

## Математическое моделирование динамики гранулометрического состава донных отложений Балаклавской бухты под воздействием штормового волнения

К. И. Гуров , В. В. Фомин

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
 *gurovki@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.05.2020 г., после доработки – 26.05.2020 г.

**Цель.** На основе математического моделирования оценено влияние ветрового волнения на перераспределение песчаных фракций донных отложений полузамкнутой акватории эстуарного типа на примере Балаклавской бухты.

**Методы и результаты.** Применялся двухмерный вариант морфодинамической модели *XBeach* с постоянным шагом сетки 10 м. Характеристики ветрового волнения на мористой границе расчетной области задавались с помощью спектра *JONSWAP*. Расчеты выполнялись для штормового волнения, возможного один раз в год. При проведении численных экспериментов использовались данные о гранулометрическом составе, полученные в ходе выполнения мониторинговых наблюдений в районе Балаклавской бухты.

**Выводы.** Результаты моделирования подтвердили, что основными определяющими факторами, регулирующими перераспределение донного материала, являются глубина и уклон дна. Отмечено, что при резком изменении угла наклона дна между изобатами 6–7 и 7–8 м происходит осаждение крупных и средних фракций, а на участке между изобатами 9–10 и 10–12 м – осаждение мелкозернистого песка. Установлено, что в акватории Балаклавской бухты основное перераспределение песчаного материала, вызванное штормовым волнением, происходит в пределах южного бассейна и на выходе из бухты в береговой зоне залива Мегало-Яло. Такой характер перераспределения песчаного материала определяется особенностями орографии берега бухты, а именно коленовидной узостью, разделяющей северный и южный бассейны. Тем не менее в северном бассейне под воздействием проникающего сюда волнения происходят незначительные перемещения фракций донных отложений от западного берега к центральной части бассейна и к восточному берегу.

**Ключевые слова:** Балаклавская бухта, донные отложения, модель *XBeach*, гранулометрический состав, штормовые деформации

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования», а также при частичной поддержке РФФИ в рамках проектов № 18-05-80035 и № 18-45-920007.

**Для цитирования:** Гуров К. И., Фомин В. В. Математическое моделирование динамики гранулометрического состава донных отложений Балаклавской бухты под воздействием штормового волнения // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 85–97. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-85-97

# Mathematical Modeling the Dynamics of the Bottom Sediments Granulometric Composition in the Balaklava Bay Affected by the Wind Waves

K. I. Gurov ✉, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russia  
✉ gurovki@gmail.com

**Purpose.** Based on the mathematical modeling methods, influence of the wind waves on redistribution of the sand fractions in the semi-closed estuary-type water area is estimated using the Balaklava Bay as an example.

**Methods and Results.** A two-dimensional version of the *XBeach* model with a constant grid spacing 10 m was used. The characteristics of wind waves were preset using the *JONSWAP* spectrum implying fixed height, wave period and various combinations of the wave direction. The calculations were carried out for a storm event lasting about 12 hours once a year. The *in-situ* data on the particle size distribution in the bottom sediments resulted from the monitoring observations performed by the Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, in the Balaklava Bay region was used in the numerical experiments.

**Conclusions.** The results of modeling showed that the basic determining factors regulating the sediments movement were the depth and the bottom slope. It is noted that changing of the bottom inclination angle between the isobaths 6–7 and 7–8 m leads to deposition of the large and medium fractions, and in the area between the isobaths 9–10 and 10–12 m – to accumulation of fine sand. It was revealed that in the Balaklava Bay water area, the main redistribution of sand material caused by the storm waves took place within the southern basin, as well as at the bay exit in the coastal zone of the Megalo-Yalo Bay. This is primarily determined by the features of the Balaklava Bay coast orography, namely, the knee-shaped narrowness separating the northern and southern basins. Nevertheless, in the isolated northern part of the Balaklava Bay being affected by the storm waves, insignificant dynamics of sand material was observed. The fractions of bottom sediments are redistributed from the western coast to the central part of the basin and to the eastern coast of the bay.

**Keywords:** Balaklava Bay, bottom sediments, *XBeach* model, granulometric composition, storm deformations

**Acknowledgements:** The investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas’ ecosystems of the coastal zones” (code “Coastal investigations”) and at the RFBR partial support within the framework of the research projects No. 18-05-80035 and 18-45-920007.

**For citation:** Gurov, K.I. and Fomin, V.V., 2021. Mathematical Modeling the Dynamics of the Bottom Sediments Granulometric Composition in the Balaklava Bay Affected by the Wind Waves. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(1), pp. 78-89. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-78-89

**Введение.** Благодаря своим уникальным природно-климатическим условиям и морфометрическим характеристикам Балаклавская бухта занимает особое место среди бухт Севастопольского региона. В настоящее время она активно развивается как портовая акватория для маломерных судов, что в несколько раз усиливает антропогенное давление на воды бухты и может привести к ухудшению ее экологического состояния. Комплексное строительство в береговой зоне, большое количество органического вещества, поступающего с коммунальными и ливневыми стоками, негативно влияют на экологическую целостность данного участка береговой зоны. Поддержание этой целостности важно для развития курортно-рекреационного комплекса.

Основные этапы исследования акватории Балаклавской бухты, а также полученные на основе анализа данных экспедиционных наблюдений современное описание структуры и временной изменчивости морфометрических, гидрофизических, гидрооптических, гидрохимических, гидробиологических полей и оценка степени загрязнения вод представлены в работе [1]. Донным отложениям в этой монографии уделено мало внимания. Тем не менее исследование донных отложений в Балаклавской бухте началось уже в конце XIX в. [2]. Первые современные сведения касались физико-химических свойств донных отложений, состава и количественных характеристик макрозообентоса [3]. Сейчас большое внимание уделяется загрязнению донных отложений бухты органическими веществами [4, 5] и тяжелыми металлами [6, 7]. В работах [5, 7] отмечено, что фракционный состав в поверхностном слое донных отложений изменился, в первую очередь вследствие увеличения доли мелкозернистого материала.

В настоящее время особо актуально изучение региональных особенностей динамики рельефа береговой зоны и перераспределения фракций наносов на прибрежных участках с применением широкого спектра математических моделей и расчетных методик [8–13]. Несмотря на то что для акватории Балаклавской бухты выполнялись работы по математическому моделированию особенностей циркуляции вод [14, 15], работ по моделированию динамики донных отложений в исследуемом районе не проводилось.

Цель данной работы – оценить влияние ветрового волнения на перераспределение песчаных фракций на примере Балаклавской бухты (полузамкнутой акватории эстуарного типа) и близлежащих районов залива Мегало-Яло. Ранее работы в данном направлении проводились авторами для участка береговой зоны Южного берега Крыма в районе Лименского залива [16].

**Характеристика района исследований.** Балаклавская бухта расположена на юго-западном берегу Крыма между мысами Фиолент и Айя. Акватория бухты разделяется исходя из морфометрии дна и конфигурации берегов на мелководную часть в вершине бухты, центральную часть, южное глубоководное расширение и коленообразную узость, соединяющую две последние части.

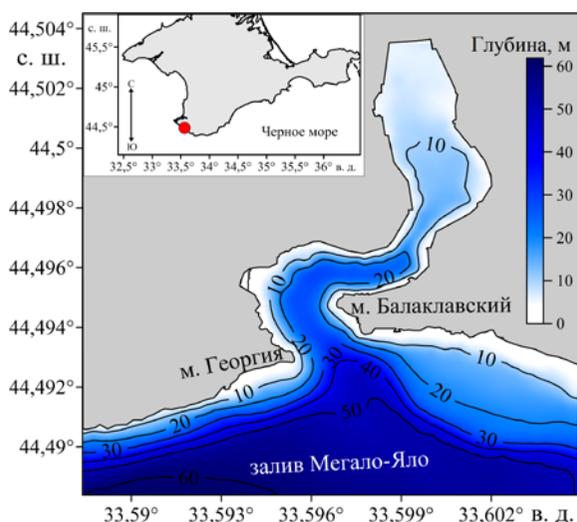
Согласно работе [17], район залива Мегало-Яло и входящая в него Балаклавская бухта относятся к тектонической структуре мегантиклинория горного Крыма. Балаклавская бухта представляет собой характерный ингрессионный залив риасового типа [18]. Современные морфометрические характеристики бухты: максимальная глубина на входном створе 34,2 м, средняя глубина 12,5 м (47 % площади водной поверхности бухты расположено над глубинами 4–12 м), длина по фарватеру 1410 м, ширина на входном створе 200 м, наименьшая ширина 95 м, длина береговой линии 3,33 км. Коленовидная узость в центральной части разделяет бухту на две примерно равные по площади акватории – северный и южный бассейны, которые различаются особенностями морфометрии и гидродинамики [1].

Как известно [19], в районе Балаклавы среднемноголетняя скорость ветра достигает 6 м/с. Максимальные скорость ветра и интенсивность волнения

отмечаются в холодное время года. Преобладают ветры южного (31 %), северного (29 %) и северо-восточного (22 %) направлений.

Центральная и северная части бухты отличаются своей изолированностью от ветрового воздействия. Штормы характерны только для южной открытой и глубоководной части при сильных южных ветрах. По наблюдениям из работы [19], в Балаклавской бухте максимальную повторяемость имеют волнения, в том числе штормовые, южного (около 30 %), юго-западного (17,2 %) и юго-восточного (10,7 %) направлений (то есть со стороны моря). В осенний период во время прохождения средиземноморских циклонов ветры южных румбов способны достигать 30 м/с и формировать волны высотой до 7 м [19].

**Математическая модель и входные данные.** Для исследования особенностей влияния ветрового волнения на перераспределение фракций донных отложений в районе Балаклавской бухты применялась комплексная морфодинамическая модель *XBeach* [20]. Был использован двухмерный вариант модели с постоянным шагом сетки 10 м, позволяющий проводить расчеты ветрового волнения, ветро-волновых течений и донных деформаций одновременно. Данные о рельефе дна были получены путем оцифровки батиметрической карты Балаклавской бухты и прилегающей акватории. Размеры расчетной области составили  $1,8 \times 1,3$  км. Область включала в себя акваторию Балаклавской бухты и часть прибрежной зоны залива Мегало-Яло (рис. 1). Численное моделирование выполнялось для штормов продолжительностью 12 ч. На западной и восточной жидких границах задавались условия свободного прохождения [20].



**Р и с. 1.** Район исследований и рельеф дна Балаклавской бухты  
**Fig. 1.** Location of the research area and the bottom topography of the Balaklava Bay

Для определения характеристик ветрового волнения на южной границе расчетной области использовался двумерный частотно-угловой спектр вида [20]

$$E(\sigma, \theta) = F(\sigma) \cdot \psi(l) \cdot \cos^{2l} \left( \frac{\theta - \bar{\theta}}{2} \right), \quad \psi(s) = \frac{2^{2l-1} \Gamma^2(l+1)}{\pi \Gamma(ls+1)},$$

где  $\sigma$  – круговая частота волн;  $\theta$  – направление волн;  $l$  – показатель степени углового рассеивания волн;  $\bar{\theta}$  – среднее направление волн;  $\Gamma$  – гамма-функция;  $F(\sigma)$  – частотный спектр *JONSWAP*, определяемый в виде

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

Здесь  $\alpha_F = 0,0131$ ;  $a = \sigma/\sigma_p$ ;  $\beta = \exp\left(-\frac{(a-1)^2}{2b}\right)$ ;  $b = \begin{cases} 0,07 & \text{при } a \leq 1 \\ 0,09 & \text{при } a > 1 \end{cases}$ ;  $h_s$  – высота значительных волн;  $\sigma_p$  – круговая частота волн, соответствующая пику в спектре;  $\tau_p = 2\pi/\sigma_p$  – пиковый период;  $s = 1000$  – параметр пиковатости спектра. Такое значение  $s$  выбрано для задания спектра с малым угловым рассеиванием [20, с. 62], что упрощает использование модели *XBeach*.

На южной границе расчетной области  $h_s$  и  $\tau_p$  в формуле (1) принимались равными 5 м и 10 с соответственно. В работе [21] на основе ретроспективных расчетов волнения в Черном море за 1979–2019 гг. по модели *SWAN* показано, что принятые значения  $h_s$  и  $\tau_p$  соответствуют штормам, возможным в районе Балаклавской бухты один раз в год. Численные эксперименты выполнялись для трех средних направлений волнения  $\bar{\theta}$  на южной границе расчетной области (южного, юго-юго-западного и юго-юго-восточного). Согласно работе [21], юго-юго-западное направление соответствует наиболее интенсивным штормовым ситуациям в районе Балаклавской бухты.

В первом цикле численных экспериментов в качестве начальных параметров для осадка использовалась однородная комбинация гранулометрических фракций. Содержание крупнозернистого материала составило 25 %, среднезернистого – 10 % и мелкозернистого – 65 %. Выбранные значения удовлетворяли средним величинам для каждой фракции осадка и отображали долевое соотношение гранулометрического состава в начальный момент времени.

Для второй серии численных экспериментов использовалась комбинация из трех фракций, пространственное распределение которых основано на результатах мониторинговых наблюдений Морского гидрофизического института, выполненных в 2005, 2015, 2018 гг. [4–7, 22]. Гранулометрический состав донных осадков задавался в виде смеси из трех компонентов (мелкий гравий и крупнозернистый песок, среднезернистый песок, мелкозернистый песок), распределенных с различным соотношением объемных концентраций на разных участках исследуемой акватории. Обобщенная характеристика гранулометрического состава донных осадков в районе Балаклавской бухты представлена в таблице.

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

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

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

**Характеристика гранулометрического состава донных осадков  
в районе Балаклавской бухты**  
**Characteristics of the bottom sediments particle size distribution  
in the Balaklava Bay region**

Фракция / Fraction	$D_{90}$ , 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 и алеврит / Fine sand and aleurite	0,2	0,130	0,10

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

$$p_i(x, y, t) = \frac{\sum_{j=1}^{nd} p_{i,j}(x, y, t) \cdot \Delta z_j(x, y, t)}{\sum_{j=1}^{nd} \Delta z_j(x, y, t)}, \quad (2)$$

где  $\Delta z_j$  – толщина каждого слоя осадка. С учетом формулы (2) медианный диаметр осадка представлялся в виде

$$d(x, y, t) = \sum_{i=1}^{ngd} d_{50}(i) \cdot p_i(x, y, t), \quad (3)$$

где  $ngd$  – количество классов осадка. В нашем случае использовалось три класса осадка, выраженных в виде трех фракций.

Далее с помощью соотношения (3) оценивался относительный средний диаметр осадка:

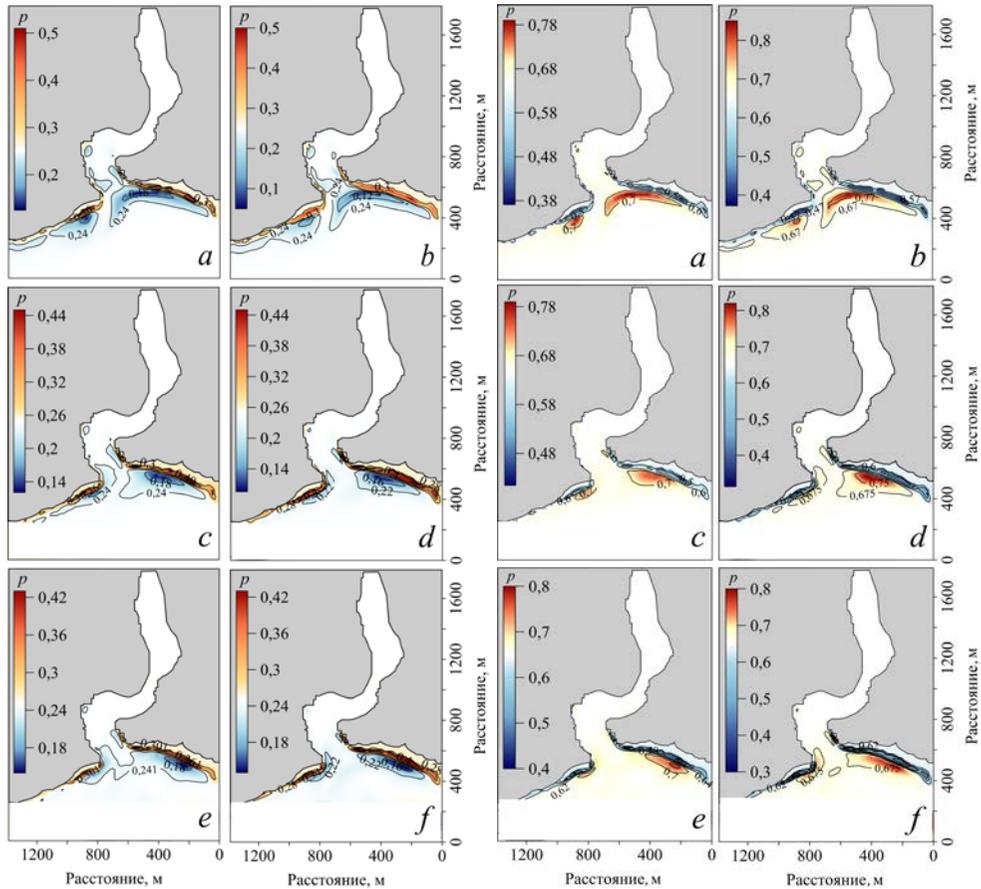
$$D(x, y, t) = 100\% \left( \frac{d(x, y, t)}{d(x, y, 0)} - 1 \right).$$

**Результаты моделирования и обсуждение.** Как показали результаты численного моделирования, в акватории Балаклавской бухты основное перераспределение песчаного материала, вызванное штормовым волнением, происходит только в южной части, а также на выходе из бухты в береговой зоне залива Мегало-Яло. В первую очередь это определяется особенностями ортографии берега, а именно коленовидной узостью, разделяющей северную и южную части бухты.

Подтверждено, что основными определяющими факторами, регулирующими перемещение материала, являются глубина и уклон дна. Согласно работе [23], если подводный береговой склон сложен наносами различной крупности, то волны стремятся распределить материал по убыванию крупности от берега, при этом угол наклона дна будет определяться составом материала на данном участке. В настоящей работе было получено, что резкое из-

менение уклона дна (от 0,05 до 0,125) между изобатами 6–7 и 7–8 м сначала приводит к осаждению крупных и средних фракций, а на участке между изобатами 9–10 и 10–12 (0,125 – 0,17) – к осаждению уже мелкозернистой фракции. Перераспределение песчаного материала начинает проявляться сразу же после начала действия волнения.

На рис. 2 и 3 показаны пространственные распределения объемных концентраций песчаных фракций в районе Балаклавской бухты после 6 и 12 ч действия штормового волнения разных направлений.



**Р и с. 2.** Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой песчаной фракции при волнении юго-юго-восточного (*a, b*), южного (*c, d*) и юго-юго-западного (*e, f*) направления через 6 ч (*a, c, e*) и 12 ч (*b, d, f*) после начала действия волнения

**F i g. 2.** Spatial distribution of the coarse-grained sand fraction volume concentrations at the waves of the south-southeast (*a, b*), south (*c, d*) and south-southwest (*e, f*) directions in 6 (*a, c, e*) and 12 (*b, d, f*) hours after the waves began

**Р и с. 3.** Пространственное распределение объемных концентраций мелкозернистой песчаной фракции при волнении юго-юго-восточного (*a, b*), южного (*c, d*) и юго-юго-западного (*e, f*) направления через 6 ч (*a, c, e*) и 12 ч (*b, d, f*) после начала действия волнения

**F i g. 3.** Spatial distribution of the fine-grained sand fraction volume concentrations at the waves of the south-southeast (*a, b*), south (*c, d*) and south-southwest (*e, f*) directions in 6 (*a, c, e*) and 12 (*b, d, f*) hours after the waves began

Анализ представленных полей показывает, что под воздействием штормового волнения крупнозернистый и среднезернистый материал распределяется в береговой зоне и в районах, прилегающих к мысам. Расположение, а также ширина областей максимальных концентраций крупнозернистого материала в западной и восточной частях исследуемого участка береговой зоны менялись с изменением направления волнения (рис. 2).

Максимальные концентрации крупнозернистого материала прослеживаются между изобатами 5–8 м в западной части и 6–10 в восточной. У западного берега накопление материала крупной и средней зернистости происходит до изобаты 4 м. На больших глубинах содержание крупнозернистых фракций уменьшается, достигая в пределах изобат 12–18 м своих минимальных значений. В районе мысов из-за резкого увеличения глубин накопление крупнозернистого материала прослеживается до изобат 15–17 м. С увеличением продолжительности волнового воздействия количество транспортируемого материала увеличивается, а полоса накопления крупнозернистого песка расширяется. В зависимости от направления волнения ее ширина изменяется: в западной части от 50–65 м через 6 ч после начала действия волнения до 60–80 м через 12 ч, а в восточной – от 105–110 м через 6 ч до 115–120 м через 12 ч.

При  $t = 12$  ч максимальное накопление крупнозернистого материала происходит в восточной части береговой зоны на выходе из бухты при волнении юго-юго-восточного направления между изобатами 7 и 9 м, а при южном и юго-юго-западном направлениях – между изобатами 6 и 10 м. Максимальная доля крупнозернистой фракции для волнения юго-юго-восточного направления составила 0,50, для южного направления – 0,45, а для юго-юго-западного – 0,43.

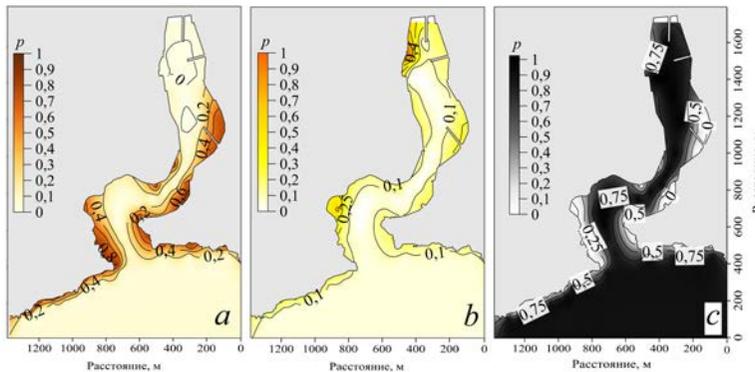
Установлено, что, начиная с первых часов действия штормового волнения, мелкозернистый материал выносятся из береговой зоны и накапливается на участках свала глубин (рис. 3). Максимальные концентрации отмечаются между изобатами 12–18 м, общее перераспределение мелкозернистого материала достигает изобат 30–40 м. Ширина области накопления мелкозернистого песка изменяется в зависимости от направления волнения и времени его воздействия.

Как следует из рис. 3, вне зависимости от направления волнения области максимальной концентрации мелкозернистого песка возникают у восточного берега на выходе из бухты. Ширина области накопления этой фракции при  $t = 12$  ч изменяется от 80–115 м при волнении юго-юго-восточного направления до 120 м при волнении юго-юго-западного направления и до 150 м при волнении южного направления.

Во втором цикле численных экспериментов в качестве начальных параметров принималась комбинация из трех фракций донных отложений. Начальное распределение объемных концентраций каждой фракции определялось на основе результатов натурных наблюдений. Начальное распределение песчаных фракций показано на рис. 4.

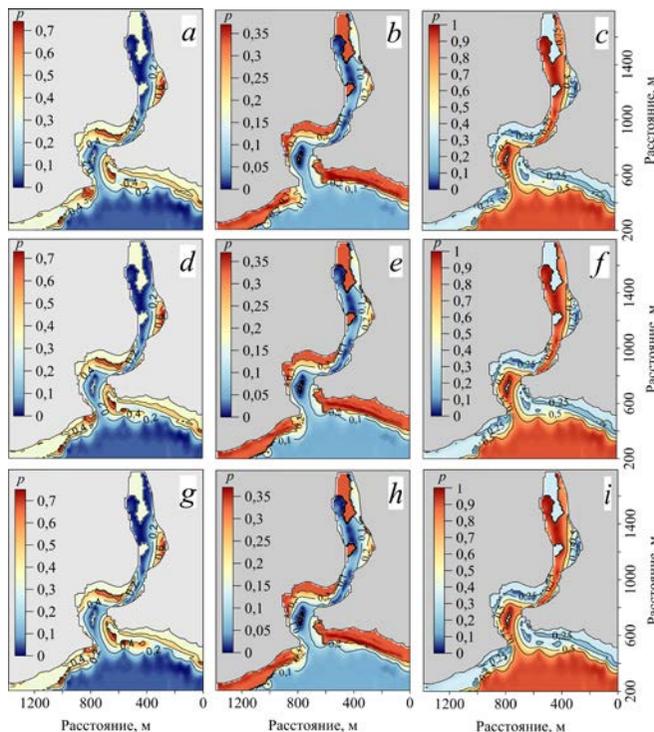
Как показали расчеты, накопление крупнозернистого материала происходит в юго-восточной части северного бассейна, в северной части южного бассейна и вокруг оконечностей мысов на выходе из бухты (рис. 5). Перенос крупно- и среднезернистого материала от берега к фарватеру в северной части южного бассейна, по-видимому, определяется особенностями орографии берега и рефракцией волн. Среднезернистый материал распространен широ-

кой полосой (95–120 м) на выходе из бухты, в северной части южного бассейна, а также в вершине северной части бухты. Накопление мелкозернистой фракции происходит в северо-западной части северного бассейна, в районе фарватера и на выходе из бухты.



**Р и с. 4.** Начальное распределение фракций: *a* – крупнозернистого материала; *b* – среднезернистого материала; *c* – мелкозернистого материала

**F i g. 4.** Initial distribution of the fractions: *a* – coarse-grained, *b* – medium-grained and *c* – fine-grained ones



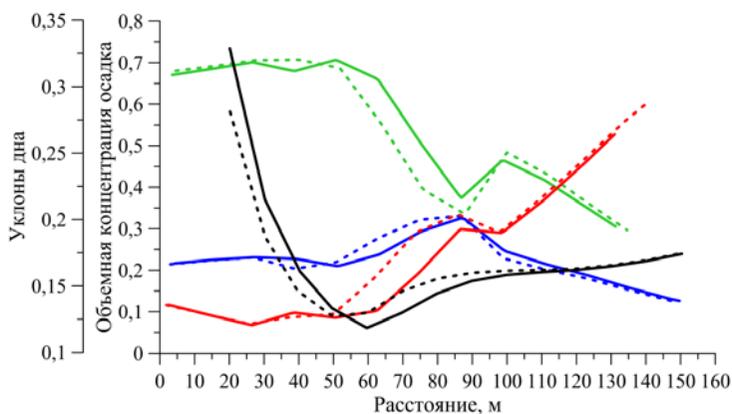
**Р и с. 5.** Пространственное распределение объемных концентраций крупнозернистой (*a, d, g*), среднезернистой (*b, e, h*); мелкозернистой (*c, f, i*) песчаных фракций при  $t = 12$  ч при волнении юго-юго-восточного, южного и юго-юго-западного направлений соответственно

**F i g. 5.** Spatial distribution of volume concentrations of the coarse-grained (*a, d, g*), medium-grained (*b, e, h*) and fine-grained (*c, f, i*) sand fractions at  $t = 12$  h at the south-southeast, south and south-southwest wave directions, respectively

Особенности динамики песчаных фракций в южной части бухты будут рассмотрены на примере профиля у мыса Георгия (см. рис. 1). Концентрации крупнозернистого песка на участке 50–90 м уменьшаются, а среднезернистого, наоборот, возрастают. Установлено, что ширина полосы накопления среднезернистого песка изменяется обратно пропорционально ширине зоны распространения крупнозернистого песка. По мере развития шторма она сужается от 50 м через 4 ч после начала действия волнения до 30 м через 12 ч.

Концентрации мелкозернистой фракции вблизи берега минимальны. На участке 0–50 метров они составляют всего 0,07–0,1. Изменения концентраций, определяемые интенсивностью волнения, отмечаются на участке 50–100 м от берега между изобатами 7,5 и 15 м. С глубиной концентрации крупного алеврита только увеличиваются.

Как и в расчетах в первом цикле численных экспериментов, одним из основных параметров, определяющих особенности перераспределения песчаных фракций, является уклон дна. В качестве примера рассмотрим участок мыса Георгия на выходе из бухты при волнении юго-юго-западного направления (рис. 6). В зоне активной переработки профиля дна происходит сглаживание мелкомасштабных неоднородностей рельефа и по уклонам поверхности  $\beta$  можно выделить три характерных участка. С изменением периода волн уклоны для каждого участка изменяются в незначительных пределах.



**Р и с. 6.** Особенности перераспределения песчаных фракций (крупнозернистой – зеленая линия, среднезернистой – синяя линия, мелкозернистой – красная линия) и динамика угла наклона дна (черная линия) при волнении юго-юго-западного направления в районе мыса Георгия через 6 ч (штриховая линия) и 12 ч (прямая линия) после начала действия волнения

**Fig. 6.** Features of the sand fractions (coarse-grained – green line, medium-grained – blue line, fine-grained – red line) redistribution and dynamics of the bottom inclination angle (black line) at the waves of the south-southwest direction in the Cape Georgia area in 6 (dotted line) and 12 (straight line) hours after the waves began

На первом участке ( $1,42 < \beta < 0,12$ ) отмечаются повышенные значения уклонов дна, а также их резкий спад на отрезке, ширина которого, в зависимости от продолжительности волнового воздействия, изменяется от 0–50 м через 6 ч до 0–60 м через 12 ч. Данный участок характеризуется максимальным накоплением крупнозернистой фракции. На втором участке ( $0,13 < \beta < 0,16$ ) отмечается незначительное увеличение уклонов дна, вследствие чего

происходит осаждение более мелких фракций. В зависимости от продолжительности волнового воздействия ширина второго участка изменяется от 35 м через 6 ч до 40 м через 12 ч. В пределах этого участка отмечаются максимальные концентрации среднезернистого (0,2–0,35) и мелкозернистого (от 0,1 до 0,3) материала. Третий участок ( $0,16 < \beta < 0,19$ ) характеризуется стабильным ростом значений уклона дна. Положение этого участка определяется мористой границей второго участка и положением границы области, где волновая переработка профиля не происходит.

Результаты моделирования показали, что, несмотря на изолированность северной части Балаклавской бухты от волнения открытого моря (южный сектор), под воздействием штормов южного, юго-юго-восточного и юго-юго-западного направлений, возможных один раз в год, продолжительностью 12 ч в северном бассейне наблюдается незначительная динамика песчаного материала. Отмечается перераспределение фракций донных отложений от западного берега к центральной части бассейна и к восточному берегу бухты.

**Заключение.** С помощью морфодинамической модели *XBeach* для акватории Балаклавской бухты было проведено два цикла численных экспериментов, направленных на исследование особенностей перераспределения песчаного материала под воздействием штормового волнения различных направлений. В первом цикле численных экспериментов в качестве начальных параметров для осадка использовалась однородная комбинация гранулометрических фракций. Выбранные значения удовлетворяли средним величинам для каждой фракции осадка. Во втором цикле численных экспериментов в качестве начальных параметров принималась комбинация из трех фракций донных отложений. Начальное распределение объемных концентраций каждой фракции определялось на основе результатов натуральных наблюдений.

Результаты первого численного эксперимента показали, что в акватории Балаклавской бухты основное перераспределение песчаного материала, вызванное штормовым волнением, происходит в пределах южного бассейна, а также на выходе из бухты в береговой зоне залива Мегало-Яло. В первую очередь это определяется особенностями орографии берега, а именно коленивидной узостью, разделяющей северный и южный бассейны. Расположение областей максимальных концентраций крупнозернистого материала, а также ширина областей накопления менялись с изменением угла волнения.

Результаты второго эксперимента показали, что, несмотря на изолированность северной части Балаклавской бухты от волнения открытого моря, под воздействием штормов в северном бассейне происходит незначительное перераспределение песчаного материала. Отмечается перемещение фракций донных отложений от западного берега к центральной части бассейна и к восточному берегу бухты.

Результаты обоих численных экспериментов показывают, что одним из основных параметров, определяющих особенности перераспределения песчаных фракций, является уклон дна. Установлено, что резкое изменение угла наклона дна между изобатами 6–7 и 7–8 м сначала приводит к осаждению крупных и средних фракций, а на участке между изобатами 9–10 и 10–12 – к осаждению уже мелкозернистого песка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 218 с.
2. *Вериго А. А.* Исследование целебной грязи из мелководной Балаклавской бухты // Отчеты о деятельности Одесского бальнеологического общества. Одесса, 1888. Вып. 3 : С июня 1883 по октябрь 1887 года / Под ред. д-ра М. Погребинского. С. 22–26.
3. *Мионов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В.* Комплексные экологические исследования Балаклавской бухты // Экология моря. 1999. Вып. 49. С. 16–21.
4. Organic matter and grain-size distribution of the modern bottom sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) / N. A. Orekhova [et al.] // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25, iss. 6. P. 479–488. doi:10.22449/1573-160X-2018-6-479-488
5. *Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Гуров К. И.* Содержание органических веществ и тяжелых металлов в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 3. С. 82–88. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-82-89
6. *Ovsyany E. I., Kotelyanets E. A., Orekhova N. A.* Arsenic and heavy metals in the bottom sediments of the Balaklava Bay (Black Sea) // *Physical Oceanography*. 2009. Vol. 19, iss. 4. 254. <https://doi.org/10.1007/s11110-009-9048-4>
7. Pollutants in Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) / E. A. Kotelyanets [et al.] // *Physical Oceanography*. 2019. Vol. 26, iss. 5. P. 414–424. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-414-424
8. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands / D. Roelvink [et al.] // *Coastal Engineering*. 2009. Vol. 56, iss. 11–12. P. 1133–1152.
9. *Van Rijn L. C., Tonnon P. K., Walstra D. J. R.* Numerical modelling of erosion and accretion of plane sloping beaches at different scales // *Coastal Engineering*. 2011. Vol. 58, iss. 7. P. 637–655.
10. Impacts of wave and tidal forcing on 3D nearshore processes on natural beaches. Part I: Flow and turbulence fields / R. Bakhtyar [et al.] // *Ocean Systems Engineering*. 2016. Vol. 6, iss. 1. P. 23–60. <http://dx.doi.org/10.12989/ose.2016.6.1.023>
11. *Леонтьев И. О.* Моделирование берегового профиля, сформированного штормовым циклом // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 6. С. 973–981. doi:10.1134/S0030157418060084
12. *Леонтьев И. О.* Штормовые деформации берегового склона с подводными валами // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 1. С. 125–132. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574591125-132>
13. *Кузнецова О. А., Сапрыкина Я. В.* Моделирование изменчивости песчаного пляжа при взаимодействии волн с подводным валом // *Геоморфология*. 2019. № 3. С. 57–67. doi:10.31857/S0435-42812019357-67
14. *Кубряков А. И., Попов М. А.* Моделирование циркуляции и распространения загрязняющей примеси в Балаклавской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 3. С. 49–61.
15. *Фомин В. В., Репетин Л. Н.* Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 4. С. 43–58.
16. *Gurov K. I., Fomin V. V.* Dynamics of sediments grainsize in Limensky Gulf // *Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 17, 31 Oct – 04 Nov 2017 / Ed. E. Özhan. Dalyan, Mugla, Turkey : Mediterranean Coastal Foundation, 2017. Vol. 2. P. 925–935. URL: [https://www.researchgate.net/publication/321035650\\_The\\_dynamics\\_of\\_sediments\\_grain-size\\_in\\_Limensky\\_Gulf](https://www.researchgate.net/publication/321035650_The_dynamics_of_sediments_grain-size_in_Limensky_Gulf) (дата обращения: 21.01.2021).*
17. Геология СССР. Т. 8. Крым. Ч. 1. Геологическое описание / [Гл. ред. А. В. Сидоренко]. М. : Недра, 1969. 576 с.
18. *Зенкович В. П.* Берега Черного и Азовского морей. М. : Географгиз, 1958. 374 с.

19. *Репетин Л. Н., Белокопытов В. Н., Липченко М. М.* Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 9. С. 13–28.
20. XBeach Technical Reference: Kingsday Release. Model description and reference guide to functionalities : report / D. J. A. Roelvink [et al.]. Delft : Deltares, 2015. 141 p. doi:10.13140/RG.2.1.4025.6244
21. *Фомин В. В., Полозок А. А.* Режим ветрового волнения в районе Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. Вып. 2. С. 53–67. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-53-67
22. Factors of formation and features of physical and chemical characteristics of the bottom sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) / K. I. Gurov [et al.] // Physical Oceanography. 2015. No. 4. P. 46–52. doi:10.22449/1573-160X-2015-4-46-52
23. *Зенкович В. П.* Динамика и морфология морских берегов. М. ; Л. : Морской транспорт, 1946. Ч. 1 : Волновые процессы. 496 с.

*Об авторах:*

**Гуров Константин Игоревич**, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, gurovki@gmail.com

**Фомин Владимир Владимирович**, заведующий отделом вычислительной техники и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, v.fomin@ukr.net