно від напрямку шторму – 0,7–0,9 м/с. Отримані розрахункові придонні швидкості є допустимими нерозмиваючими для матеріалу розміром  $\geq 20$  мм для ділянки гребня та  $> 5$ –10 мм на прилеглому дні. Для збереження цілісності гребня споруди та запобіганню розмиву дна в її основі потрібно використовувати матеріал не менше зазначеного розміру.

*ШР (варіант Б).* За наявності на дні ШР (варіант Б) відзначається зменшення висот хвиль на акваторії їх розташування та в тильній частині між спорудами та підводним хвилеломом (рис. 5). Наявність ланцюга ШР призводить до зменшення  $H_s$  з 1,3–1,4 м до 1,2 м. Довжина зони з послабленим хвилюванням у затиллі споруд дорівнює 50–55 м.

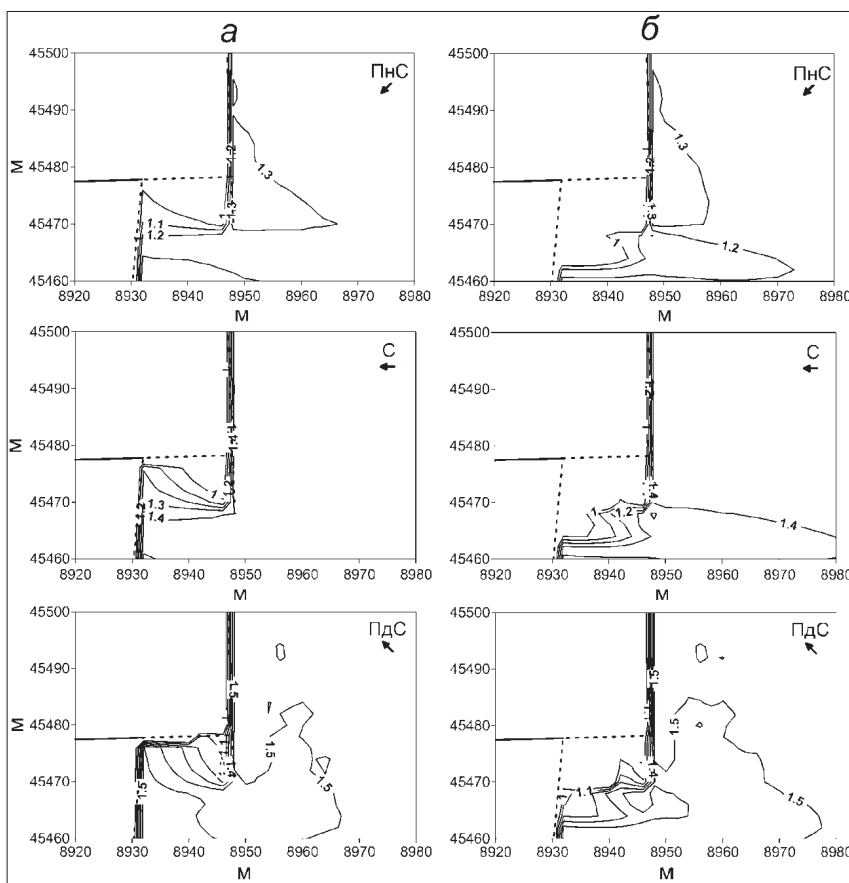


Рис. 4. Висота значущих хвиль ( $H_s$ , м) у штормах різного напрямку : а – вихідний рельєф дна, б – рельєф дна з ШР (варіант А)

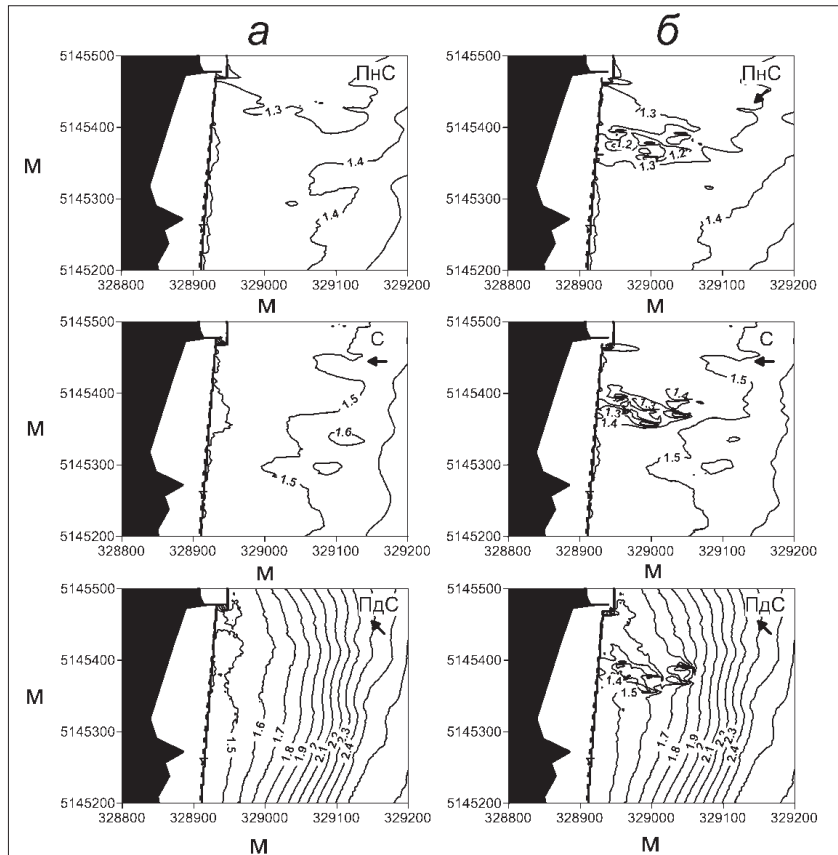


Рис. 5. Висота значущих хвиль ( $H_s$ , м) у штормах різного напрямку: а – вихідний рельєф дна, б – рельєф дна з ШР (варіант В)

При цьому можна помітити, що вплив глибини розташування ШР на  $H_s$  проявляється як сумісна дія всього рифового комплексу. В зв'язку з цим для практики берегозахисту цікавим є дослідження оптимального співвідношення глибини та геометричного місця розташування ШР, за якого закладені, наприклад берегозахисні функції, виконують не тільки окремі споруди, а їх сукупність – рифовий комплекс.

Зведення ланцюгу ШР супроводжується диференціацією значень  $U_b$  на різних ділянках дна. Значення придонних орбітальних хвильових швидкостей зростають від 0,6 м/с у разі відсутності споруд до 0,9 м/с за їх наявності. На дні з незмінним рельєфом придонні орбітальні хвильові швидкості дорівнюють у модельованих штормових ситуаціях 0,6–0,8 м/с. Під час будівництва ШР між окремими спорудами значення  $U_b$  зменшуються до 0,5–0,6 м/с. Над гребнями ШР залежно від напрямку шторму  $U_b$  зростають до 0,7–1,0 м/с. На відстані 0,25 довжини вітрової хвилі придонні швидкості залишаються такими ж, як і на дні з незмінним рельєфом – 0,6–0,8 м/с. У зоні малих значень  $H_s$  за ланцюгом ШР  $U_b$  зменшуються з 0,7–0,8 м/с до 0,6 м/с.

Такі значення  $U_b$  та їх розподіл на дні можуть вказувати на ймовірний розвиток різноспрямованих

процесів розмиву, акумуляції та транзиту донного матеріалу на обмежених за площею ділянках. Виходячи з отриманих розрахункових значень  $U_b$ , розмір матеріалу гребня та основи ШР (варіант В) не повинні бути меншими за 8–10 мм.

*ШР (варіант В).* Моделювання ШР (варіант В) дозволило дослідити взаємодію поля набігаючих хвиль з низькогребеневою спорудою (НГС), розташованої перед підводним хвилеломом. Таке поєднання підводного хвилелому з НГС цікаве з точки зору їх комбінації у вигляді східчастої підводної берегозахисної або наносотримуючої структури. Як видно з рисунка 6, наявність ШР (варіант В) призводить до зменшення висоти хвиль на 0,1–0,2 м для модельованих штормових ситуацій у місці їх розташування. Хвилегасний ефект НГС найбільш помітний у разі розвитку ПдС шторму. Над гребнем ШР відбувається обвалення хвиль, при цьому ізолінія  $H_s = 1,4$  м зміщується в море. В тилу споруди, перед підводним хвилеломом, висоти значущих хвиль не змінюються. Поле хвиль між ШР та хвилеломом стає більш упорядкованим. Можна побачити, що за наявності ШР зникають окремі ділянки високих хвиль, які переміщуються до гребня підводного хвилелому.

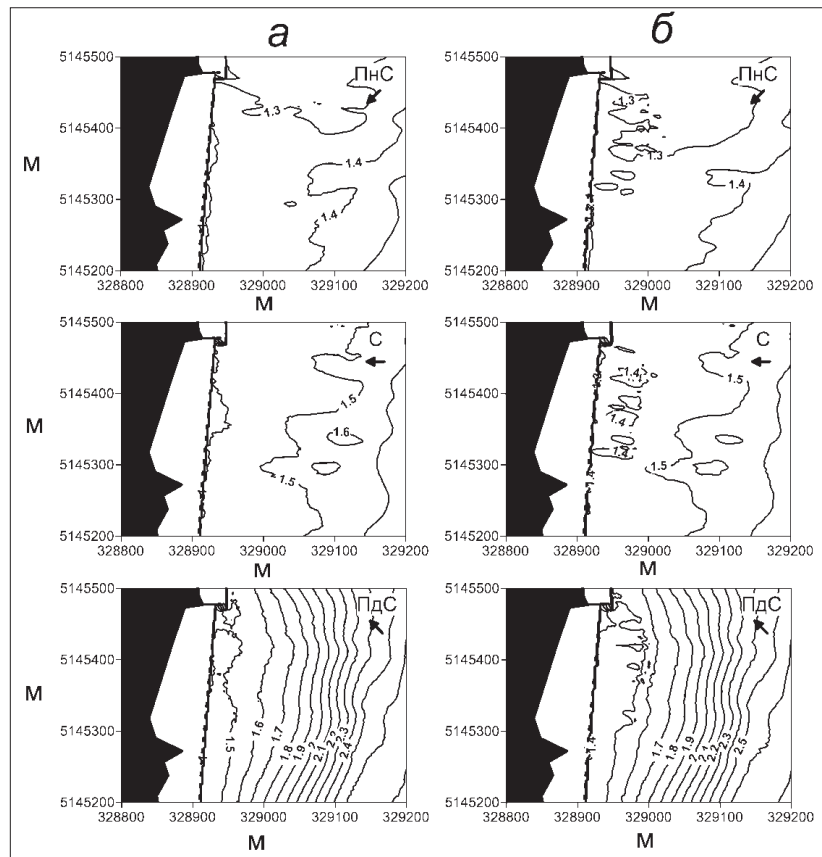


Рис. 6. Висота значущих хвиль ( $H_s$ , м) у штормах різного напрямку: а – вихідний рельєф дна, б – рельєф дна з ШР (варіант Б)

На відміну від поля вітрових хвиль, придонні орбітальні швидкості порівняно з незмінним рельєфом дна змінюються тільки у разі розвитку С шторму. Уб дорівнюють 0,6–0,8 м/с. У разі С шторму вони зростають з 0,7 м/с до 0,8 м/с. Це пов'язано з більш інтенсивною трансформацією хвиль, які підходять до споруди по нормалі. Цим значенням Уб відповідає розмір матеріалу, який не буде розмиватися, 4–8 мм.

#### Висновки

Застосування математичного моделювання гідрологічних процесів, зокрема вітрового хвилювання, на кожному з етапів створення ШР дозволяє оптимізувати їх параметри, розташування на дні та забезпечити тривалу експлуатацію.

Як показало проведене дослідження, залежно від співвідношення глибини та геометричного місця розташування, ієрархічної підпорядкованості берегозахисні (хвилегасні) функції виконують

не тільки окремі споруди, а їх сукупність – рифовий комплекс.

Моделювання взаємодії трьох варіантів ШР показало, що їхня взаємодія з набігаючими хвилями відрізняється залежно від конкретної штормової ситуації. Загальним є зменшення висоти хвиль на 0,1–0,2 м у місці розташування ШР. Для розподілу Уб відзначається диференціація значень – максимальні значення відзначаються на гребенях ШР, мінімальні – на відстані 0,25 довжини набігаючої штормової хвилі від споруди. У разі цих значень Уб не буде розмиватися матеріал гребенів розміром  $\geq 10$ –20 мм та  $\geq 4$ –10 мм основи ШР. Досліджені варіанти ШР виконують хвилезахисну функцію.

Отримані результати підтверджують застосовність математичного моделювання хвильвих процесів у комплексі заходів проектування та дослідження ШР.

#### Список використаних джерел

1. Александров Б.Г. Гидробиологические основы управления состоянием прибрежных экосистем Черного моря : монография. Киев : Наукова думка, 2008. 175 с.

2. Алексеев Р.П., Зайцев Ю.П., Синегуб И.А. Формирование зооценоза различных искусственных рифов в северо-западной части Черного моря. *Искусственные рифы для народного хозяйства* : тезисы докладов Все-



союзной конференции. Москва, 2–4 декабря 1987 г., Москва, 1987. С. 57–59.

3. Виноградов А.К., Богатова Ю.И., Синегуб И.А. Экология морских портов (Черноморско-Азовский бассейн) : монография. Одесса : Астропринт, 2014. 568 с.

4. Витюк А.В., Губанов В.В., Зайцев Ю.П. Модульная установка «Риф» для промышленного выращивания мидий и мелиорации морской среды. *Искусственные рифы для рыбного хозяйства* : тр. Всесоюз. конф. (Москва, 2–4 дек. 1987 г.). Москва, 1987. С. 76–78.

5. Воробьева Л.В., Кулакова И.И., Бондаренко А.С., Портянко В.В. Контактные зоны Черного моря: мейофауна литоконтра северозападного шельфа : монография. Одесса : «Фенікс», 2019. 196 с.

6. Гончаров А.Д. Способ повышения продуктивности прибрежных биоценозов моря и приморских водоемов. *Рыбное хозяйство*. 1981. № 7. С. 42–44.

7. Зайцев Ю.П., Яценко В.А. Экологические аспекты гидротехнического строительства в прибрежной зоне моря. *Биология моря*. Владивосток. 1983. № 5. С. 62–66.

8. Зайцев Ю.П. Искусственные рифы – инструмент управления экологическими процессами в прибрежной зоне моря. *Искусственные рифы для рыбного хозяйства* : тез. докл. Всесоюз. конф. (Москва, 2–4 декабря 1987 г.). Москва, 1987. С. 3–5.

9. Гидрометеорологические условия морей Украины / Ильин Ю.П. и др. Севастополь : НПП «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. Том 2: Черное море. 421 с.

10. Искусственные рифы для рыбного хозяйства. *ВНИРО* : Сб. науч. тр. Москва, 1990. 237 с.

11. Крючков В.Г., Туркулова В.Н., Буряк Н.М. Экологические и экономические предпосылки создания морского комплексного сооружения для выращивания в поликультуре двусторчатых моллюсков и рыб. *Труды ЮЗНИРО*. 2017. Т. 54. С. 167–179.

12. Кузнецов В.В., Кузнецова Е.Н., Гончаров С.М., Попов С.Б., Белорусцева С.А., Митителло А.В. Оценка влияния искусственного рифа на пресноводное сообщество гидробионтов. *Труды ВНИРО*. 2015. Т. 155. С. 69–78.

13. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. Ленинград : Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 432 с.

14. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов : монография. Москва : ГЕОС, 2001. 272 с.

15. Минчева Г.Г., Гусяков Н.Е., Ковтун О.А. Особенности формирования морского микро- и макроперифитона на твердых субстратах различного типа. *Гидробиологический журнал*. 1998. Т. 34. № 3. С. 61–67.

16. Нарожная А.Г., Буряк Ж.А. Морфометрический анализ цифровых моделей рельефа Белгородской области разной степени генерализации. *Научные ведомости БЕЛГУ. Серия Естественные науки*. 2016. Вып. 37. № 25 (246). С. 169–178.

17. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). (Чинный з 01.01.84 р.). Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 40 с.

18. Тучковенко Ю.С., Сахненко О.И. Комплексное моделирование динамики вод в прибрежной зоне моря при различных ветро-волновых условиях. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2008. № 3. С. 202–212.

19. Чекотун А.А., Цыкало А.Л. Создание искусственного рифа и наблюдения за ним в 2002–2003 гг. Биологический и технико-экономический анализ различных конструкций искусственных рифов. URL: [www.artificialreefs.ru/articles/pokryshki\\_rif\\_ua.html](http://www.artificialreefs.ru/articles/pokryshki_rif_ua.html) (дата звернення: 22.05.2021).

20. Шахин В.М. Искусственные проницаемые рифы – новый тип берегозащитных сооружений. *Строительство и техногенная безопасность*. 2019. № 17(69). С. 211–214.

21. De Rijcke Maarten. Artificial reefs. URL: [http://www.coastalwiki.org/wiki/Artificial\\_reefs](http://www.coastalwiki.org/wiki/Artificial_reefs) (дата звернення: 03.11.2021)

22. Fabi G., Scarcella G., Spagnolo A., Bortone S., Charbonnel E., Goutayer J., Gachon C. Practical Guidelines for the Use of Artificial Reefs in the Mediterranean and the Black Sea. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015. 84 p.

23. Kim H.-D., Kim K.-H., Shim K.-T., Oh H. Applicability Study of a Sunken Vessel as an Artificial Reef in a High Wave Energy Zone. *Energies*. 2021. 14(14). 4374. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en14144374>.

24. What is an artificial reef? National Ocean Service : *website*. URL: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/artificial-reef.html> (дата звернення: 15.05.2021).

25. Sato O. Scientific rationales for fishing reef design. *Bull. Mar. Sci.* 1985. 37. P. 329–335.

26. Seaman W. Artificial Reefs. *Encyclopedia of Ocean Sciences* / Eds. J. Kirk Cochran, J.H. Bokuniewicz, P.L. Yager. Elsevier, 2019. Pp. 662–670.

27. SWAN (Version 41.10, June 2016). Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. URL: <http://www.swan.tudelft.nl>.

## References

1. Aleksandrov, B.G. (2008). *Gidrobiologicheskie osnovy upravleniya sostojaniem pribrezhnyh jekosistem Chernogo morja* [Hydrobiological

basics of management the state of the coastal ecosystems of the Black Sea]. Kiev: Naukova dumka [in Russian].

2. Alekseev, R.P., Zajcev, Ju.P., Sinegub, I.A. (1987). Formirovanie zoocenoz razlichnyh iskusstvennyh rifov v severo-zapadnoj chasti Chernogo morja [Formation of zoocenosis of various artificial reefs in the North-Western part of the Black Sea]. *Artificial reefs for the national economy: All-Union Conference*, Moscow, pp. 57–59 [in Russian].
3. Vinogradov, A.K., Bogatova, Yu.I. & Sinegub, I.A. (2012). *Ekosistemy akvatorii morskikh portov Chernomorsko-Azovskogo bassejna: Vvedenie v ekologiyu morskikh portov* [Ecosystems water areas sea ports Black Sea Azov pool: Introduction in ecology sea ports]. Odessa: Astroprint [in Russian].
4. Vitjuk, A.V., Gubanov, V.V., Zajcev, Ju.P. (1987). Modul'naja ustanovka "Rif" dlja promyshlennogo vyrashhivaniya midij i melioracii morskoy sredy [Modular plant "Rif" for industrial cultivation of mussels and reclamation of the marine environment]. *Artificial reefs for fisheries: All-Union. conf.*, Moscow, pp. 76–78 [in Russian].
5. Vorob'eva, L.V., Kulakova, I.I., Bondarenko, A.S., Portjanko, V.V. (2019). *Kontaktnye zony Chernogo morja: mejofauna litokontura severozapadnogo shel'fa: monografija* [Contact zones of the Black Sea: meiofauna of the lithocontour of the North-Western shelf: monograph]. Odessa: "Feniks" [in Russian].
6. Goncharov, A.D. (1981). Sposob povysheniya produktivnosti pribrezhnyh biocenozov morja i primorskikh vodoemov [A method for increasing the productivity of coastal biocenoses of the sea and coastal water bodies]. *Fish industry*, 7, pp. 42–44 [in Russian].
7. Zajcev, Ju.P., Jacenko, V.A. (1983). Jekologicheskie aspekty gidrotehnicheskogo stroitel'stva v pribrezhnoj zone morja [Environmental aspects of hydrotechnical construction in the coastal zone of the Sea]. *Marine Biology, Vladivostok*, 5, pp. 62–66 [in Russian].
8. Zajcev, Ju.P. (1987). Iskusstvennye rify – instrument upravlenija jekologicheskimi processami v pribrezhnoj zone morja [Artificial reefs are a tool for managing ecological processes in the coastal zone of the Sea]. *Artificial reefs for fisheries, All-Union. conf.*, Moscow, pp. 3–5 [in Russian].
9. *Gidrometeorologicheskie uslovija morej Ukrainy*. (2012). Tom 2: Chernoe more [Hydrometeorological conditions of the Ukrainian seas. Vol. 2. The Black Sea]. Sevastopol': NPC "JeKOSI-Gidrofizika".
10. *Iskusstvennye rify dlja rybnogo hozjajstva*. (1990). [Artificial reefs for fisheries]. VNIRO, Coll. of sci. papers, Moscow [in Russian].
11. Kryuchkov, V.G. Turkulova, V.N., Buryak N.M. (2017). Jekologicheskie i jekonomicheskie predposylki sozdaniya morskogo kompleksnogo sooruzhenija dlja vyrashhivaniya v polikul'ture dvustvorchatyh molljuskov i ryb. [Ecological and economic prerequisites of the marine complex construction for bivalve molluscs and fish culture in polyculture]. *Trudy YugNIRO*, 54, pp. 167–169 [in Russian].
12. Kuznecov, V.V., Kuznecova, E.N., Goncharov, S.M., Popov, S.B., Belorusceva, S.A., Mitiello A.V. (2015). Ocenka vlijaniya iskusstvennogo rifa na presnovodnoe soobshhestvo gidrobiontov [Assessment of the impact of an artificial reef on the freshwater community of aquatic organisms]. *Trudy VNIRO*, 155, pp. 69–78 [in Russian].
13. Lappo, D.D., Strekalov, S.S., Zavyalov, V.K. (1990). *Nagruzki i vozdeystviya vetrovyih voln na gidrotehnicheskie sooruzheniya*. [Load and the influence of wind waves on the waterworks]. Saint-Petersburg: VNIIG im. B.E. Vedeneeva [in Russian].
14. Leont'ev, I.O. (2001). *Pribrezhnaja dinamika: volny, techenija, potoki nanosov* [Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows]. Moscow: GEOS (Publ.) [in Russian].
15. Mincheva, G.G., Gusliakov, N.E., Kovtun, O.A. (1998). Osobennosti formirovaniia morskogo mikro- i makroperifitona na tverdykh substratakh razlichnogo tipa. [Features of the formation of marine micro- and macrophytoperiphyton on solid substrates of various types]. *Hydrobiological Journal*. 34(3). Pp. 61–67 [in Russian].
16. Narozhnaia, A.H., Buriak, Zh.A. (2016). Morfometrycheskiy analiz tsifrovyykh modeley reliefa Belhorodskoy oblasti raznoy stepeni generalizatsii [Morphometric analysis of digital elevation models of the Belgorod region of varying degrees of generalization], *Scientific reports BELSU, Series Natural Sciences*, 25 (246), Iss. 37, pp. 169–178 [in Russian].
17. SNiP 2.06.04-82. (1995). *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov)* [The loads and action to hydraulic engineering (wave, ice and from courts)]. Moscow: CITP, Gosstroy (USSR) [in Russian].
18. Tuchkovenko, Y.S., Sakhnenko, O.I. (2008). Kompleksnoe modelirovanie dinamiki vod v pribrezhnoj zone morja pri razlichnyh vetro-volnovykh uslovijah [The modeling of the water dynamic on the beach zone under the different wave-wind conditions]. *Ukrainian hydrometeorological Journal*, 3, pp. 202–212 [in Russian].
19. Chekotun, A.A., Cykalo, A.L. Sozdanie iskusstvennogo rifa i nabljudeniya za nim v 2002–2003 gg. Biologojekologicheskij i tehniko-jekonomicheskij analiz razlichnyh konstrukcij iskusstvennyh rifov. [Creation of an artificial reef and observation of it in 2002–2003. Biological and ecological and technical and economic analysis of various structures of artificial reefs]. Retrieved from: [www.artificialreefs.ru/articles/pokryshki\\_rif\\_ua.html](http://www.artificialreefs.ru/articles/pokryshki_rif_ua.html) (Last accessed: 22.05.2021) [in Russian].
20. Shakhin, V.M. (2019). Iskusstvennye pronicaemye rify – novyj tip beregozashhitnyh sooruzhenij [Artificial permeable reef – a new type of waterproof structures]. *Construction and industrial safety*, 17(69), pp. 211–214 [in Russian].
21. De Rijcke Maarten. Artificial reefs. Retrieved from: [http://www.coastalwiki.org/wiki/Artificial\\_reefs](http://www.coastalwiki.org/wiki/Artificial_reefs) (Last accessed: 03.11.2021).

22. Fabi, G., Scarcella, G., Spagnolo, A., Bortone, S., Charbonnel, E., Goutayer, J. Gachon, C. (2015). Practical Guidelines for the Use of Artificial Reefs in the Mediterranean and the Black Sea. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 84 p.
23. What is an artificial reef? National Ocean Service website. Retrieved from: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/artificial-reef.html> (Last accessed: 15.05.2021).
24. Kim, H.-D., Kim, K.-H., Shim, K.-T., & Oh, H. (2021). Applicability Study of a Sunken Vessel as an Artificial Reef in a High Wave Energy Zone. *Energies*, 14(14), 4374. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.3390/en14144374>.
25. Sato, O. (1985). Scientific rationales for fishing reef design. *Bull. Mar. Sci.*, 37, pp. 329–335.
26. Seaman, W. (2019). Artificial Reefs. *Encyclopedia of Ocean Sciences.* / J.K. Cochran, J.H. Bokuniewicz, P.L. Yager (Eds.), Elsevier, pp. 662–670.
27. SWAN (Version 41.10, June 2016). Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. Retrieved from: <http://www.swan.tudelft.nl>.

## MODELING THE INTERACTION OF ARTIFICIAL REEFS WITH A WAVE FIELD (CASE STUDY: ODESSA COAST)

**Murkalov O.B.**, PhD

Odessa I.I. Mechnikov National University  
ugeocoast@gmail.com

**Ryzhko V.Ye.**, senior biologist LHRPA  
SE “CHORNOMORNDIPROEKT”

**Kalinichenko W.I.**, Head of the Laboratory LHRPA  
SE “CHORNOMORNDIPROEKT”

One of the prospective areas of today's marine and oceanic resource management is creation of artificial reefs. Artificial reefs do not represent a universal solution to environmental problems of water areas; their creation serves as a comprehensive flexible approach to restoration of aquatic ecosystems. Natural conditions and species composition of aquatic organisms in the North-Western part of the Black Sea significantly differ from conditions in the World Ocean area, where artificial reefs are traditionally built and used.

This article presents generalized results of experiments featuring creation of artificial reefs in natural regional conditions of the Odessa coast in the 20<sup>th</sup> century. The international experience in creating artificial reefs with preset properties was analyzed, and peculiarities of applying mathematical modeling of wave processes when designing artificial reefs were reviewed.

One of the prospective areas is to create combined-purpose artificial reefs on the Odesa coast: an alternative option of reconstructing and repairing hydraulic engineering structures; coast protection structures suitable for population with aquatic organisms and capable of producing alluviums and debris for nourishment of the coastal area.

The interaction of three artificial reef variants with a wind wave field was studied. The modeling was done using a third-generation SWAN wave model, version 41.10. The model's input parameters included: design parameters of waves in hazardous wave directions 4% occurrence in regime, a digital model of the submarine relief, the depth of location and geometric parameters of artificial reefs.

The modeling has revealed that the analyzed artificial reef variants perform the wave protection function. Depending on the ratio between the depth and geometric location, wave protection functions could be performed not only by individual structures but by their entirety: a reef complex.

A decrease in the wave height by 0.1–0.2 m was observed in the place where the structures are located. Benthic orbital wave speed is the highest on the wave crest, and low at the distance of 0.25 of the length of an oncoming storm wave from the structure. With these figures, the material of crests with the fineness of 10–20 mm and the bottom of artificial reefs with the fineness of 4–10 mm will not be eroded.

**Key words:** modeling, wave field, Odessa coast, artificial reef, SWAN.