

Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым)

К. И. Гуров*, В. Ф. Удовик, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: gurovki@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2018 г., после доработки – 01.10.2018 г.

Введение. Проведена серия численных экспериментов с целью изучить механизм штормовых деформаций рельефа береговой зоны и перераспределение различных фракций наносов при изменении параметров ветровых волн, подходящих по нормали к берегу.

Материалы и методы. С использованием математической модели *XBeach* исследовались литодинамические процессы на участке береговой зоны Западного Крыма в районе пересыпи оз. Богайлы. В качестве входных параметров использовались натурные данные о рельефе дна и гранулометрическом составе наносов, полученные в ходе выполнения мониторинговых наблюдений, осуществляемых Морским гидрофизическим институтом РАН. Состав наносов задавался в виде смеси из трех компонентов, распределенных по профилю подводного берегового склона с различным соотношением объемных концентраций.

Анализ результатов. Показано, что под воздействием штормового волнения происходит интенсивный размыв пляжа и активное переформирование профиля верхней части подводного берегового склона с образованием аккумулятивного тела. Основные изменения исходного профиля и перераспределение фракций наносов наблюдаются в течение первых 3–6 часов и зависят от периода волн. Получены количественные оценки скорости отступления уреза воды и величин деформации рельефа береговой зоны для различного времени воздействия волн. Рассчитано положение мористой границы участка, на котором во время шторма происходит активное перемещение значительных объемов наносов и их аккумуляция.

Обсуждение и заключение. Проанализирована возможность размыва гребня пересыпи при различных периодах ветровых волн. Показано, что изменение объемных концентраций различных компонентов смеси происходит преимущественно в результате быстрого выноса мелких фракций в мористую часть профиля дна и перераспределения более крупных фракций в верхней части подводного берегового склона. В результате косвенно определены условия блокировки вдольберегового перемещения наносов при строительстве гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: береговая зона, Западный Крым, модель *XBeach*, наносы, штормовые деформации рельефа, гранулометрический состав.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0004 «Прибрежные исследования», а также при частичной поддержке РФФИ в рамках научно-го проекта № 18-35-00230.

Для цитирования: 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

Modeling of the Coastal Zone Relief and Granulometric Composition Changes of Sediments in the Region of the Bogaily Lake Bay-Bar (the Western Crimea) during Storm

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

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russia

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

Introduction. A series of numerical experiments was carried out to study the mechanism of storm deformations of the coastal zone relief and the redistribution of different sediment fractions after the parameters of the wind waves directed almost normally to the coastline, are changed.

Data and methods. The lithodynamic processes taking place at the Western Crimea coastal zone in the region of the Lake Bogaily bay-bar were investigated using the XBeach mathematical model. The *in-situ* data on the bottom relief and the sediments granulometric composition obtained during monitoring observations in the Western Crimea coastal zone performed by the Marine Hydrophysical Institute of RAS was used as the model input parameters. The granulometric composition was preset as a mixture of three components distributed along the profile of the underwater coastal slope; at that the ratios of volume concentrations were different.

Results. It is shown that influence of the storm waves results in intensive beach erosion, strong alteration of the profile of the underwater coastal slope upper part and formation of an accumulative body. Main changes of the initial profile and redistribution of the sediment fractions are observed during the first 3–6 hours and depend on the wave period. The rate of the water edge retreat and the values of the coastal zone relief deformation were quantitatively assessed for various time periods of the wave action. Position of the marine boundary of the site within which significant motion of sediments and their accumulation during a storm took place was calculated.

Discussion and conclusion. Possibility of the bay-bar crest erosion is analyzed for the wind wave' different periods. It is shown that the volume concentrations of different components of the mixture change mainly after the fine fractions are rapidly removed to the seaward part of the bottom profile and the coarser fractions are redistributed in the upper part of the underwater coastal slope. The obtained results provide a possibility of indirect determining the conditions for blocking the alongshore sediments transport in case of building a hydraulic structure.

Keywords: coastal zone, Western Crimea, model XBeach, bottom sediments, relief storm deformation, granulometric composition.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme No. 0827-2018-0004 "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 project No. 18-35-00230.

For citation: Gurov, K.I., Udovik, V.F. and Fomin, V.V. Modeling of the Coastal Zone Relief and Granulometric Composition Changes of Sediments in the Region of the Bogaily Lake Bay-Bar (the Western Crimea) during Storm. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 35(2), pp. 185-196. doi:10.22449/0233-7584-2019-2185-196 (in Russian).

Введение

Штормовые и сезонные изменения положения линии уреза воды и деформации рельефа дна недостаточно изучены, что создает значительные трудности при планировании различного рода мероприятий для сохранения и устойчивого развития прибрежных территорий. Неточности в оценках указанных величин зачастую приводят к разрушению объектов прибрежной инфраструктуры, жилых построек, берегозащитных и других гидротехнических сооружений. Это в значительной степени снижает инвестиционную привлекательность побережья.

Исследование региональных особенностей перестроения рельефа береговой зоны и изменений размерного состава прибрежно-морских наносов на участках побережья Западного Крыма является особенно актуальным в связи с тем, что существенно увеличились темпы освоения рекреационного потенциала данного региона.

Изучение процессов, происходящих на границе суша – море, включает проведение комплекса натуральных наблюдений, а также применение широкого спектра математических моделей и расчетных методик для прогноза развития берегов на различных пространственных и временных масштабах [1–8].

В большинстве исследований при моделировании штормовых деформаций рельефа береговой зоны используются значения крупности наносов, осредненные для всей расчетной области [9, 10]. Однако именно гранулометрический состав донных отложений во многом определяет характеристики их перемещения под воздействием волн и течений. Величины деформаций профилей пляжа и подводного берегового склона (ПБС), которые могут сохраняться в течение достаточно длительных промежутков времени, также тесно связаны с перераспределением различных фракций наносов в береговой зоне во время шторма.

Цель данной работы – исследовать локальные особенности штормовых изменений профиля береговой зоны и перераспределения различных фракций наносов на участке побережья Западного Крыма в районе пересыпи оз. Богайлы.

Ранее работы в данном направлении проводились авторами в отношении участков береговой зоны Западного Крыма в районе пгт. Николаевка [11] и северного сектора пересыпи оз. Сасык [12].

Характеристика района исследований. Пересыпь оз. Богайлы расположена в северном секторе абразионного участка берега Западного Крыма, простирающегося от Севастополя до южной границы оз. Кизил-Яр [13]. Длина пересыпи – около 1300 м, ширина — 55–60 м, высота гребня над средним уровнем моря – от 2 до 2,5 м. В морской части пересыпи рельеф пляжа и подводного склона достаточно однороден, изобаты расположены почти параллельно береговой черте. Ширина зоны наиболее активной волновой переработки пляжевого материала составляет от 35 до 40 м и отчетливо выделяется по границе растительного покрова. Поверхность гребня осложнена остаточными понижениями рельефа на 40–60 см в местах перелива морской воды через вершину берегового вала во время сильных штормов, сопровождающихся нагонными явлениями.

С севера и с юга к пересыпи примыкают участки коренного берега, представленные активно разрушающимися клифами высотой 10–12 м. Существующие здесь прислоненные пляжи неполного профиля имеют ширину до 12–15 м, что явно недостаточно для защиты клифов от волновой абразии. В результате клифы, а вместе с ними и береговая линия, на данном участке побережья активно отступают. На основе данных мониторинговых исследований Морского гидрофизического института РАН (МГИ РАН) и результатов, полученных в работах [14, с. 44; 15], в качестве наиболее достоверной оценки средней скорости отступления берега в районе оз. Богайлы можно принимать значения 0,5–1 м/год.

Клифы сложены преимущественно бурыми глинами и содержат незначительное количество (от 2 до 16%) частиц песчаной и более крупных фракций, которые могут осуществлять подпитку местных пляжей при разрушении береговых обрывов [13, 16]. Недостаточное поступление материала из местных источников приводит к тому, что основное питание аккумулятивных форм рельефа на данном участке береговой зоны происходит в результате вдольберегового перемещения наносов средним потоком, направленным с юга на север. С точки зрения теории формирования среднего потока, представляющего собой сумму единичных штормовых подвижек и миграций обломочного материала за длительный период времени, данный участок побережья можно отнести к зоне транзита наносов в рамках литодинамической системы Каламитского залива [13, 17–19]. Таким образом, основные изменения рельефа береговой зоны на данном участке побережья происходят преимущественно под воздействием штормовых волн, имеющих направление, близкое к нормали по отношению к береговой линии.

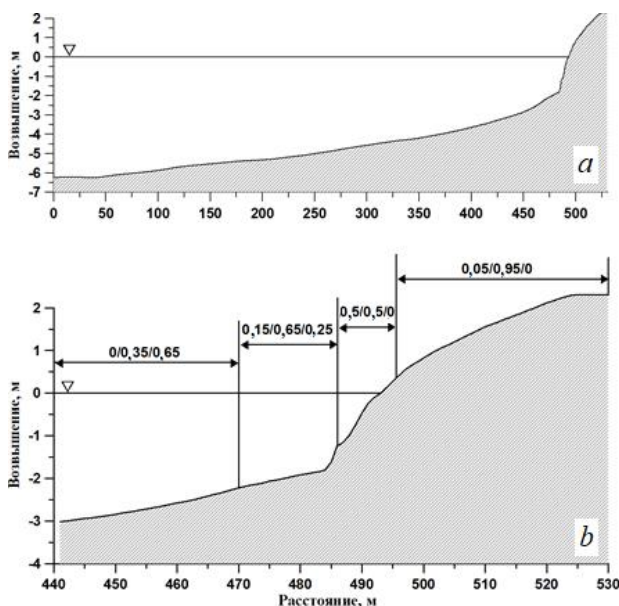
Результаты гранулометрического анализа показали, что основные изменения размерного состава наносов наблюдаются в приурезовой полосе пляжа и в верхней части ПБС, ограниченной изобатами 1,0–1,5 м. В узкой полосе, расположенной непосредственно возле уреза воды, преобладает крупно- и среднезернистый песок с примесью мелкозернистого гравия. С увеличением глубины доля крупнозернистого материала сокращается, а глубже 2,5 м он полностью отсутствует. В диапазоне глубин от 2,0–2,5 до 4 м в пробах преобладает алеврито-пелитовая смесь с незначительными включениями мелкозернистого песка *. Анализ величин основных параметров ветрового волнения основан на результатах, представленных в работах [20–22].

В работе [21] показано, что в акватории Каламитского залива средние высоты штормовых волн достигают 2 м и более при юго-западном и западном ветрах, которые и являются особо опасными для исследуемого региона. Согласно результатам, полученным в работе [20] для юго-западного и западного направлений ветра, значения среднего периода волны изменяются от 6 с при ветре скоростью 5–10 м/с до 7–8 с при ветре 15–20 м/с. Для штормового западного ветра (> 20 м/с) значение периода достигает 9 с и выше. В работе [22] показано, что в Каламитском заливе раз в 10 лет наблюдаются волны с периодом 8–9 с, раз в 50–100 лет – с периодом 10 с.

Математическая модель и входные данные. Штормовые деформации профиля береговой зоны и перераспределение различных фракций прибрежно-морских наносов исследовались с использованием комплексной численной модели *XBeach* [23]. Начало координат располагалось в мористой части расчетной области, ось x направлена к берегу, ось y – вдоль береговой линии. Учитывая однородность рельефа и распределения наносов во вдольбереговом направлении, реализован 1D вариант модели.

* Гуров К. И., Фомин В. В., Удовик В. Ф. Моделирование штормовых изменений рельефа дна и гранулометрического состава донных отложений на участке береговой зоны Крымского полуострова // Моря России: наука, безопасность, ресурсы: тезисы докладов научной конференции (Севастополь, 3–7 октября 2017 г.). Севастополь : ФГБУН МГИ, 2017. С. 138.

При проведении численных экспериментов использовались данные о рельефе и гранулометрическом составе наносов, полученные в ходе мониторинговых наблюдений, осуществляемых МГИ РАН. Общая длина профиля составляет 530 м. В начальный момент времени первые 493 м исходного профиля соответствуют ПБС, а остальные 37 м – пляжу и части верхней площадки на гребне пересыпи оз. Богайлы (рис. 1, *a*). Шаг расчетной сетки 1 м. Расчеты осуществлялись на период шторма продолжительностью 48 ч.



Р и с. 1. Профиль береговой зоны (*a*) и соотношение объемных концентраций компонентов смеси на участках профиля (*b*) в начальный момент времени

F i g. 1. Profile of the coastal zone (*a*) and the ratio of volume concentrations of mixture components at the profile sites (*b*) at the initial time point

Параметры ветрового волнения на мористой границе расчетной области задавались с помощью спектра *JONSWAP*: высота значительных волн $H = 2$ м; пиковый период волн $T = 6; 8$ и 10 с; параметр пиковатости спектра принимался равным $3,3$; показатель степени углового рассеивания волн $l = 10$. Остальные настройки модели принимались по умолчанию, за исключением параметра *avalanching* [23], для которого использовались следующие значения: $dryslp = 0,1$; $wetslp = 0,1$.

Состав наносов задавался в виде смеси из трех компонентов (мелкий гравий и крупнозернистый песок, среднезернистый песок, мелкозернистый песок). В табл. 1 приведены используемые в качестве входных параметров в модели *XBeach* значения медианного диаметра $D50$ и величин $D15$ и $D90$ [23], полученные при построении кумулятивной кривой для каждой фракции по результатам гранулометрического анализа проб грунта*.

* Пармузина Л. В. Гранулометрический анализ песчано-алевритовых пород: метод. указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Литология природных резервуаров нефти и газа» для специальности 130304 – «Геология нефти и газа». Ухта : УГТУ, 2011. 23 с.

Т а б л и ц а 1
Table 1

Гранулометрические характеристики фракций наносов
Granulometric characteristics of the sediments fractions

Фракция / Fraction	D_{90} , мм / D_{90} , mm	D_{50} , мм / D_{50} , mm	D_{15} , мм / D_{15} , mm
Мелкий гравий и крупный песок / Fine gravel and coarse sand	1,5	0,800	0,65
Средний песок / Medium sand	0,5	0,375	0,25
Мелкий песок / Fine sand	0,2	0,150	0,10

Количество вещества отдельной фракции в смеси выражено в объемных концентрациях, соответствующих долевого содержанию данного материала в единичном объеме. В начальный момент времени распределение соотношений объемных концентраций на различных участках профиля (рис. 1, *b*) задавалось на основе результатов натурных наблюдений и показано до глубины 3 м, так как в мористой части профиля данный входной параметр модели не изменяется.

Результаты моделирования и обсуждение. В природных условиях в результате стремления к формированию квазиравновесного профиля и оптимального распределения фракций наносов по крупности при данных характеристиках волнового воздействия в береговой зоне происходит достаточно быстрая взаимная подстройка гидродинамических и литодинамических процессов. Результаты моделирования также показали, что переформирование профиля береговой зоны и перераспределение фракций наносов начинаются сразу после начала волнового воздействия и наиболее интенсивно происходят в течение первых 3–6 часов. При этом максимальные изменения величин прослеживаются в течение первого часа расчетного времени. В случае применения модельных результатов к реальным условиям следует учитывать, что используемая постановка задачи предполагает существование волны высотой 2 м уже в начальный момент времени. Следовательно, максимальные изменения рассчитанных значений, получаемые после первого часа воздействия волн в модели, более корректно интерпретировать как произошедшие на этапе возрастания высоты волны от 0 до 2 м, продолжительность которого может изменяться.

Результаты моделирования показывают, что в приурезовой полосе профиль изменяется вследствие размыва пляжа с образованием достаточно пологого склона (рис. 2, *a*). Материал перемещается в мористую часть профиля, где образуется аккумулятивная форма. По мере воздействия штормового волнения данная форма выдвигается в сторону моря, затем положение ее мористой границы стабилизируется на расстоянии 50–55 м от текущего положения уреза воды. Данное расстояние характеризует ширину полосы перемещения значительных объемов песка по нормали к берегу при заданных па-

раметрах волн и косвенно определяет границу блокировки вдольберегового перемещения наносов при строительстве гидротехнических сооружений.

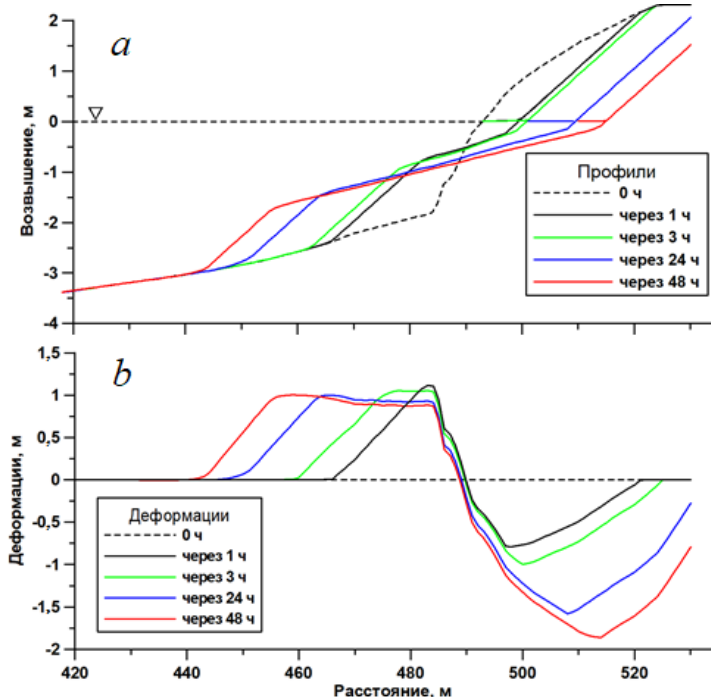


Рис. 2. Изменение профиля береговой зоны (a) и величины его деформации (b) при $H = 2$ м, $T = 8$ с

Fig. 2. Change of the coastal zone profile (a) and the value of its deformation (b) at $H = 2$ m, $T = 8$ s

В зоне активной переработки профиля происходит сглаживание мелко-масштабных неоднородностей рельефа и по уклонам поверхности β можно выделить три характерных участка. С изменением периода волн уклоны для каждого участка изменяются в незначительных пределах. Первый участок ($0,093 < \beta < 0,102$) соответствует поверхности пляжа в зоне наката волн. Его положение определяется смещением линии уреза и шириной зоны переработки пляжа. Второй участок ($0,027 < \beta < 0,040$) расположен на ПБС в зоне разрушения волн и их наиболее активного воздействия на поверхность дна. Его положение определяется смещением линии уреза и мористой границы аккумулятивного тела, формирующегося в результате перемещения наносов от берега. Третий участок ($\beta = 0,1$) расположен на ПБС в мористой части аккумулятивного тела и имеет наиболее стабильные уклоны дна. Его положение определяется мористой границей второго участка и положением границы области, где волновая переработка профиля не происходит.

Результаты анализа всей серии расчетов показали: с увеличением периода волн количество перемещаемых наносов возрастает, что приводит к увеличению изменений профиля. В результате полоса переформирования рельефа дна расширяется, граница размыва пляжа сдвигается в сторону берега, а абсолютные величины деформаций возрастают как в зоне размыва, так

и в зоне аккумуляции материала *. Через 24 ч воздействия волн при $T = 8$ с (рис. 2, *b*) толщина слоя размыва песка на пляже может достигать 1,5 м, а уменьшение глубин в районе образования на ПБС аккумулятивного тела составляет около 1 м.

Скорость отступления линии уреза воды изменяется во время шторма (табл. 2). Наибольшие расчетные значения отмечаются после первого часа воздействия модельных волн. В дальнейшем, по мере формирования квазиравновесного профиля, скорость смещения плавно уменьшается до значений менее 0,2 м/ч. Через 48 ч штормового воздействия линия уреза воды смещается на расстояние от 16 м при $T = 6$ с до 28 м при $T = 10$ с.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Скорость отступления линии уреза воды (м/ч)
Rate of the water edge retreat (m/h)

$T, c /$ T, s	Время воздействия волн, ч / Time of wave action, h												
	1	2	3	4	5	6	12	18	24	30	36	42	48
6	5,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,20	0,17	0,17	0,10	0	0
8	6,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,50	0,33	0,25	0,20	0,20	0,20	0
10	7,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,50	0,33	0,33	0,33	0,25	0,25	0,2

Анализ динамики верхней границы размыва пляжа показал, что время, за которое волновое воздействие достигает вершины вала, составляет 6 ч при $T = 6$ с, 3 ч при $T = 8$ с и 2 ч при $T = 10$ с. В результате при ширине горизонтальной части гребня пересыпи 5 м волнение с периодом $T = 6$ с не приводит к ее размыву даже через 48 ч. При $T = 8$ с может начаться деформация горизонтальной части гребня пересыпи. При $T = 10$ с полоса размыва пляжа достигает гребня пересыпи уже через 2 ч, через 24 ч наблюдается ее размыв и понижение высоты на 0,7 м, а через 48 ч – на 1,3 м.

Изменения гранулометрического состава происходят следующим образом. Во всех численных экспериментах отмечается перераспределение более крупных частиц возле берега и одновременно перемещение более мелких частиц в мористую часть.

Для крупнозернистого материала, первоначально сконцентрированного возле линии уреза, отмечается значительное уменьшение объемной концентрации от 0,5 до 0,1, а в примыкающей зоне ПБС – от 0,15 до 0,1. Одна часть материала смещается к берегу вслед за отступающей линией уреза, другая перемещается в сторону моря на незначительное расстояние (рис. 3, *a*). С увеличением продолжительности шторма полоса распространения крупнозернистого материала расширяется. С ростом периода волн максимальная ширина зоны его перераспределения также увеличивается и составляет около 60 м при $T = 6$ с, 75 м при $T = 8$ с и 85 м при $T = 10$ с.

* Гуров К. И., Фомин В. В., Удовик В. Ф. Моделирование штормовых изменений рельефа дна и гранулометрического состава донных отложений на участке береговой зоны Крымского полуострова // Моря России: наука, безопасность, ресурсы. С. 139.

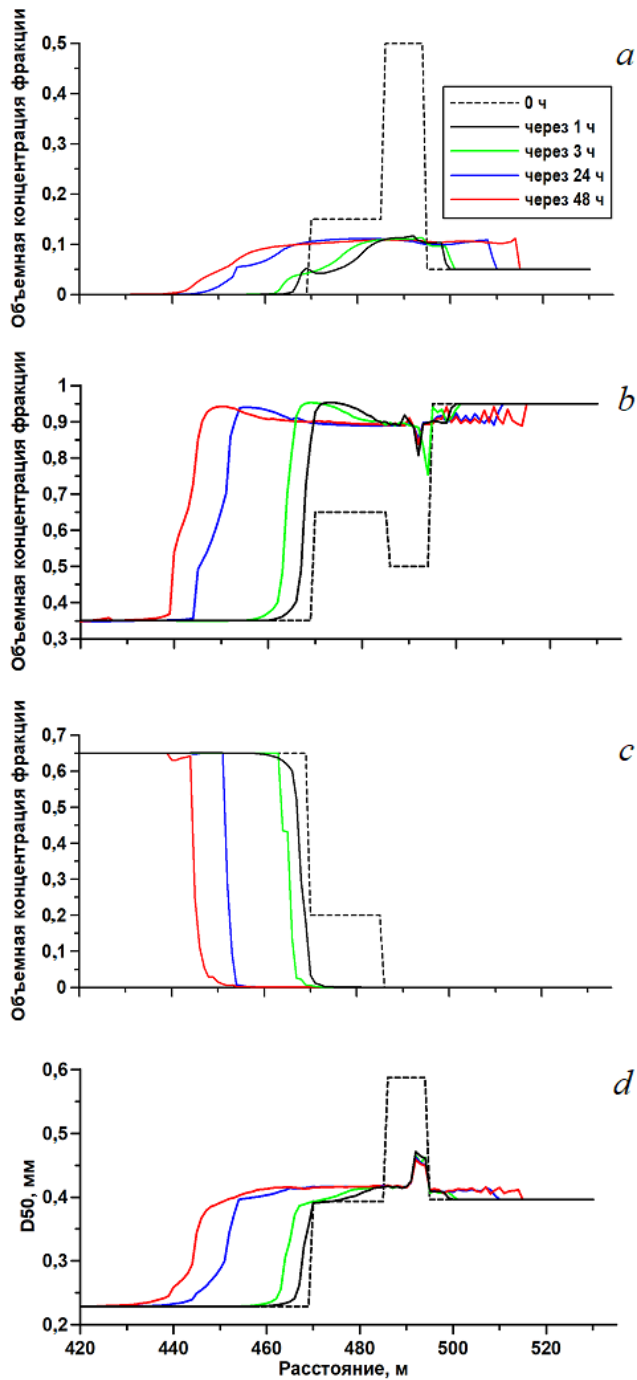


Рис. 3. Изменения объемных концентраций различных фракций: крупнозернистой (*a*); среднезернистой (*b*); мелкозернистой (*c*) и медианного диаметра (D_{50}), рассчитанного для смеси фракций (*d*) при $H = 2$ м; $T = 8$ с

Fig. 3. Variation of volume concentrations of different fractions: the coarse- (*a*), medium- (*b*) and fine- (*c*) grain ones, and that of the median diameter (D_{50}) calculated for the fraction mixture (*d*) at $H = 2$ m, $T = 8$ s

Наблюдаемое увеличение доли среднезернистого песка в смеси (рис. 3, *b*) происходит главным образом вследствие сокращения количества мелкозернистой фракции (рис. 3, *c*). По мере увеличения продолжительности шторма граница больших концентраций среднезернистого материала смещается преимущественно в мористую часть профиля. После 24 ч волнового воздействия основные изменения объемных концентраций среднезернистого материала отмечаются в пределах 40–50-метровой полосы.

Мелкозернистый материал уже в первые часы штормового воздействия полностью перемещается в мористую часть профиля, где величина объемной концентрации данной фракции не изменяется в течение всего времени расчетов (рис. 3, *c*). Положение границы области распространения мелкозернистой фракции смещается в сторону моря с увеличением периода волны.

В результате перемещения отдельных фракций наносов изменяется распределение медианного диаметра частиц всей смеси (параметра $D50$, рассчитываемого в модели *XBeach*) (рис. 3, *d*). В приурезовой полосе отмечается уменьшение его значения, что обусловлено замещением крупнозернистого материала среднезернистым песком. В свою очередь, в зоне положительных деформаций профиля дна параметр $D50$ смеси увеличивается за счет роста доли среднезернистого песка и выноса мелкой фракции в мористую часть профиля. Резкое уменьшение среднего для смеси значения $D50$ при удалении от берега соответствует зоне перехода к области накопления исключительно мелкозернистого материала.

Выводы

Анализ результатов численного моделирования позволил сделать следующие выводы.

Деформации исходного профиля береговой зоны и перераспределение всех фракций наносов начинаются сразу после начала штормового воздействия и наиболее интенсивно происходят в течение первых 3–6 часов в зависимости от периода волн. Основные изменения рельефа отмечаются в полосе пляжа, где наблюдается размыв пересыпи, и в верхней части ПБС, где формируется аккумулятивное тело. В результате в зоне активного перестроения профиля отчетливо выделяются три характерных участка с различными уклонами. С увеличением периода волн растет количество перемещаемого материала, вследствие чего увеличивается ширина полосы изменения рельефа береговой зоны и возрастают абсолютные деформации профиля. Максимальные скорости волновой абразии мористого склона пересыпи и скорости отступления береговой линии, которые отмечаются в начале шторма, постепенно уменьшаются по мере формирования квазиравновесного профиля. При увеличении периода волн интенсифицируется процесс размыва, что может приводить к разрушению гребня пересыпи и уменьшению его высоты.

Во всех численных экспериментах наблюдается активное перераспределение более крупных фракций в верхней части ПБС и однонаправленное перемещение мелких частиц в сторону моря. Основные изменения объемных концентраций отдельных фракций наносов и медианного диаметра частиц смеси происходят в приурезовой полосе подводной части профиля, береговая граница которой определяется смещением линии уреза воды. Аккумулятив-

ная форма во время шторма в верхней части подводного склона образуется преимущественно в результате перемещения среднезернистого песка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анциферов С. М., Косьян Р. Д.* Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М. : Наука, 1986. 223 с.
2. *Леонтьев И. О.* Бюджет наносов и прогноз развития морского берега // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 3. С. 467–476.
3. *Леонтьев И. О.* Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 5. С. 757–767.
4. Прогноз рецессии берегов восточной части Финского залива на ближайшее столетие / И. О. Леонтьев [и др.] // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 3. С. 480–487. doi:10.7868/S0030157415030107
5. *Кузнецова О. А., Сапрыкина Я. В.* Внутригодовые вариации штормовых деформаций рельефа дна песчаного побережья на примере Камчийско-Шкорпиловского пляжа (Черное море, Болгария) // *Процессы в геосредах*. 2017. № 1 (10). С. 435–444.
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. Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit) / N. Bugajny [et al.] // *Journal of Coastal Research*. 2013. Vol. 65, iss. sp1. P. 672–678. <https://doi.org/10.2112/SI65-114.1>
8. *Williams J. J., Esteves L. S., Rochford L. A.* Modelling storm responses on a high-energy coastline with XBeach // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2015. Vol. 1, iss. 1–2. Article 3. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0003-8>
9. *Леонтьев И. О.* О некоторых свойствах процесса формирования штормового профиля песчаного берега // *Процессы в геосредах*. 2015. № 2. С. 75–82.
10. *Корзинин Д. В.* Особенности формирования профиля равновесия подводного берегового склона (на примере аккумулятивных берегов Западного Крыма) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. Вып. 1. С. 29–33.
11. *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.
12. Dynamics of the nearshore zone of Kalamitskiy Gulf (Black Sea) under influence of wind waves / V. V. Fomin [et al.] // *Managing risks to coastal regions and communities in a changing world*. Academus Publishing. 2019. P. 1–1. URL: https://seacoasts.editorum.io/en/nauka/conference_article/1783/view (date of access: 04.05.2018).
13. *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Т. 2. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 216 с.
14. Атлас охраны природы Черного и Азовского морей / Гл. ред. Л. И. Митин. СПб. : ГУНиО, 2006. 436 с.
15. Современное состояние береговой зоны Крыма / Под ред. Ю. Н. Горячкина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. 249 с.
16. *Шуйский Ю. Д.* Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского полуострова // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 370–385.
17. *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.

18. *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.
19. *Удовик В. Ф., Горячкин Ю. Н.* Оценки межгодовой изменчивости вдольберегового транспорта наносов на участке береговой зоны от Севастополя до Евпатории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. № 1. С. 54–65.
20. Атлас волнения и ветра Черного моря / [под ред. Г. В. Ржеплинского]. Л. : Гидрометеопиздат, 1969. 111 с.
21. Типовые поля ветра и волнения Черного моря / Ред. Э. Н. Альтман, Г. В. Матушевский. Севастополь : ФОЛ СО ГОИН, 1987. 116 с.
22. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 59 с.
23. XBeach model description and manual : report / D. J. A. Roelvink [et al.] ; UNESCO-IHE Institute for Water Education. Deltares, Delft : Deltares and Delft Univ. Technology, 2010. 106 p.

Об авторах:

Гуров Константин Игоревич, старший инженер-исследователь, отдел биогеохимии моря, ФГБУН 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, старший научный сотрудник, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6992-2688**, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, **ResearcherID: H-8185-2015**, v.fomin@ukr.net

Удовик Владимир Федорович, младший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), udovik_uvfv@mhi-gas.ru