

В.В.Фомин<sup>1,2</sup>, Н.Н.Дьяков<sup>2</sup>, А.А.Полозок<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

<sup>2</sup>Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н.Зубова, г.Севастополь

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЫВА И ЗАТОПЛЕНИЯ АРАБАТСКОЙ СТРЕЛКИ В ПЕРИОД ИНТЕНСИВНЫХ ШТОРМОВ В АЗОВСКОМ МОРЕ

На основе морфодинамической модели *XBeach* выполнено исследование процессов размыва и затопления северо-восточного побережья Крымского п-ова – Арабатской стрелки (косы) под воздействием ветрового волнения и штормовых нагонов Азовского моря. С использованием данных реанализа и натурных наблюдений получены необходимые для моделирования оценки значений параметров ветрового волнения и штормовых нагонов в районе косы для штормов, возможных 1 раз в год и 1 раз в 5, 10, 25 и 50 лет. Расчеты выполнены в рамках одномерной задачи для характерного поперечного профиля косы, включающего пляж, карьер и основное тело косы. Показано, что для штормов, возможных 1 раз в год, размывается около половины пляжа, и деформации не достигают карьера. Для штормов, возможных 1 раз в 25 и 50 лет, размыву подвержен весь пляж и склон карьера, прилегающий к основному телу косы. Выявлено, что именно сочетание сильных штормовых нагонов и интенсивных ветровых волн является основным условием для возникновения размыва и затопления косы. Без учета штормовых нагонов модель не воспроизводит размывов и затопления косы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морфодинамика, ветровое волнение, штормовой нагон, математическое моделирование, *XBeach*, Арабатская стрелка, Азовское море

doi: 10.22449/2413-5577-2019-4-40-50

**Введение.** Береговая зона северной части Крымского п-ова характеризуется наличием песчаных образований. Под воздействием интенсивных штормов эти образования могут менять свою форму и положение. С фундаментальной и прикладной точек зрения представляют интерес исследования морфодинамических процессов на северо-восточном побережье полуострова в районе косы Арабатская стрелка (рис.1).

Арабатская стрелка (далее – коса, стрелка) подвержена периодическим затоплениям и размывам, которые сопровождаются проникновением вод Азовского моря в залив Сиваш. Причем затопление косы происходит почти ежегодно. Наиболее известный пример – экстремальный шторм 7 – 11 марта 1970 г., который привел к затоплению косы и образованию промоин в ее северной и южной частях. Промоины возникли в наиболее узких участках косы, имеющих ширину 270 – 300 м. Размывам способствовало наличие песчаных карьеров шириной 20 – 100 м и глубиной 2,5 – 5 м.

Цель данной работы – на основе математического моделирования выполнить исследование механизмов размыва и затопления Арабатской стрел-

© В.В.Фомин, Н.Н.Дьяков, А.А.Полозок, 2019

*Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.4. С.40-50.*



Р и с . 1 . Карта-схема западного побережья Азовского моря: 1 – положение разреза, для которого проводились расчеты; 2 – точка, в которой рассчитывался волновой климат.

ки, вызванных воздействием ветрового волнения и штормовых нагонов. Для данного района такая задача решается впервые.

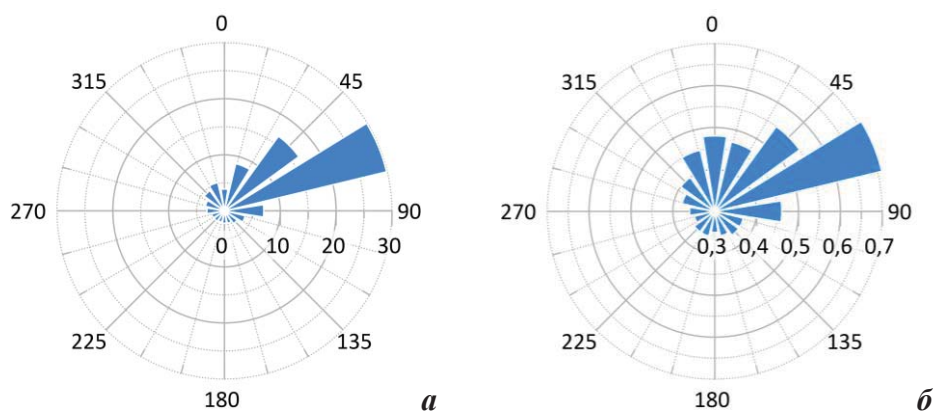
**Геоморфология и гидрометеорологические условия района исследований.** Арабатской стрелка – типичный бар больших размеров протяженностью 110 км и шириной 0,25 – 5 км. Морфология стрелки достаточно однообразна. Она имеет пляжи шириной 20 – 60 м в виде мощного берегового вала высотой над урезом 2,5 м в северной части и 3 м в южной части. Уклоны пляжей

составляют 0,09 – 0,15 в северной части стрелки, 0,03 – 0,07 – на южном участке. Уклоны верхней части берегового склона стрелки до глубины 2 м изменяются от 0,01 – 0,1. На глубинах 2 – 2,5 м параллельно берегу расположен подводный вал. Средние уклоны дна до изобаты 5 м составляют 0,003 – 0,006.

Согласно [1], береговая форма стрелки, пляж, береговой вал и подводный склон до глубин 2 – 2,5 м сложены преимущественно ракушкой и детритом со средним диаметром частиц 0,5 мм. На глубинах от 2,5 до 5 м наблюдается алевритовый песок с примесью ракушки со средним диаметром частиц 0,105 – 0,5 мм. На глубинах 7 – 8 м расположены алевриты со средним диаметром частиц 0,034 мм. На глубинах больше 8 м донные осадки представлены алевритовыми илами со средним диаметром фракций 0,006 мм.

Одним из наиболее важных факторов, определяющим морфодинамику Арабатской стрелки, является ветровое волнение Азовского моря. Для оценки статистических характеристик волнения в исследуемом районе привлекались результаты ретроспективных расчетов ветрового волнения [2, 3] по модели SWAN [4, 5]. На входе в волновую модель задавались поля приземного ветра *ERA Interim* за 1979 – 2017 гг. В результате моделирования был получен массив параметров ветровых волн для всего Азово-Черноморского бассейна длиной 39 лет с дискретностью по времени 1 ч (далее – массив *SWAN-ERA1*). Из этого массива была выбрана точка в акватории Азовского моря вблизи Арабатской стрелки (точка помечена цифрой «2» на рис.1) и сформированы временные ряды, включающие высоту значительных волн  $h_s$ , среднее направление волнения  $\theta$ , средний  $\bar{\tau}$  и пиковый  $\tau_p$  периоды волн за безледный период (из массива *SWAN-ERA1* извлекались данные только с апреля по ноябрь каждого года).

Повторяемость среднего направления волнения в районе Арабатской стрелки по данным *SWAN-ERA1* показана на рис.2, а. Как видно, наибольшую повторяемость имеют волны двух направлений – восток – северо-восток (30 %) и северо-восток (16 %). Этим двум направлениям соответствуют и наибольшие средние многолетние значения  $h_s$  (рис.2, б).



Р и с . 2 . Повторяемость (%) среднего направления волнения  $\theta$  (а) и распределение по направлениям средних многолетних значений  $h_s$  (м) (б) у Арабатской стрелки за безледный период по данным реанализа SWAN-ERA1.

Для оценки экстремальных характеристик ветрового волнения в районе Арабатской стрелки применялся метод годовых максимумов, базирующийся на распределении Гумбеля [6]. Для выбранной точки из массива SWAN-ERA1 выделены ряды годовых максимумов средних высот  $\bar{h}$  и средних периодов  $\bar{\tau}$ . Затем методом наименьших квадратов определены соответствующие параметры распределения Гумбеля. На основе этих распределений вычислены средние высоты  $\bar{h}$  и средние периоды  $\bar{\tau}$  волн, возможные 1 раз в  $n$  лет. Далее с помощью распределения Глуховского [7] получены значения  $h_s$  и  $\tau_p$ , возможные 1 раз в  $n$  лет. Результаты расчетов приведены в таблице.

Другим важным фактором, влияющим на изменение профиля Арабатской стрелки, являются штормовые нагоны.

В западной части Азовского моря при сильных ветрах восточных румбов штормовые нагоны могут быть очень значительными. Согласно данным наблюдений [8], максимальные подъемы уровня моря на станции Геничеськ могут превышать 2 м. В самой правой колонке таблицы даны значения нагонов  $\eta_s$ , возможные 1 раз в  $n$  лет. Эти значения получены методом Лангбейна [8] по ряду 4-х срочных наблюдений уровня моря на станции Геничеськ продолжительностью 42 года.

**Численная морфодинамическая модель XBeach.** Из вышеизложенного следует, что в исследуемом районе наибольшую повторяемость имеют ветровые волны, подходящие по нормали к береговой линии косы. При этом сама береговая линия косы со стороны Азовского моря медленно меняется в продольном направлении. В первом приближении это дает воз-

Т а б л и ц а . Значения параметров ветрового волнения и штормовых нагонов у Арабатской стрелки, возможные 1 раз в  $n$  лет ( $T$  – период повторяемости).

№	$T$ , год	$\bar{h}$ , м	$h_s$ , м	$\tau_p$ , с	$\eta_s$ , м
1	1	1,2	1,9	6,7	0,86
2	5	1,3	2,1	7,3	1,26
3	10	1,4	2,2	7,6	1,37
4	25	1,4	2,2	7,9	1,51
5	50	1,5	2,4	8,5	1,62

возможность моделировать морфодинамические процессы в рамках одномерной начально-краевой задачи для некоторого характерного поперечного профиля косы. Для решения указанной задачи применяется одномерный вариант численной модели *XBeach* [9, 10]. Ранее эта модель уже использовалась для исследования морфодинамических процессов в береговой зоне Крыма [11 – 14]. Ниже приводится краткое описание модели.

Ветровые волны в модели описываются нестационарным уравнением баланса волновой энергии вида

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(c_x A)}{\partial x} = -\frac{D_w}{\sigma}, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $x$  – горизонтальная координата;  $\theta$  – направление распространения волн;  $A = E_w/\sigma$  – плотность волнового действия;  $E_w$  – энергия волн;  $\sigma$  – частота волн;  $D_w$  – скорость диссипации энергии вследствие обрушения волн;  $c_x$  – групповая скорость.

После обрушения ветровые волны передают энергию  $D_w$  бурунам (роллерам), баланс энергии  $E_r$  которых определяется уравнением

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial(c_x E_r)}{\partial x} = D_w - D_r, \quad (2)$$

где  $D_r$  – скорость диссипации энергии роллеров.

Возвышение уровня моря  $\eta$  и скорость течения  $u$  в модели определяются из системы уравнений мелкой воды:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \mu_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{F - \tau_b}{\rho h}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\mu_u$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $\rho$  – плотность воды;  $h = z_b + \eta$  – динамическая глубина;  $z_b$  – рельеф дна и суши;  $\tau_b$  – придонное касательное напряжение трения, квадратично зависящее от скорости течений;  $F = -\partial(S_{xx} + R_{xx})/\partial x$  – индуцированный ветровыми волнами импульс, где  $S_{xx}$ ,  $R_{xx}$  – напряжения, обусловленные наличием ветровых волн и роллеров.

Поток наносов задается выражением

$$Q = hCu - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (4)$$

где  $C$  – осредненная по глубине концентрация наносов;  $\mu_c$  – коэффициент турбулентной диффузии. Изменения  $C$  описываются уравнением переноса и диффузии

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = h \frac{C_{eq} - C}{T_s}, \quad (5)$$

где  $C_{eq}$ ,  $T_s$  – равновесная концентрация и время адаптации концентрации к равновесному состоянию.

Изменения рельефа дна и суши  $z_b$  описываются уравнением

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

где  $p = 0,4$  – пористость грунта.

Коэффициенты  $\mu_u$  и  $\mu_c$  имеют вид:  $\mu_v = A_v(\mu_s + B_v h(D_r/\rho)^{1/3})$ , где  $\mu_s$  – коэффициент горизонтальной вязкости, вычисленный по формуле Смагоринского [15];  $A_v, B_v$  – настроечные константы.

**Численные эксперименты и анализ их результатов.** Численные эксперименты проводились для поперечного профиля Арабатской стрелки, полученного в районе урочища Валок (цифра «1» на рис.1). Модельный профиль общей длиной  $L = 1200$  м включал следующие участки (рис.3): морскую часть с подводным баром ( $x \leq 600$  м); пляж ( $600 \text{ м} < x \leq 640$  м); карьер ( $640 \text{ м} < x \leq 700$  м); основное тело косы ( $700 \text{ м} < x \leq 1060$  м); часть акватории залива Сиваш ( $x > 1060$  м). Нижняя граница карьера располагается на 1 м ниже уровня моря. Средний диаметр частиц грунта дна и суши  $d_{50} = 0,5$  мм. Шаг расчетной сетки равен 2 м.

При  $x = 0$  характеристики ветрового волнения определялись на основе частотного спектра JONSWAP:

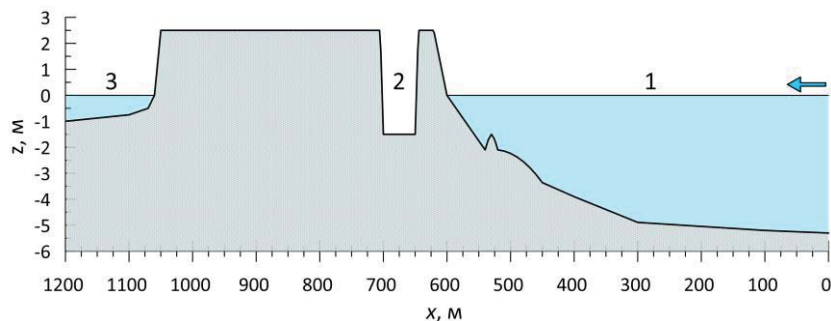
$$E(\sigma) = 0,307\alpha_F \frac{h_s}{\sigma_p} \frac{\exp(-1,23a^{-4})}{a^5} s^\beta, \quad (7)$$

где  $\alpha_F = 0,0131$ ;  $a = \sigma/\sigma_p$ ;  $\beta = \exp\left(-\frac{(a-1)^2}{2b}\right)$ ;  $b = \begin{cases} 0,07 & \text{при } a \leq 1 \\ 0,09 & \text{при } a > 1 \end{cases}$ ;  $\sigma_p$  – частота волн, соответствующая пику спектра ( $\tau_p = 2\pi/\sigma_p$  – период пика спектра);

$s = 10$  – параметр, характеризующий узкополосность спектра.

Для учета штормовых нагонов на правой границе области ( $x = 0$ ) задавался уровень моря  $\eta_0$ . Для простоты моделирования во всех численных экспериментах на левой границе области ( $x = L$ ) использовалось условие твердой стенки:  $u = 0$ .

Было выполнено пять численных экспериментов по моделированию процессов размыва и затопления выбранной области для штормов разной повторяемости  $T$ . Расчеты проводились по следующему сценарию. В начальный момент времени  $t = 0$  движения и смещения свободной поверхности в расчетной области отсутствуют. Интервал  $0 < t \leq 9$  ч соответствовал фазе развития шторма, в которой параметры  $h_s$ ,  $\tau_p$  и  $\eta_0$  линейно увеличивались до



Р и с . 3 . Геометрия расчетной области и уровень моря при  $t = 0$ : 1 – Азовское море; 2 – песчаный карьер; 3 – залив Сиваш; стрелка – направление распространения волн.

своих предельных значений, указанных в таблице, и далее оставались неизменными. Общее время интегрирования составляло 72 ч.

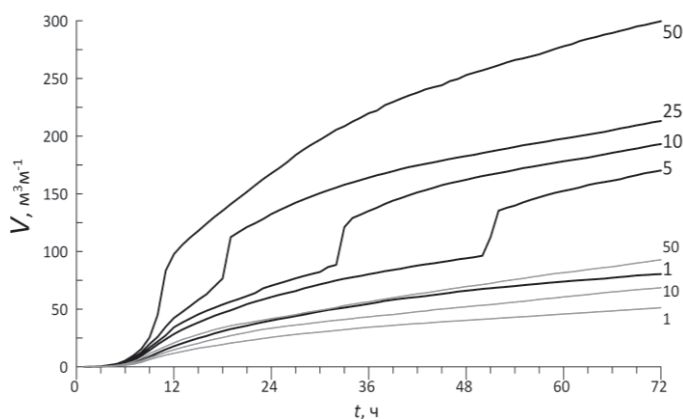
В качестве интегрального показателя изменений профиля косы под воздействием шторма использовался объем деформаций  $V$ , определяемый выражением [16]:

$$V(t) = \int_0^L |z_b(x,t) - z_b(x,0)| dx. \quad (8)$$

Изменения во времени величины  $V$  для штормов разной повторяемости показаны на рис.4. Как видно, со временем объем деформаций  $V$  увеличивается, а его изменения уменьшаются, что можно интерпретировать как приближение модельного профиля косы к некоторому квазиравновесному состоянию [17]. Для  $T = 1$  год кривая  $V$  плавно приближается к своему равновесному состоянию. Для других значений  $T$  имеются интервалы времени, в которые происходят резкие увеличения  $V$ . Очевидно, что эти интервалы соответствуют резким изменениям поперечного профиля косы, связанного с размывом ее передней части. Чем интенсивнее шторм, тем раньше проявляется скачок  $V$ . Так, для периодов повторяемости шторма 5, 10, 25 и 50 лет скачок  $V$  происходит в окрестности  $t$ , равного 52, 33, 19 и 11 ч соответственно. При  $T = 50$  лет скачкообразных изменений объема деформации не прослеживается, поскольку размыв пляжа и затопления карьера происходит уже начальном этапе шторма.

Также проведено три численных эксперимента для  $T$ , равного 1, 10 и 50 лет, в которых не учитывалось влияние штормового нагона ( $\eta_0 = 0$  при  $x = 0$ ). Анализ результатов моделирования показал (рис.4, *серые кривые*), что в этом случае объем деформаций профиля косы в 2 – 3 раза меньше по сравнению с предыдущими экспериментами. При этом сами кривые  $V$  не имеют скачков. Таким образом, без учета штормовых нагонов результаты моделирования становятся менее адекватными, поскольку используемая модель перестает воспроизводить размыв косы.

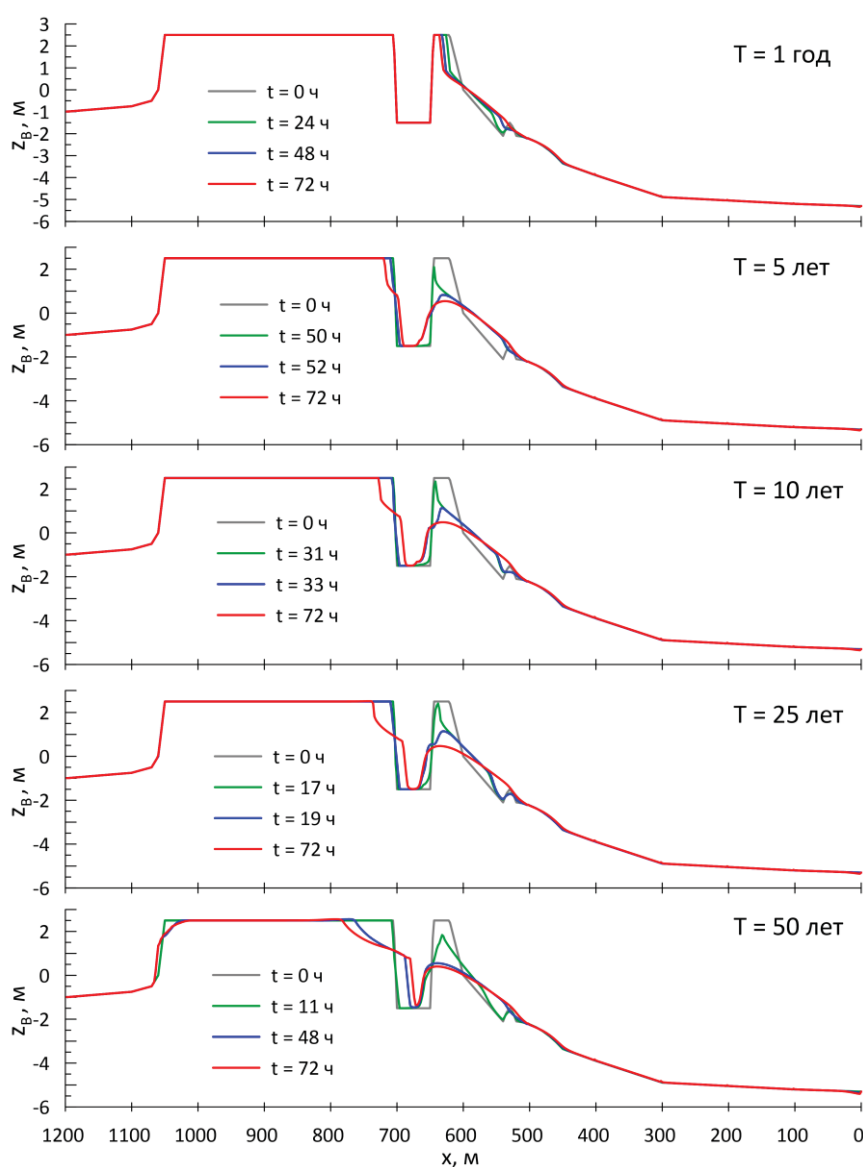
В свою очередь, это указывает на важность учета штормового нагона при моделировании размывов песчаных берегов в таком мелководном бассейне, как Азовское море, где штормовые нагоны очень значительные. Физический смысл полученного результата очевиден – штормовой нагон



Р и с . 4 . Изменения во времени объема деформаций  $V$  профиля косы для штормов различной повторяемости  $T$ . Цифрами указаны значения  $T$ . Серые кривые — изменения объема деформаций  $V$  без учета штормового нагона.

создает условия для интенсификации ветрового волнения у косы вследствие общего подъема уровня моря [18]. Именно сочетание сильных штормовых нагонов и возникающих на их фоне интенсивных ветровых волн является основным условием для возникновения размывов и затопления косы.

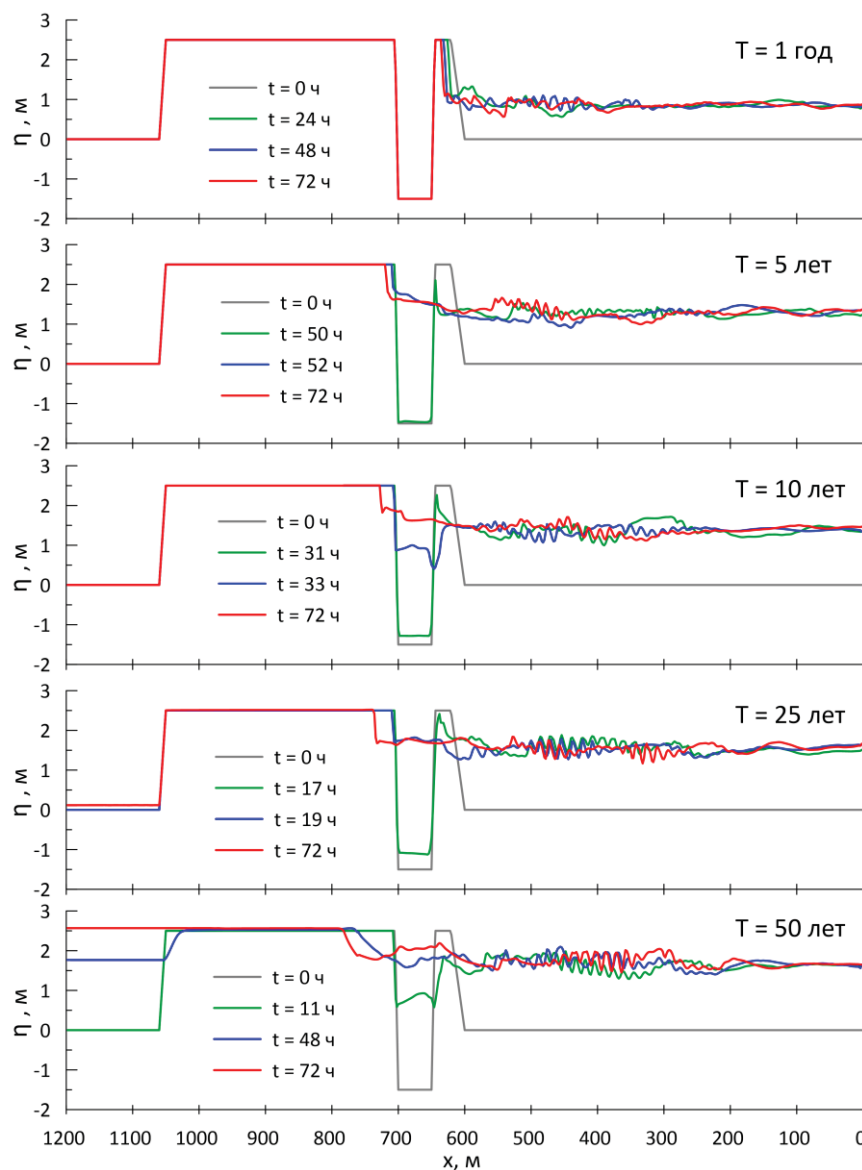
Рассмотрим основные особенности эволюции профиля косы в разных штормовых условиях. На рис.5 показаны деформации профиля косы в характерные моменты времени для штормов различной повторяемости. Как видно, с увеличением периода повторяемости шторма интенсивность деформаций профиля возрастает. В случае  $T = 1$  год размывается около половины пляжа, и деформации не достигают карьера. При  $T \geq 25$  лет размыву



Р и с . 5 . Деформации профиля косы в характерные моменты времени для штормов различной повторяемости  $T$ .

подвергается весь пляж, и ветровое волнение начинает воздействовать на левый склон карьера, размывая основное тело косы. При самом интенсивном шторме ( $T = 50$  лет) деформации возникают уже и на левом склоне основного тела косы.

На рис.6 приведено положение уровня моря и суши вдоль профиля косы для штормов различной повторяемости в те же моменты времени, что и на рис.5. Каждая кривая представляет собой уровень воды и суши в фиксированный момент времени (там, где вода, он совпадает с уровнем воды, а там, где сухо, – с уровнем суши). Серая кривая соответствует моменту времени  $t = 0$ .



Р и с . 6 . Положение уровня моря и суши вдоль профиля косы в характерные моменты времени для штормов различной повторяемости  $T$ .



Поскольку при  $T = 1$  год размывается только половина пляжа, то вода из Азовского моря не проникает в карьер. Для  $T \geq 5$  лет из-за размыва всего пляжа морская вода затапливает карьер. При  $T \geq 25$  лет уровень воды поднимается настолько, что вода перетекает через косу и вызывает подъем уровня за косой. При  $T = 50$  лет формируется очень сильный штормовой нагон и вода из Азовского моря перетекает через основное тело косы, вследствие чего уровень воды за косой начинает повышаться до уровня самой косы. Такой результат ожидаем – он обусловлен наличием стенки и ограничениями, связанными с одномерностью рассматриваемой задачи.

Для всех  $T$  прослеживаются характерные пульсации уровня моря над береговым склоном. Они обусловлены возникновением в районе подводного склона волновых напряжений  $F$ , входящих в первое уравнение системы (3). Именно под воздействием  $F$  и формируются волновые течения и пульсации уровня моря, показанные на рис.6. Без учета  $F$  пульсации уровня моря не возникают.

**Заключение.** На основе численной морфодинамической модели *XBeach* проведено исследование механизмов размыва и затопления Арабатской стрелки (косы) в период интенсивных штормов в Азовском море. Расчеты выполнены в рамках одномерной начально-краевой задачи для характерного поперечного профиля стрелки с выемкой, имитирующей песчаный карьер.

С использованием данных реанализа волнения и ряда многолетних натуральных наблюдений за уровнем моря получены необходимые для моделирования значения параметров ветрового волнения и штормовых нагонов в районе косы с периодом повторяемости  $T$ , равным 1, 5, 10, 25 и 50 лет.

Для каждого значения  $T$  определена продолжительность шторма, после которой начинается интенсивный размыв косы. В случае  $T = 1$  год размывается около половины пляжа, и деформации не достигают карьера. При  $T \geq 25$  лет размыву подвергается весь пляж, и ветровое волнение начинает воздействовать на левый склон карьера, размывая основное тело косы.

Показано, что сочетание сильных штормовых нагонов и интенсивных ветровых волн является основным условием для возникновения размывов и затопления косы. Без учета штормовых нагонов модель не воспроизводит размывов и затопления косы.

Следует отметить, что приведенные результаты получены в рамках одномерной задачи без специальной подстройки параметров модели *XBeach*. В дальнейшем предполагается переход к решению двухмерной задачи и анализ чувствительности модели к изменению ключевых параметров.

Исследование выполнено в Морском гидрофизическом институте РАН в рамках НИР № 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» при поддержке грантов РФФИ № 18-05-80035 и № 18-05-00333.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геология* Азовского моря.– Киев, 1974.– 246 с.
2. *Divinskii B., Fomin V., Kosyan R., Lazorenko D.* Maximum waves in the Black Sea // Proc. 14th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 Oct 2019).– Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation, 2019.– v.2.– P.799-810.

3. *Divinsky B.V., Fomin V.V., Kosyan R.D., Ratner Y.D.* Extreme wind waves in the Black Sea // *Oceanologia*.– 2019. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
4. *Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H.* A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // *J. Geophys. Res.*– 1999.– 104(C4).– P.7649-7666.
5. *SWAN Cycle III version 41.20. User Manual*.– Delft University of Technology, Netherlands, 2018.– 121 p.
6. *Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B.* Estimation of extreme wind wave heights // World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041.– 2000.
7. *Крылов Ю.М.* Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн.– Л.: Гидрометеиздат, 1966.– 255 с.
8. *Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря / Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт НАН Украины / Под ред. В.В.Фомина*.– Киев: Феникс, 2012.– 238 с.
9. *Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R., Lescinski J.* Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands // *Coastal Engineering*.– 2009.– 56.– P.1133-1152.
10. *Roelvink D., Reniers A., Van Dongeren A., van Thiel de Vries J., Lescinski J., McCall R.* Beach Model Description and Manual.– UNESCO-IHE Institute for Water Education Report, 2010.– 106 p.
11. *Фомин В.В., Алексеев Д.В., Харитонова Л.В.* Моделирование морфодинамики Бакальской косы // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.– 2013.– вып.27, т.1.– С.374-380.
12. *Гуров К.И., Фомин В.В., Лазоренко Д.И.* Моделирование перераспределения песчаных фракций по подводному береговому склону под воздействием ветрового волнения // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*.– 2016.– вып.3.– С.65-71.
13. *Gurov K.I., Udovik V.F., Fomin V.V.* Modeling of the coastal zone relief and granulometric composition changes of sediments in the region of the Bogailo Lake Bay-Bar (the Western Crimea) during storm // *Physical Oceanography*.– 2019.– 26(2).– P.170-180.
14. *Gurov K.I., Fomin V.V., Alekseev D.V., Ivancha E.V.* Sediments granulometric composition dynamics in Kalamitsky Gulf // *Proc. 14th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 Oct 2019)*.– Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation, 2019.– v.2.– P.597-606.
15. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // *Mon. Weather Rev.*– 1963.– v.91.– P.99-164.
16. *Larson M., Kraus N.C.* SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Tech. Rep. / CERC-89-9. US Army Eng. Waterw. Exp. Station. Coastal Eng. Res.Center, 1989.– 267 p.
17. *Леонтьев И.О.* О некоторых свойствах процесса формирования профиля песчаного берега // *Процессы в геосредах*.– 2015.– № 2.– С.75-82.
18. *Fomin V.V., Alekseev D.V., Lemeshko E.M., Lazorenko D.I.* Simulation and analysis of sea floods in the Don River Delta // *Russian Meteorology and Hydrology*.– 2018.– v.43, № 2.– P.95-102.

Материал поступил в редакцию 05.11.2019 г.  
После доработки 20.11.2019 г.

V.V.Fomin, N.N.Dyakov, A.A.Polozok

MATHEMATICAL MODELING OF EROSION AND FLOODING OF  
THE ARABAT SPIT DURING THE INTENSE STORM IN THE SEA OF AZOV

Using the XBeach morphodynamic model the erosion and flooding of the northeast coast of the Crimean Peninsula – the Arabat spit under the influence of wind waves and storm surges of the Sea of Azov was studied. Using reanalysis and field observations, for required simulation, parameters of wind wave and storm surges near the spit were estimated for storms possible once a year and once every 5, 10, 25 and 50 years. The calculations were carried out as part of the one-dimensional problem for the typical transverse profile of the spit, including the beach, quarry and the main spit body. It is shown that for storms possible 1 year about half of the beach erodes, and deformations do not reach the quarry. For storms possible 1 time in 25 and 50 years the entire beach and the quarry slope adjacent to the main spit body are subject to erosion. It was revealed that the combination of strong storm surges and intense wind waves is the main condition for the erosion and flooding of the spit. Excluding storm surges, the model does not reproduce erosion and flooding of the spit.

KEYWORDS: morphodynamics, wind waves, storm surge, mathematical modeling, XBeach, the Arabat spit, the Sea of Azov