

Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных отложений в прибрежной зоне Западного Крыма

К. И. Гуров*, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
*e-mail: gurovki@gmail.ru

Поступила 19.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Цель работы – изучение особенностей динамики гранулометрического состава фракций донных осадков береговой зоны на участке Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского под воздействием штормового волнения на основе численной морфодинамической модели *XBeach*. Выполнена серия численных экспериментов, в которых параметры волнения на мористой границе расчетной области изменялись во времени, имитируя прохождение над исследуемым районом циклонической атмосферной аномалии. Начальное распределение объемных концентраций донных осадков на различных участках профиля подводного берегового склона задавались на основе результатов натурных наблюдений. Продолжительность модельных расчетов составляла 24 ч. Получены количественные характеристики пространственного распределения различных фракций донных отложений, медианного диаметра осадков и величины деформаций дна. Показано, что основные морфодинамические изменения происходят на участке 0–120 м от уреза воды и ограничиваются изобатой 3.5 м. Максимальные изменения рельефа береговой зоны и верхнего участка подводного берегового склона возникают в фазы развития и затухания шторма. В эти же фазы происходит интенсивное перераспределение песчаного материала. Установлено, что при изменении во времени параметров ветрового волнения на мористой границе масштабы перераспределения песчаного материала и деформаций береговой зоны выше, чем в случае, когда на мористой границе расчетной области направление волнения не меняется со временем.

Ключевые слова: Каламитский залив, береговая зона, донные отложения, гранулометрический состав, модель *XBeach*.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования», а также при поддержке гранта РФФИ № 18-05-80035.

Для цитирования: Гуров К. И., Фомин В. В. Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных отложений в прибрежной зоне Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 30–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-30-46

© Гуров К. И., Фомин В. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Influence of Storm Conditions on Changes in the Granulometric Composition of Bottom Sediments in the Coastal Zone of the Western Crimea

K. I. Gurov*, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: gurovki@gmail.com*

Submitted 19.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The aim of this work is to study the dynamics of bottom sediments granulometric fractions in the Kalamitsky Gulf coastal zone near the Lake Sakscoe bay-bar under influence of storm surge based on the XBeach numerical morphodynamic model. A series of numerical experiments has been carried out, in which the parameters of waves at the seaward boundary of the computational domain changed in time, simulating the passage of a cyclonic atmospheric anomaly over the investigated region. The initial distribution of the sediment volume concentrations in different parts of the underwater coastal slope profile was set based on the results of field observations. The duration of model calculations was 24 h. The quantitative characteristics of the spatial distribution of various bottom sediments fractions, sediments median diameter and values of bottom deformations were obtained. It has been established that the main morphodynamic changes occurs in the area 0–120 m from the shoreline and are limited by the 3.5 m isobath. It was noted that the maximum changes in the relief of the coastal zone and the upper section of the underwater coastal slope occur during the development and attenuation phases of a storm. In the same time intervals an intensive redistribution of sandy material is observed. It has been established that, with a change in the parameters of wind waves in time at the seaward boundary, the scales of sand material redistribution and deformations of the coastal zone are higher than in the experiment when the direction of the waves does not change with time at the seaward boundary of the computational domain.

Keywords: Kalamitsky Gulf, coastal zone, bottom sediments, particle size distribution, XBeach model.

Acknowledgements: the work was carried out under state order on topic no. 0555-2021-0005 “Coastal investigations” and supported by RFBR research project no. 18-05-80035.

For citation: Gurov, K.I. and Fomin, V.V., 2021. Influence of Storm Conditions on Changes in the Granulometric Composition of Bottom Sediments in the Coastal Zone of the Western Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 30–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-30-46 (in Russian).

Введение

Прибрежные районы являются зонами интенсивной антропогенной нагрузки, а также интенсивных гидро- и геодинамических процессов. Это определяет высокую скорость изменений характеристик прибрежных экосистем. Морфология пляжа и прибрежной полосы, определяемая в первую очередь развитием склонов и песчаных отмелей, очень динамична и в значительной степени формируется волнами, течениями и региональными характеристиками отложений [1].

Размер частиц донных отложений и их пространственное распределение являются ключевыми параметрами при характеристике отложений и математическом моделировании морфодинамики песчаных пляжей. Обычно при моделировании динамики песчаного материала под воздействием штормового волнения используется средний размер частиц и не учитывается их пространственная или временная изменчивость [2]. Однако исследования, выполненные в работах [3–7], показывают, что даже небольшие вариации в размере зерен могут иметь существенное влияние на результаты моделирования изменений морфологии пляжа. Результаты исследований, представленные в работе [1], указывают на необходимость включения пространственных неоднородностей гранулометрического состава отложений в модели переноса наносов, что даст возможность связать особенности прибрежной морфодинамики и долгосрочных изменений береговой линии с особенностями геологического строения исследуемых районов. Согласно результатам работы [3], профили гранулометрического состава наносов береговой зоны связаны с диссипацией энергии обрушающихся волн, причем наблюдаемые максимальные размеры зерен и их сортировка соответствовали местоположению пиковой диссипации энергии. Для сбора информации с высоким временным и пространственным разрешением о размерном составе наносов, а также для уточнения пространственных неоднородностей в размерах зерен наносов береговой зоны в работе [4] была предложена мобильная портативная система цифровой визуализации (*DIS*). В работе [6] для верификации модельных расчетов использовались сведения о размерном составе в сочетании с данными батиметрических съемок. Показано, что пространственные изменения фракций происходят на внутривыбросных временных масштабах. В зоне обрушения волн преобладает перенос взвешенных наносов, более мелкозернистые наносы перераспределяются как в сторону берега, так и в мористую часть. Ключевым параметром в диспергировании осадка и поддержании профиля пляжа, по мнению авторов [6], является фазовый сдвиг между скоростями осаждения частиц и турбулентностью в толще вод. В работе [8] предложена классификация пляжей как систем с различным уровнем энергии (*high- or low-energy systems*). Установлено, что за способность пляжей восстанавливаться после штормов отвечает различный уровень энергетических условий, определяемый морфометрическими характеристиками пляжей, а также гранулометрическим составом наносов береговой зоны.

Актуальность исследования особенностей динамики гранулометрического состава донных отложений на участке побережья Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского обусловлена существенным увеличением темпов освоения рекреационного потенциала данного региона, что связано со строительством набережной и берегозащитных сооружений. Недостаточная изученность и неточности в оценках характеристик литодинамических процессов в указанном районе привели к разрушению объектов прибрежной инфраструктуры и нарушению целостности экосистемы пересыпи.

Цель данной работы – исследовать локальные особенности перераспределения различных фракций наносов в прибрежной и береговой зонах Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского под воздействием штормового волнения. Ранее подобные работы проводились авторами в отношении

участков береговой зоны Каламитского залива в районе пгт. Николаевка [9], северного сектора пересыпей оз. Сасык [10], оз. Богайлы [11], оз. Сакского [12].

Характеристика района исследований

Пересыпь оз. Сакского расположена в центральной части Каламитского залива (рис. 1). Длина пересыпи – около 3300 м, ширина – 500–700 м, мощность песков пересыпи – 24 м [13]. Пересыпь представляет собой часть единого аккумулятивного образования, которое тянется от м. Карантинного до оз. Кызыр-Яр [14]. Пересыпь сложена крупнозернистыми песками с примесью гравия и гальки [13–16]. Ширина пляжей составляет 15–40 м в северной, 20–35 м в центральной и 50–60 м в южной частях пересыпи. Изучаемый район отличается прямолинейной береговой линией и параллельными берегу изобатами.

Исследуемый район расположен в центральной части пересыпи оз. Сакского между санаториями «Северное сияние» и «Парус» и охватывает всю пляжную зону санатория «Полтава-Крым».

На исследуемом участке пересыпи оз. Сакское нет источников песчаного и гравийно-галечного материала. Поэтому вдольбереговое перемещение наносов играет ведущую роль в питании материалом данного участка береговой зоны. В работах [13, 17–20] указывается, что источником ее питания является вдольбереговой поток, направленный с юга.

Основываясь на описанных в работе [21] результатах разрушений, вызванных сильными штормами, можно заключить, что ветровое волнение – основной фактор, определяющий изменения береговой линии в данном районе. Согласно работам [21–23], для района пересыпи оз. Сакского наибольшая повторяемость штормового ветрового волнения отмечена для южного и юго-западного направлений, близких к нормали по отношению к береговой линии. Это позволяет использовать одномерные модели для математического моделирования морфодинамики.



Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка береговой зоны Каламитского залива

Fig. 1. Map of the studied area of the Kalamitsky Gulf coast

Математическая модель и входные данные

Особенности перераспределения различных фракций песка на участке прибрежной и береговой зон Каламитского залива исследовались с помощью комплексной численной модели *XBeach*¹⁾. Это модель с открытым исходным кодом, разработанная для моделирования гидродинамических и морфодинамических процессов и воздействий на песчаные берега с размером расчетной области в несколько километров и во временном масштабе отдельных штормов [24]. Ниже приводится краткое описание модели.

Ветровые волны в модели описываются нестационарным уравнением баланса волновой энергии вида

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(c_x A)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y A)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta A)}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma},$$

где t – время; x – горизонтальная координата; θ – направление распространения волн; $A = E_w/\sigma$ – плотность волнового действия; E_w – энергия волн; σ – частота волн; D_w – скорость диссипации энергии вследствие обрушения волн; c_x , c_y и c_θ – скорости переноса энергии в направлении осей x , y и θ .

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

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial(c_x E_r)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y E_r)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta E_r)}{\partial \theta} = D_w - D_r,$$

где D_r – скорость диссипации энергии роллеров.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) &= \frac{F_x - \tau_{bx}}{\rho h}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) &= \frac{F_y - \tau_{by}}{\rho h}, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} &= 0, \end{aligned}$$

где g – ускорение силы тяжести; μ_u – коэффициент турбулентной вязкости; ρ – плотность воды; $h = z_b + \eta$ – динамическая глубина; z_b – рельеф дна и суши; τ_b – придонное касательное напряжение трения, квадратично зависящее от скорости течений; F_x , F_y – напряжения, обусловленные наличием ветровых волн и роллеров.

¹⁾ XBeach Model Description and Manual. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft and Delft University of Technology, 2010. 106 p.

Эти величины имеют вид

$$F_x = -\frac{\partial(S_{xx} + R_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial y},$$

$$F_y = -\frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{yy} + R_{yy})}{\partial y},$$

Потоки наносов задаются выражением

$$Q_x = hCu - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial x}, \quad Q_y = hCv - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial y},$$

где C – осредненная по глубине концентрация наносов; μ_c – коэффициент турбулентной диффузии. Изменения C описываются уравнением переноса – диффузии

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

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

Изменения рельефа дна и суши z_b описываются уравнением

$$(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0,$$

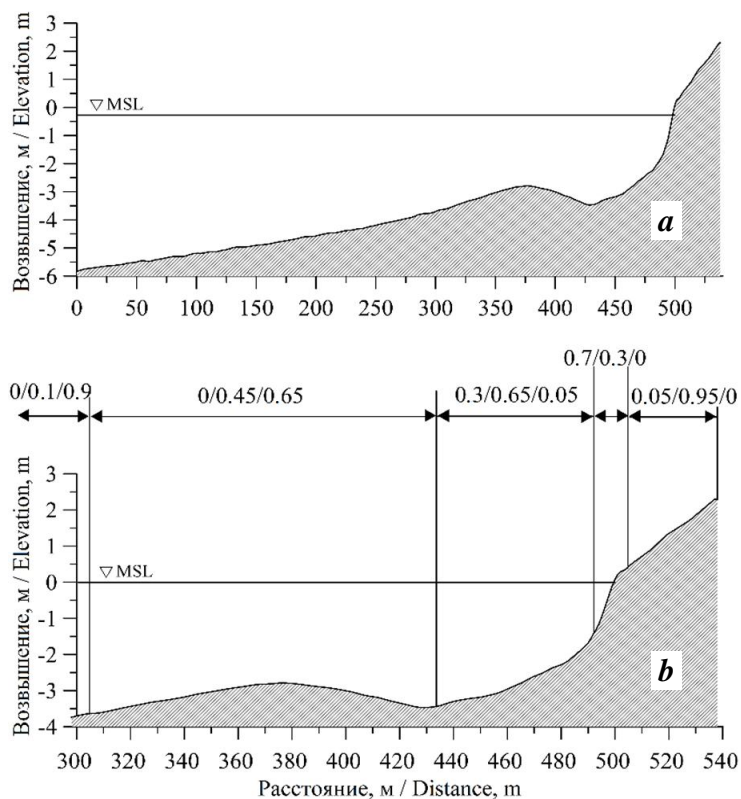
где $q_x = Q_x + f_s |u| \frac{\partial z_b}{\partial x}$; $q_y = Q_y + f_s |v| \frac{\partial z_b}{\partial y}$; $p = 0.4$ – пористость грунта.

Коэффициенты μ_u и μ_c имеют вид $\mu_v = A_v (\mu_s + B_v h (D_r / \rho)^{1/3})$, где μ_s – коэффициент горизонтальной вязкости, вычисленный по формуле Смагоринского [25]; A_v , B_v – настроечные константы.

При проведении модельных расчетов были использованы данные о рельефе и гранулометрическом составе наносов, полученные в ходе мониторинговых наблюдений в данном районе [16]. В качестве данных о рельефе дна был выбран профиль подводного берегового склона и пляжа, полученный в центральной части пляжевой зоны санатория «Полтава-Крым» на равной удаленности от берегозащитных сооружений (рис. 2, а). По поперечной координате x расчетная сетка имела 539 узлов (рис. 2), по продольной координате y – 4 узла. Шаг сетки по поперечной координате составил 1 м, шаг сетки по продольной координате – 100 м. Дискретность по угловой координате равнялась 10° .

На мористой границе расчетной области ($x = 0$) характеристики ветрового волнения определялись на основе частотного спектра *JONSWAP*¹⁾, куда в качестве параметров входят: пиковатость спектра $s = 10$; высота значительных волн h_s ; пиковый период волн τ_p .

При $x = 0$ параметры волнения в спектре *JONSWAP* изменялись во времени (рис. 3). При $t \leq 6$ ч (фаза развития шторма) значения h_s и τ_p линейно увеличивались до своих максимальных значений и далее оставались неизменными в течение 12 ч (фаза максимального штормового воздействия).



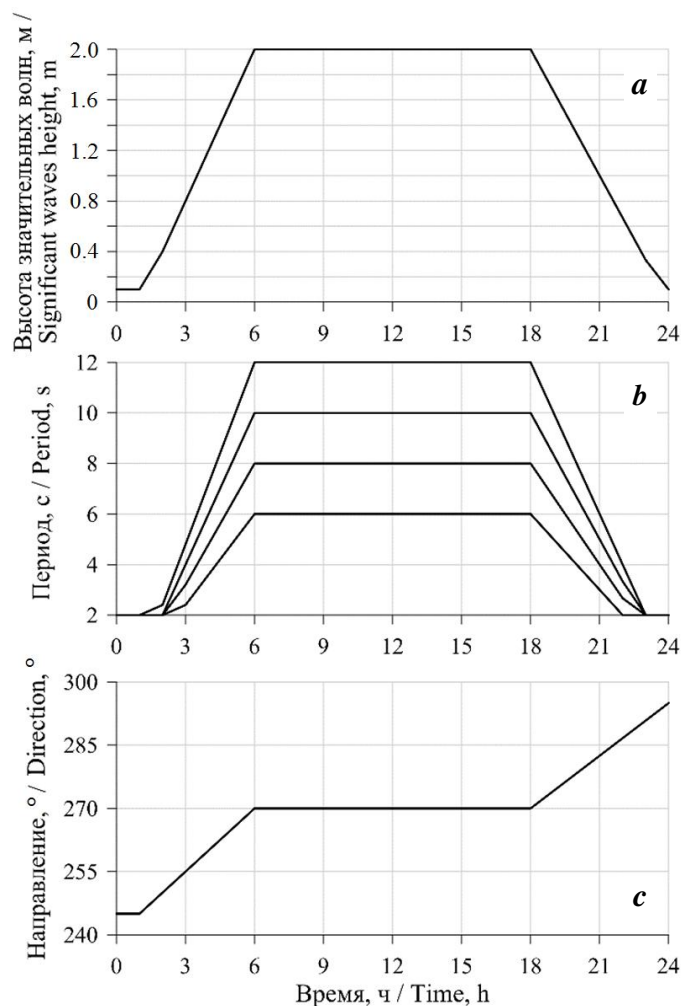
Р и с . 2 . Профиль прибрежной зоны (а) и соотношение объемных концентраций компонентов смеси на участках профиля (b) в начальный момент времени; MSL – уровень моря в начальный момент времени

Fig. 2. Coastal area profile (a) and volume concentrations ratio of the mixture components at the profile sections (b) at the start moment; MSL – measured sea level

Затем при $t > 18$ ч (фаза затухания шторма) значения h_s и τ_p линейно уменьшались. Для указанных фаз шторма менялось и направление волнения θ : при $0 \leq t \leq 6$ ч с юго-западного (245°) на западное (270°); при $6 \text{ ч} < t \leq 18$ ч оставалось неизменным; при $18 \text{ ч} < t \leq 24$ ч – с западного на северо-западное (295°). В первом приближении такое изменение h_s и τ_p на мористой границе имитирует штормовое волнение, вызванное перемещением над Черным морем с запада на восток крупномасштабной циклонической атмосферной аномалии.

Было выполнено четыре численных эксперимента, в которых максимум h_s равнялся 2 м (рис. 3, а), а максимальные значения пикового периода волн τ_p составляли 6, 8, 10 и 12 с (рис. 3, б).

В работе [16] выполнен анализ гранулометрического состава донных отложений в исследуемом районе. Полученные в [16] данные были использованы в настоящей работе для задания начальных условий в модели *XBeach*. Состав донных наносов задавался в виде смеси из трех компонентов (мелкий гравий и крупнозернистый песок, среднезернистый песок, мелкозернистый песок).



Р и с . 3. Изменения высоты значительных волн (а), пикового периода волн (b) и направления волн (с) в период шторма

F i g . 3. Changes in the significant wave height (a), peak wave period (b) and wave direction (c) during a storm

В таблице приведены используемые в модели значения медианного диаметра D_{50} и диаметров D_{15} и D_{90} , полученные при построении кумулятивной кривой для каждой фракции по результатам гранулометрического анализа проб грунта.

Количество каждой фракции в смеси задавалось в объемных концентрациях, соответствующих долевого содержанию данного материала в единичном объеме. В начальный момент времени распределение соотношений объемных концентраций на различных участках профиля (рис. 2, b) задавалось на основе результатов натурных наблюдений и показано до глубины 3.5 м, в мористой части профиля данный входной параметр модели не изменяется.

Гранулометрические характеристики фракций осадков

Size distribution of sediment fractions

Фракции / Fractions	D ₉₀ , мм / D ₉₀ , mm	D ₅₀ , мм / D ₅₀ , mm	D ₁₅ , мм / D ₁₅ , mm
Мелкий гравий и крупнозернистый песок / Fine gravel and coarse sand	1.5	0.800	0.65
Среднезернистый песок / Medium sand	0.5	0.375	0.25
Мелкозернистый песок / Fine sand	0.2	0.150	0.10

В модели *XBeach* каждый класс донных осадков характеризуется объемной концентрацией $p_{ij}(x, y, t)$, где i – класс осадков; j – номер слоя осадка; x, y, t – пространственные координаты и время¹⁾. В начальный момент времени ($t = 0$) состав слоя был задан в вид

$$p_{i,j}(x, y, 0) = \bar{p}_{i,j}(x, y),$$

где $\bar{p}_{i,j}(x, y)$ – заданные объемные концентрации.

Средняя объемная концентрация для каждой фракции осадка рассчитывалась по формуле ($i = 1, 2, 3$)

$$p_i(x, y, t) = \frac{\sum_{j=1}^{nd} p_{i,j}(x, y, t) \cdot \Delta z_j(x, y, t)}{\sum_{j=1}^{nd} \Delta z_j(x, y, t)}, \quad (1)$$

где $nd = 3$ – число слоев дна; $p_{i,j}$ – объемная концентрация каждого класса осадка; для каждого слоя осадка; Δz_j – вертикальный размер каждого слоя осадка. С учетом формулы (1) медианный диаметр осадка представлялся в виде

$$d(x, y, t) = \sum_{i=1}^{ngd} d_{50}(i) \cdot p_i(x, y, t), \quad (2)$$

где ngd – количество классов осадка. В нашем случае использовалось три класса осадка, выраженных в виде трех фракций. Следует отметить, что формула типа (2) использовалась в работе [4] для оценки значений d по натурным данным.

Результаты и обсуждение

Ранее в работе [12] при моделировании штормовых деформаций профиля береговой зоны и перераспределения песчаных фракций на участке пересыпи оз. Сакского направление волн θ на мористой границе не менялось во времени и составляло 270° . Сравнительный анализ результатов расчетов, полученных в [12] и в настоящей работе, показал, что изменение τ_p влияет на динамику песчаного материала исключительно вблизи уреза воды и определяет интенсивность размыва береговой части профиля (рис. 4). Поэтому ниже подробно рассматриваются результаты моделирования для пикового периода $\tau_p = 8$ с.

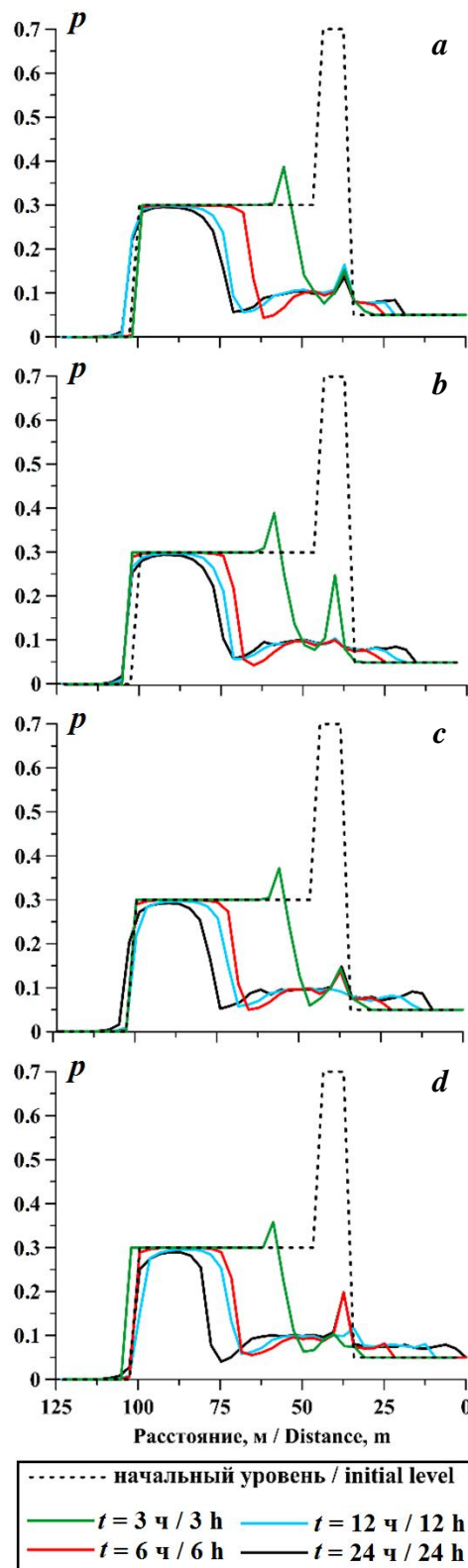


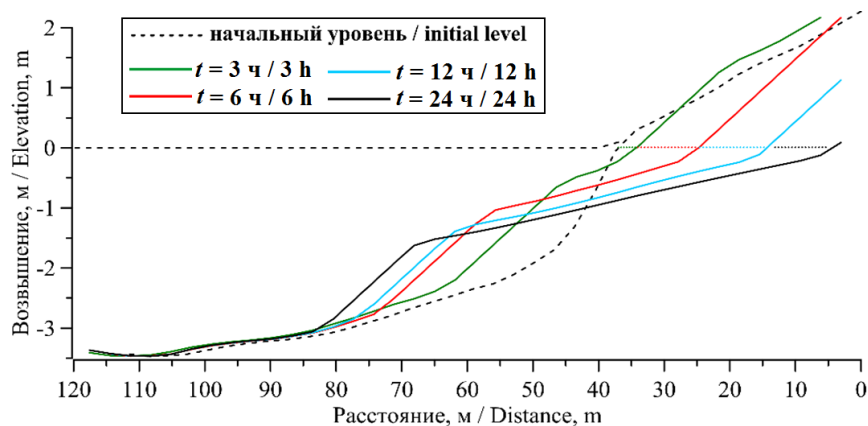
Рис. 4. Изменение объемных концентраций фракции крупнозернистого песка при пиковом периоде $\tau_p = 6$ с (*a*), 8 с (*b*), 10 с (*c*) и 12 с (*d*)

Fig. 4. Change in volume concentrations of the coarse sand fraction at the peak period $\tau_p = 6$ s (*a*), 8 s (*b*), 10 s (*c*) and 12 s (*d*)

Анализ результатов моделирования показал (рис. 5), что в первые 3 ч интенсивность размыва намного ниже по сравнению с результатами [12], а ширина полосы размыва пляжа больше полосы переотложения материала на подводном береговом склоне (ПБС). В целом ширина зоны переработки материала сократилась в 1.5 раза. При этом максимальный размыв происходит для $t = 18$ ч, и затем по мере затухания шторма профиль динамического равновесия начинает восстанавливаться и ширина пляжа незначительно увеличивается.

Как указывалось выше, максимальное волновое воздействие на участок пляжа шириной 38 м соответствует $\tau_p = 12$ с. На рис. 5 показано, что через 24 ч после начала действия шторма надводная часть профиля полностью размывается.

Как и для серии экспериментов из [12], одним из основных параметров, определяющих особенности перераспределения песчаных фракций, является уклон дна. Рассмотрим в качестве примера профиль береговой зоны для $t = 3$ ч. Угол наклона ПБС вблизи берега меняется от 0.04 на участке 1–4 м от уреза до 0.1 на участке 4–8 м от уреза. В результате концентрации крупнозернистой фракции сначала уменьшаются от 0.7 до 0.1, а затем увеличиваются до 0.2. На участке 8–13 м от уреза концентрации снова уменьшаются в связи с уменьшением значения уклона до 0.06, а на участке 13–28 м от кромки берега возрастают, достигая максимальных значений (0.4).



Р и с . 5 . Изменение профиля прибрежной зоны при пиковом периоде $\tau_p = 12$ с

F i g . 5 . Change in the coastal area profile at the peak period $\tau_p = 12$ s

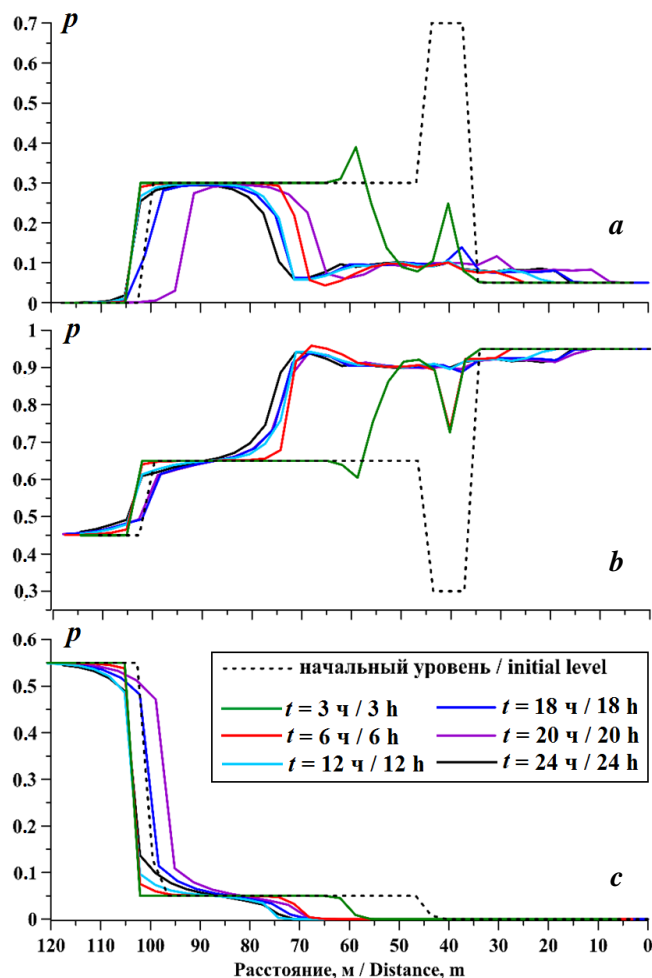
В начальную фазу шторма, когда волны выполаживают профиль ПБС, крупнозернистая фракция выносится в мористую часть, где переоткладывается с увеличением угла наклона до 0.1 на участке 40 м от уреза.

При затухании шторма зона накопления крупного материала сначала смещается к берегу вслед за профилем дна, а затем снова смещается мористее. Увеличение пикового периода волн приводит к уменьшению уклона дна вблизи линии уреза. В результате крупный песок смещается в мористую часть профиля.

По мере того как с усилением шторма крупнозернистый материал выносится из береговой зоны, среднезернистая фракция накапливается на участке 0–70 м от уреза (рис. 6, а). С развитием шторма, по мере выполаживания профиля, увеличивается зона накопления среднего песка. При $t = 6$ ч концентрации приходят в равновесие и изменяются в небольших пределах (0.90–0.95). Это говорит о том, что новообразованное аккумулятивное тело формируется именно фракцией 0.25–0.50 мм. Отмечено, что уменьшение угла наклона дна на участке 70–120 м приводит к уменьшению концентраций среднезернистого песка. Как и для крупнозернистого материала, фракции среднезернистого песка в фазу затухания шторма смещаются к берегу, а затем смещаются мористее (рис. 6, б).

Для фракции мелкодисперсного песка характерно плавное и интенсивное смещение в мористую часть. Наиболее активное перераспределение отмечается в течение первых трех часов. По мере развития шторма профиль в мористой части выполаживается, а концентрации мелкозернистого песка начинают накапливаться ближе к линии уреза (рис. 6, в).

Максимальная аккумуляция материала в верхней части ПБС (для всех значений пикового периода) происходит через 6 ч. В дальнейшем интенсивность накопления песчаного материала уменьшается, а ширина зоны накопления расширяется.



Р и с . 6 . Изменение объемных концентраций различных фракций: крупно- (а), средне- (b) и мелкозернистой (с) при пиковом периоде $\tau_p = 8$ с

Fig . 6 . Change in the volume concentrations of various fractions: coarse (a), medium grained (b) and fine (c) at the peak period $\tau_p = 8$ s

Выводы

Выполнено численное моделирование изменений гранулометрических фракций донных отложений и наносов береговой зоны на участке Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского под воздействием штормового волнения, действующего в течение 24 ч. Параметры ветрового волнения изменялись во времени, имитируя перемещение над Черным морем с запада на восток крупномасштабной циклонической атмосферной аномалии. Показано, что максимальные изменения рельефа береговой зоны и верхнего участка ПБС происходят в фазу развития шторма ($t < 6$ ч) и в течение первой половины фазы максимального штормового воздействия ($6 < t < 12$ ч). В эти же

фазы происходит интенсивная переработка профиля береговой зоны, а песчаные фракции смещаются в мористую часть профиля. Для второй половины фазы интенсивного штормового воздействия ($13 < t < 18$ ч) фракции стягиваются к берегу, что в первую очередь определяется выработкой профиля равновесия, а в фазу затухания шторма ($t > 20$ ч) они снова выносятся мористее.

Основные изменения гранулометрического состава донных наносов происходят на участке 0–120 м и ограничиваются изобатой 3.5 м. Полученные результаты позволят упростить дальнейшие батиметрические съемки для верификации данных моделирования благодаря ограничению длины галсов до 150 м от уреза (изобата 3.5 м). При разных значениях пикового периода волн интенсивность волнового воздействия на участок береговой зоны и масштабы перераспределения песчаного материала выше, чем в эксперименте с неизменным направлением волнения [12].

Подтверждено, что одним из основных параметров, определяющих особенности перераспределения песчаных фракций, является уклон дна. Показано, что с увеличением угла наклона вблизи берега накапливается крупно- и среднезернистый материал, а с уменьшением угла наклона в мористой части – мелкозернистые фракции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McNinch J.* Geologic control in the nearshore: shore-oblique sandbars and shoreline erosional hotspots // *Marine Geology*. 2004. Vol. 211, iss. 1–2. P. 121–141. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.006>
2. *Korzinin D.* Sediment budget and deformation of coastal profile // *Proceedings of the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (MEDCOAST 17)*. 31 October – 4 November 2017, Malta. Mugla, Turkey, 2017. Vol. 2. P. 917–924.
3. *Prodder S., Russell P., Davidson M.* Grain-size distributions on high-energy sandy beaches and their relation to wave dissipation // *Sedimentology*. 2017. Vol. 64, iss. 5. P. 1289–1302. <https://doi.org/10.1111/sed.12353>
4. Grain size variability on a rip-channeled beach / E. L. Gallagher [et al.] // *Marine Geology*. 2011. Vol. 287, iss. 1–4. P. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>
5. *Gallagher E. L., Elgar S., Guza R. T.* Observations of sand bar evolution on a natural beach // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, iss. C2. P. 3203–3215. <https://doi.org/10.1029/97JC02765>
6. Observations and modeling of steep-beach grain-size variability / A. J. H. M. Reniers [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 2. P. 577–591. <https://doi.org/10.1029/2012JC008073>
7. Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks / B. G. Ruessink [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2007. Vol. 112, iss. F3. F03010. doi:10.1029/2006JF000730
8. A comparison of the post-storm recovery of two sandy beaches on Hong Kong Island, southern China / F. Yu [et al.] // *Quaternary International*. 2013. Vol. 304. P. 163–175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.04.002>
9. *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*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Вып. 3. С. 65–71.

10. Dynamics of the nearshore zone of Kalamitskiy Gulf (Black Sea) under influence of wind waves / V. V. Fomin [et al.] // Proceedings of XXVI International Coastal Conference «Managing risks to coastal regions and communities in a changing world». St.-Petersburg, August 22–27, 2016. Academus Publishing, 2016. P. 1–1. doi:10.31519/conferencearticle_5b1b948b20d587.32401065
11. *Гуров К. И., Удовик В. Ф., Фомин В. В.* Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 2. С. 185–196. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-185-196
12. Sediments granulometric composition dynamics in the Kalamitsky Gulf / K. I. Gurov [et al.] // Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 October 2019). Mugla, Turkey : MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 2. P. 597–606.
13. *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря: в 2 т. Т. 2. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 216 с.
14. *Братусь О. С.* Вещественный состав пляжей Крымского полуострова // *Доклады АН СССР*. 1965. Т. 163. № 2. С. 399–402.
15. *Шуйский Ю. Д.* Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского п-ова // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 370–385.
16. *Гуров К. И.* Результаты мониторинга динамики береговой зоны и гранулометрического состава наносов пляжей в центральной части Каламитского залива // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 1. С. 36–46. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-36-46
17. *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря: в 2 т. Т. 1. М. : Изд-во АН СССР, 1958. 187 с.
18. *Романюк О. С.* Генезис крымских пляжей // *Геология побережья и дна Черного и Азовского морей в пределах УССР*. Киев : КГУ, 1967. Вып. 1. С. 178–182.
19. *Шуйский Ю. Д.* Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 13. С. 62–72.
20. *Удовик В. Ф., Горячкин Ю. Н.* Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 363–368.
21. *Горячкин Ю. Н., Репетин Л. Н.* Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69.
22. *Репетин Л. Н., Белокопытов В. Н.* Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 225–243.

23. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979–2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 24–33.
24. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands / D. Roelvink [et al.] // Coastal Engineering. 2009. Vol. 56, iss. 11–12. P. 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
25. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. P. 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2)

Об авторах:

Гуров Константин Игоревич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, gurovki@gmail.com

Фомин Владимир Владимирович, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, fomin.dntmm@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Гуров Константин Игоревич – постановка задачи, анализ результатов расчетов, подготовка текста статьи и графических материалов

Фомин Владимир Владимирович – численная реализация расчетов, обсуждение результатов, написание и оформление статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. McNinch, J., 2004. Geologic Control in the Nearshore: Shore-Oblique Sandbars and Shoreline Erosional Hotspots. *Marine Geology*, 211(1–2), pp. 121–141. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.006>
2. Korzinin, D., 2017. Sediment Budget and Deformation of Coastal Profile. In: E. Özhan, ed., 2017. *Proceedings of the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (MEDCOAST 17. 31 October – 4 November 2017, Malta*. Mugla, Turkey, 2017. Vol. 2, pp. 917–924.
3. Prodder, S., Russell, P. and Davidson, M., 2017. Grain-Size Distributions on High-Energy Sandy Beaches and their Relation to Wave Dissipation. *Sedimentology*, 64(5), pp. 1289–1302. <https://doi.org/10.1111/sed.12353>
4. Gallagher, E.L., MacMahan, J., Reniers, A.J.H.M., Brown, J. and Thornton, E.B., 2011. Grain Size Variability on a Rip-Channeled Beach. *Marine Geology*, 287(1–4), pp. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>
5. Gallagher, E.L., Elgar, S. and Guza, R.T., 1998. Observations of Sand Bar Evolution on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2), pp. 3203–3215. <https://doi.org/10.1029/97JC02765>
6. Reniers, A.J.H.M., Gallagher, E.L., MacMahan, J.H., Brown, J.A., van Rooijen, A.A., van Thiel de Vries, J.S.M. and van Prooijen, B.C., 2013. Observations and Modeling of Steep-Beach Grain-Size Variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(2), pp. 577–591. <https://doi.org/10.1029/2012JC008073>

7. Ruessink, B.G., Kuriyama, Y., Reniers, A.J.H.M., Roelvink, J.A. and Walstra, D.J.R., 2007. Modeling Cross-shore Sandbar Behavior on the Timescale of Weeks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3), F03010. doi:10.1029/2006JF000730
8. Yu, F., Switzer, A.D., Lau, A.Y.A., Yeung, H.Y.E., Chik, S.W., Chiu, H.C., Huang, Z. and Pile, J., 2013. A Comparison of the Post-Storm Recovery of Two Sandy Beaches on Hong Kong Island, Southern China. *Quaternary International*, pp. 163–175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.04.002>
9. Gurov, K.I., Fomin, V.V. and Lazorenko, D.I., 2016. Mathematical Modeling of the Redistribution of Sand Fractions According to a Underwater Coastal Slope under the Influence of the Wind Waves. In: MHI, 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 3, pp. 65–71 (in Russian).
10. Fomin, V., Gurov, K., Udovik, V. and Kononov, S., 2016. Dynamics of the Near-shore Zone of Kalamitskiy Gulf (Black Sea) under Influence of Wind Waves. In: International EMECS Center, 2016. *Proceedings of XXVI International Coastal Conference «Managing risks to coastal regions and communities in a changing world». St.-Petersburg, August 22–27, 2016*. Academus Publishing, pp. 1–1. doi:10.31519/conferencearticle_5b1b948b20d587.32401065
11. Gurov, K.I., Udovik, V.F. and Fomin, V.V., 2019. Modeling of the Coastal Zone Relief and Granulometric Composition Changes of Sediments in the Region of the Bogaili Lake Bay-Bar (the Western Crimea) during Storm. *Physical Oceanography*, 26(2), pp. 170–180. doi:10.22449/1573-160X-2019-2-170-180
12. Gurov, K., Fomiv, V., Alekseev, D. and Ivancha, E., 2019. Sediments Granulometric Composition Dynamics in the Kalamitskiy Gulf. In: E. Özhan, ed., 2019. *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019)*. Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation. Vol. 2. P. 597–606.
13. Zenkovich, V.P., 1960. [*Morphology and Dynamics of the Soviet Black Sea Coast, Vol. 2*]. Moscow: AS USSR Publ., 216 p. (in Russian).
14. Bratus, O.S., 1965. [Material Composition of the Crimean Peninsula Beaches]. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections*, 163(2), pp. 399–402 (in Russian).
15. Shuisky, Yu.D., 2007. Mechanical Composition of Beach Alluvium on West Coast of the Crimea. In: MHI, 2005. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 15, pp. 370–385 (in Russian).
16. Gurov, K.I., 2020. Results of Coastal Zone Dynamics and Beach Sediment Granulometric Composition Monitoring in the Central Part of the Kalamitskiy Gulf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 36–46. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-36-46 (in Russian).
17. Zenkovich, V.P., 1958. [*Morphology and Dynamics of the Soviet Black Sea Coast, Vol. 1*]. Moscow: AS USSR Publ., 187 p. (in Russian).
18. Romanyuk, O.S., 1967. [Genesis of Crimean Beaches]. In: KGU, 1967. [*Geology of the Black and Azov Seas Coast and Bottom within the Ukrainian SSR*]. Kiev: KGU. Iss. 1, pp. 178–182 (in Russian).
19. Shuisky, Yu.D., 2005. Basic Peculiarities of Morphology and Dynamic of the Western Crimea Peninsula Coast. In: MHI, 2005. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 13, pp. 62–72 (in Russian).

20. Udovik, V.F. and Goryachkin, Yu.N., 2013. [Interannual Variability of the Along-shore Sediment Flow in the Coastal Zone of the Western Crimea]. In: MHI, 2013. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 27, pp. 363–368 (in Russian).
21. Goryashkin, Yu.N. and Repetin, L.N., 2009. Storm Wind and Wave Regime near the Black Sea Coast of Crimea. In: MHI, 2009. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol, MHI. Iss. 19, pp. 56–69 (in Russian).
22. Repetin, L.N. and Belokopytov, V.N., 2008. Wind Climate of North-Western Black Sea and its Climatic Changes. In: MHI, 2008. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 17, pp. 225–243 (in Russian).
23. Kharitonova, L.V. and Fomin, V.V., 2012. Statistical Characteristics of Wind Waves in the Coastal Area of the Western Crimea According to Retrospective Estimation during 1979 – 2010. In: MHI, 2012. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 26(1), pp. 24–33 (in Russian).
24. Roelvnik, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., VcCall, R. and Lescinski, J., 2009. Modelling Storm Impacts on Beaches, Dunes and Barrier Islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), pp. 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
25. Smagorinsky, J., 1963. General Circulation Experiments with Primitive Equations. I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, 91, pp. 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2)

About the authors:

Konstantin I. Gurov, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, gurovki@gmail.com

Vladimir V. Fomin, Head of Department of Computer Engineering and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, v.fomin@ukr.net

Contribution of the authors:

Konstantin I. Gurov – problem statement, analysis of calculation results, preparation of the text and graphic materials

Vladimir V. Fomin – numerical implementation of calculations, discussion of results, preparation of the article text

All the authors have read and approved the final manuscript.