

Особенности ветрового волнения в Балаклавской бухте в экстремальных ветровых условиях

В. В. Фомин, А. А. Полозок*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: polozok.umi@gmail.com*

Поступила: 14.01.2021 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Ветровое волнение в бухтах и гаванях оказывает значительное влияние на безопасность мореплавания и эксплуатацию объектов прибрежной инфраструктуры. Цель настоящей работы – исследование характеристик ветрового волнения в Балаклавской бухте (п-ов Крым) в разных ветровых условиях. Исследование выполнено на основе численной спектральной модели волнения *SWAN* с использованием последовательности вложенных сеток. Конкретные расчеты волнения в бухте проводятся для постоянного ветра разных направлений и для экстремальной штормовой ситуации, возникшей в Черном море в ноябре 2007 г. Установлено, что в южной части бухты наиболее интенсивное волнение формируется при ветрах южного направления. На входе в бухту при скоростях ветра, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, максимальные значения высоты значительных волн h_s достигают 3 и 5.4 м соответственно. В северной части бухты максимальные значения h_s при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 0.25 и 0.46 м. Выявлено, что проникающее в южную часть бухты штормовое волнение быстро затухает по мере распространения через узость в северную часть бухты. Таким образом, определяющим фактором, влияющим на интенсивность волнения в северной части бухты, является поле ветра над этой частью бухты.

Ключевые слова: Черное море, Балаклавская бухта, ветровое волнение, математическое моделирование, *SWAN*, вложенные сетки.

Благодарности: Волновые характеристики Балаклавской бухты исследовались в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования». Технология моделирования ветрового волнения на основе метода вложенных сеток реализована в рамках проекта РФФИ № 18-05-80035.

Для цитирования: Фомин В. В., Полозок А. А. Особенности ветрового волнения в Балаклавской бухте в экстремальных ветровых условиях // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-5-22

© Фомин В. В., Полозок А. А., 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

Wind Waves in the Balaklava Bay under Extreme Wind Conditions

V. V. Fomin, A. A. Polozok*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
**e-mail: polozok.umi@gmail.com*

Submitted 14.01.2021; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

Wind waves in bays and harbors have a significant impact on the safety of navigation and operation of the coastal infrastructure. The purpose of this work is to study the characteristics of wind waves in the Balaklava Bay (Crimean Peninsula) under different wind conditions. The study was carried out on the basis of a numerical spectral SWAN wave model using a sequence of nested grids. Specific calculations of waves in the Balaklava Bay are carried out for constant winds of different directions and for an extreme storm emerged in the Black Sea in November 2007. It was found that in the southern part of the bay the most intense waves are formed with southerly winds. At the bay entrance, at wind speeds, which can occur once a year and once every 25 years, the maximum values of the significant wave height h_s amount to 3 and 5.4 m, respectively. In the northern part of the bay, the maximum values h_s with winds, which can occur once a year and once every 25 years, respectively, are equal to 0.25 and 0.46 m. It was defined that the storm waves penetrating into the southern part of the bay quickly attenuate as they spread through the narrowness to the northern part of the bay. Thus, the local wind field is the determining factor affecting the intensity of waves in the northern part of the Balaklava Bay.

Keywords: Black Sea, Balaklava Bay, wind waves, mathematical modeling, SWAN, nested grids.

Acknowledgments: Wave characteristics of the Balaklava Bay were studied as part of topic no. 0555-2021-0005 “Coastal studies” of the Marine Hydrophysical Institute of RAS. The technology of wind wave modelling based on the nested grid method is implemented as part of the RFBR project no. 18-05-80035.

For citation: Fomin, V.V. and Polozok, A.A., 2021. Wind Waves in the Balaklava Bay under Extreme Wind Conditions. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-5-22 (in Russian).

Введение

Балаклавская бухта – узкий извилистый залив эстуарного типа в юго-западной части Крымского п-ова протяженностью около 1.5 км. Бухта представляет собой естественную гавань, оснащенную плавучими причальными сооружениями для маломерных судов (рис. 1). Обзор современных океанологических исследований Балаклавской бухты представлен в работах [1–4]. Можно констатировать, что большая часть этих исследований имеет экологическую и биогеохимическую направленность.

С практической точки зрения ветровое волнение – наиболее значимый фактор, влияющий на безопасность судоходства в Балаклавской бухте и прилегающей акватории Черного моря. При этом существует только одна работа [5], посвященная изучению волнового режима на взморье бухты.

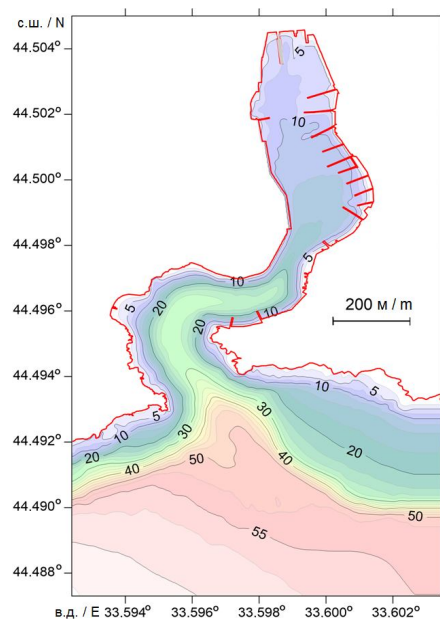


Рис. 1. Рельеф дна и расположение плавучих причальных сооружений в Балаклавской бухте

Fig. 1. Seabed relief and position of floating docks in the Balaklava Bay

В этой работе для оценки режимных характеристик волнения использовались данные ретроспективных расчетов волнения в Черном море за 1979–2019 гг. по спектральной волновой модели *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*)¹. В качестве форсинга для *SWAN* применялись поля приземного ветра из глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5* (URL: apps.ecmwf.int). На основе статистической обработки результатов модельных расчетов полу-

чены данные о повторяемости элементов волн, длительности штормовых и штилевых ситуаций, экстремальных характеристиках волнения на входе в Балаклавскую бухту.

Настоящая статья является продолжением работы [5] и ставит своей целью исследование особенностей волнообразования непосредственно в самой Балаклавской бухте при различных ветровых воздействиях. Для этого используется модель волнения *SWAN* на нескольких вложенных сетках. Конкретные расчеты волнения в бухте проводятся для постоянного ветра разных направлений и для экстремальной штормовой ситуации у Крымского побережья, имевшей место в ноябре 2007 г.

Учитывая особенности распределения глубин и конфигурации берегов, акваторию Балаклавской бухты можно условно разделить на северную мелководную часть, южную глубоководную часть и зонально-ориентированную узость, соединяющую северную и южную части бухты. Такая конфигурация бухты создает естественную защиту ее северной части, в которой располагаются основные стоянки судов, от штормового волнения (рис. 1). Оценка эффективности этой защиты и является одной из основных задач работы. Эта задача имеет большое прикладное значение в связи с проектированием в Балаклавской бухте яхтенной марины.

Волновая модель

Для моделирования ветрового волнения в Балаклавской бухте использовалась спектральная модель *SWAN*, основанная на численном решении уравнения баланса волновой энергии вида [6]

¹ SWAN user manual. SWAN Cycle III version 41.31A. Delft : Delft University of Technology, 2020. 135 p. URL: swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swanuse.pdf (date of access: 21.02.2021).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = S/\sigma, \quad (1)$$

где $N = E/\sigma$ – плотность волнового действия; E – энергетический спектр; x, y, t – пространственные координаты и время; σ, θ – частотная и угловая координаты; $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ – скорости переноса вдоль пространственных и частотно-угловых координат; $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$ – источники и стоки волновой энергии; S_{in} – энергоснабжение волн ветром; S_{nl} – перераспределение энергии, вызванное нелинейным взаимодействием спектральных гармоник; S_{wc} – диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней; S_{bf} – диссипация энергии в результате донного трения; S_{dib} – энергия обрушения волн на критических глубинах. Детали параметризации отдельных слагаемых в правой части уравнения (1) изложены в работе [6].

Следует отметить, что инструментальных наблюдений за волнением в Балаклавской бухте никогда не проводилось. Синхронные измерения ветра и волнения выполнялись в Каркинитском заливе на морской стационарной платформе. Здесь в 1996–2001 гг. функционировал автоматизированный измерительный комплекс. В работе [7] приведены результаты сравнения измеренных и рассчитанных по модели *SWAN* значений высот волн. Были получены следующие статистические характеристики: коэффициент корреляции $r = 0.84$; смещение $bias = -0.09$ м. При этом индекс согласия (*index of agreement*) был высоким (0.9) [8]. В этих расчетах для параметризации донного трения использовались соотношения теории Гранта – Мадсена [9] с параметром шероховатости $z_b = 0.01$ м. Другие параметры модели *SWAN* были выбраны по умолчанию. В настоящей работе использовалась конфигурация *SWAN* из работы [7].

Основной технологической проблемой при моделировании волнения в прибрежных районах является правильное задание характеристик волн, приходящих из открытого моря. Чтобы преодолеть эту проблему, в *SWAN* обычно используются неструктурированные сетки со сгущением в прибрежной зоне [10–13] или прямоугольные вложенные сетки [14–17]. В настоящей работе применяется семь вложенных прямоугольных сеток. Геометрия расчетных областей и последовательность их использования показана на рис. 2. На шаге 1 моделировались поля волнения во всем Черноморском бассейне (область А1) на сетке с разрешением 4.5×4.5 км (246×160 узлов). На шаге 2 на сетке $\sim 800 \times 1120$ м (234×122 узла) волнение рассчитывалось для области, включающей район Южного берега Крыма (область А2). На шаге 3 с разрешением $\sim 45 \times 65$ м (481×241 узел) рассчитывались поля волнения в районе м. Форос – м. Фиолент (область А3). На шаге 4 с разрешением $\sim 16 \times 25$ м (500×500 узлов) рассчитывались поля волнения в районе м. Айя – м. Кая-Баш (область А4). На шаге 5 с разрешением $\sim 13 \times 13$ м (500×500 узлов) рассчитывались поля волнения в районе Золотой пляж – м. Кая-Баш (область А5). На шаге 6 с разрешением $\sim 5 \times 5$ м (500×500 узлов) рассчитывались поля волнения в области А6. На шаге 7 с разрешением $\sim 1.8 \times 3$ м (450×700 узлов) рассчитывались поля волнения в Балаклавской

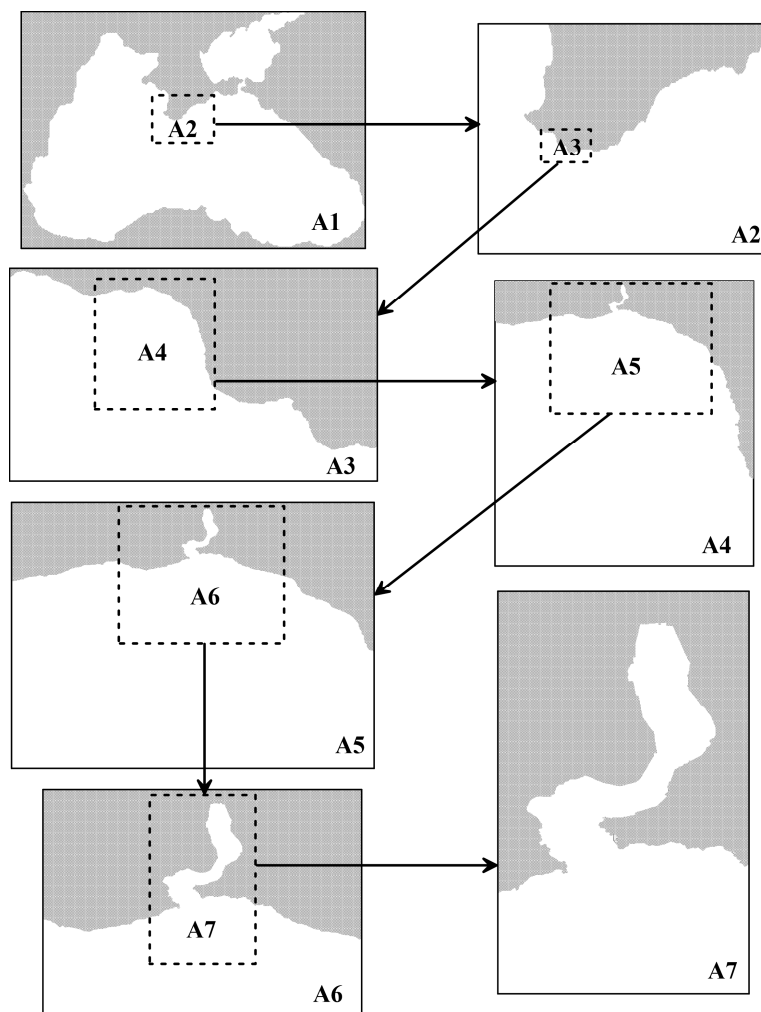


Рис. 2. Схема расчетных областей, используемых при численном моделировании ветрового волнения в Балаклавской бухте. Стрелками показана последовательность определения волновых полей с помощью модели *SWAN*

Fig. 2. Chart of computational domains used at computational simulation of wind waves in the Balaklava Bay. The arrows show sequence of wave field definition using *SWAN* model

бухте (область A7). Для построения расчетных сеток использовались навигационные карты и промеры глубин в бухте.

Угловое разрешение модели составляло 10° . По частотной координате, изменяющейся в диапазоне 0.04–2.0 Гц, использовалась неравномерная сетка с 40 узлами. Влияние плавучих причальных сооружений на волнение в бухте не учитывалось. Моделирование выполнялось на вычислительном кластере МГИ (URL: hrc-mhi.org) с применением технологии параллельных вычислений *MPI*.

Результаты моделирования

Перейдем к рассмотрению результатов численного моделирования волнения в Балаклавской бухте при разных ветровых условиях.

1. Постоянный ветер разных направлений

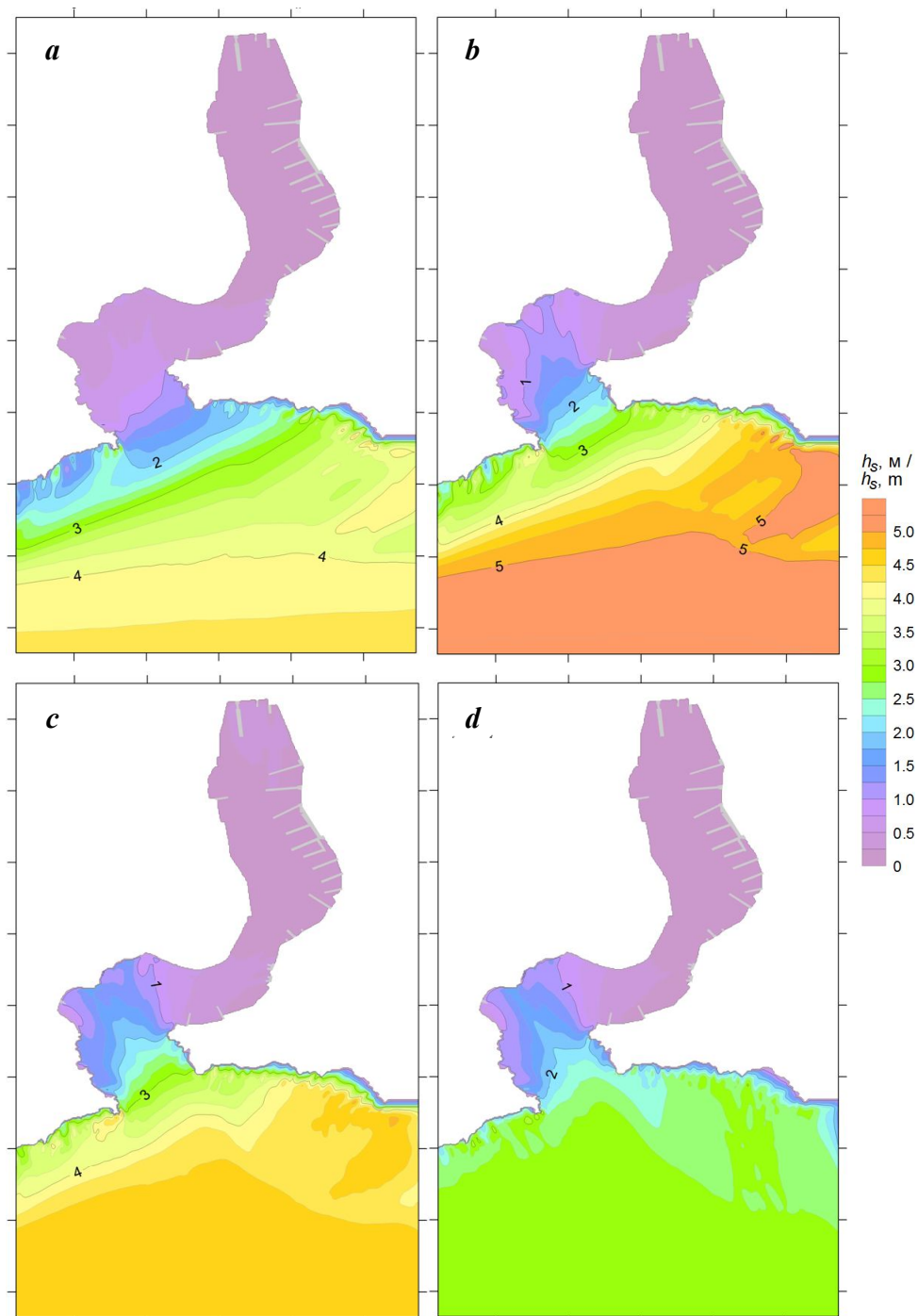
В первом цикле численных экспериментов моделировалась ситуация, когда на поверхность Черного моря воздействует не меняющийся во времени и однородный по пространству ветер заданной скорости W и направления θ_W . Рассматривалось восемь направлений приземного ветра, соответствующих основным румбам, и два значения W : $W_1 = 17.9$ м/с; $W_2 = 27.9$ м/с. Здесь W_1 и W_2 – скорость ветра, возможная 1 раз в год и 1 раз в 25 лет соответственно. Эти значения W получены по данным многолетних наблюдений на гидрометеорологической станции Севастополь на основе метода годовых максимумов [18]. Расчеты волнения выполнялись с помощью стационарного варианта модели *SWAN* ($\partial N/\partial t = 0$).

На рис. 3 показаны пространственные распределения высоты значительных волн $h_s = 4\sqrt{E}$ в Балаклавской бухте для четырех наиболее волноопасных направлений ветра (западного, юго-западного, южного и юго-восточного) при $W = W_1$. Все приведенные здесь поля имеют общие особенности: наиболее интенсивное волнение формируется в южной части бухты, в которую непосредственно проникают штормовые волны из открытого моря. В зонально-ориентированном сужении бухты интенсивность волнения резко снижается, и в северной части становится еще меньше. Максимальные волны в южной части бухты формируются при ветре южного направления, минимальные – при западном ветре. При этом на взморье наиболее интенсивное волнение возникает при юго-западном ветре, что обусловлено максимальным разгоном ветра. У берега прослеживаются локальные зоны относительного увеличения h_s . Это увеличение высот волн перед обрушением (*wave shoaling*) является следствием закона сохранения волновой энергии.

На рис. 4 приведены распределения вектора среднего направления волнения в Балаклавской бухте для четырех направлений скорости ветра, возможного 1 раз в год. Длина векторов пропорциональна высоте волн. Как видно, на взморье направление распространения волн не совпадает с направлением ветра, что связано с рефракцией, которая вызывает разворот волновых фронтов в сторону меньших глубин. Эффект рефракции штормовых волн на подходе к бухте возникает вследствие того, что длина волн существенно превышает глубину моря. Волнение подходит к бухте с юго-запада, что объясняется ориентацией изобат на взморье.

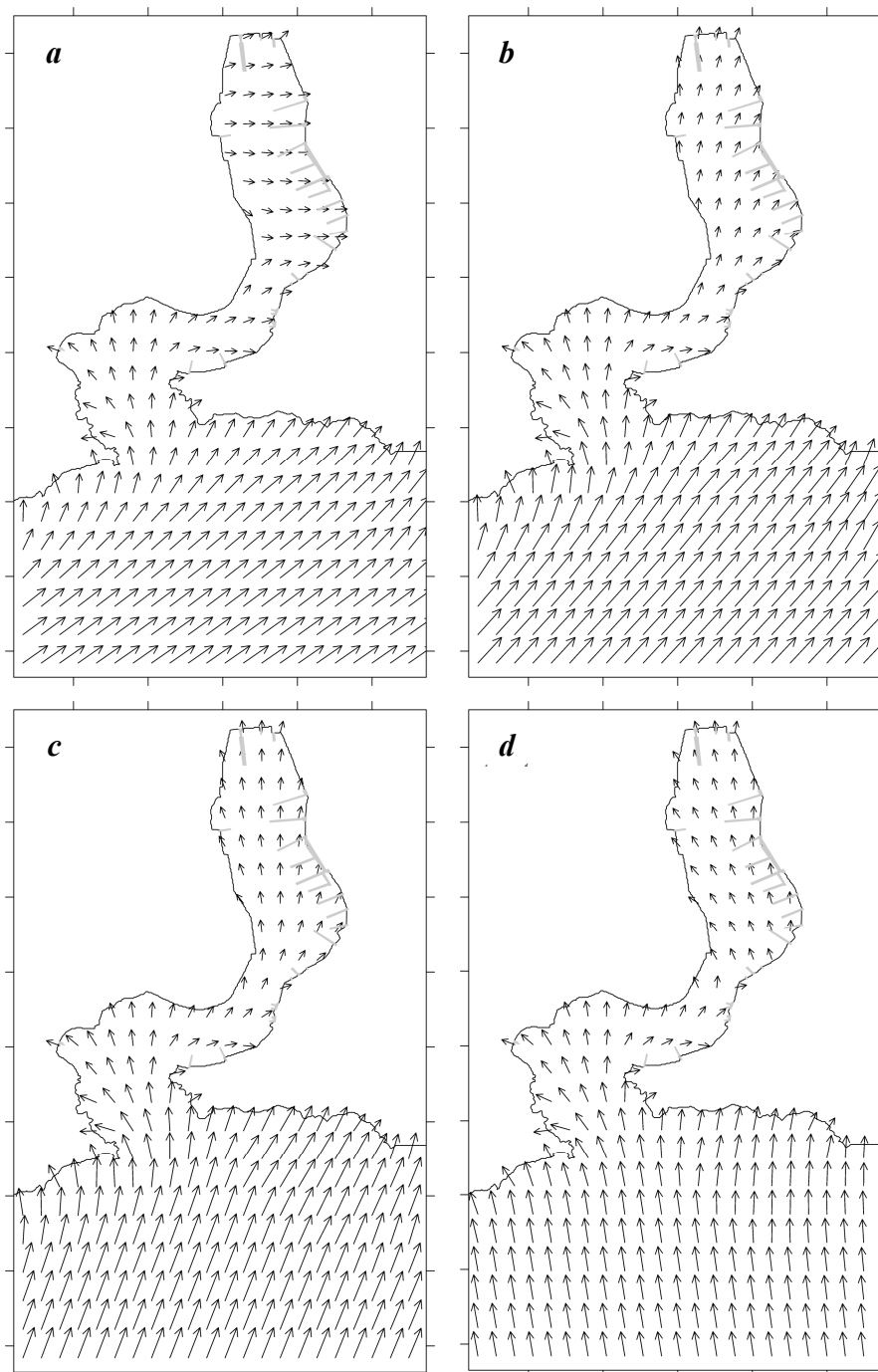
При проникновении штормовых волн в южную часть бухты направление их распространения становится веерообразным. Часть волн, повернувших направо, проникает через сужение в северную часть бухты.

В северных районах бухты среднее направление волн почти везде совпадает с генеральным направлением ветра. Это обусловлено тем, что северная часть бухты связана с южной достаточно узким проходом и, по сути, представляет собой отдельный бассейн небольших размеров, в котором под воздействием ветра формируется собственная система коротких ветровых волн.



Р и с . 3 . Высота значительных волн (м) в Балаклавской бухте для волно-опасных направлений ветра ($W = W_1$)

Fig . 3 . Significant wave height (m) in the Balaklava Bay for hazardous wave directions ($W = W_1$)



Р и с . 4. Среднее направление волнения в Балаклавской бухте при волно-опасных направлениях ветра ($W = W_1$)

Fig. 4. Mean direction of waves in the Balaklava Bay at hazardous wave directions ($W = W_1$)

Влияние рельефа дна на распространение этих волн в этой части бухты незначительно, а их высоты определяются эффективными разгонами ветра.

В табл. 1 приведены значения h_s в характерных точках акватории Балаклавской бухты при разных направлениях ветра, возможного 1 раз в год и 1 раз в 25 лет. Схема расположения и нумерация точек, в которых выводились результаты численного моделирования, показана на рис. 5.

Таблица 1. Высота значительных волн (м) в точках 1–10 акватории Балаклавской бухты (рис. 5) при разных направлениях ветра

Table 1. Significant wave height (m) at points 1–10 in the Balaklava Bay water area (fig. 5) at different wind directions

№ точки / point no.	Направление ветра / Wind direction							
	Западный / West	Юго- западный / Southwest	Южный / South	Юго- восточный / Southeast	Восточный / West	Северо- восточный / Northeast	Северный / North	Северо- западный / Northwest
при $W = W_1$ / at $W = W_1$								
1	2.83	4.18	4.35	2.85	1.47	0.45	0.30	0.80
2	1.29	2.34	3.02	2.49	1.37	0.41	0.23	0.38
3	0.69	1.47	2.14	1.99	1.20	0.38	0.23	0.25
4	0.35	0.70	1.12	1.07	0.72	0.34	0.16	0.14
5	0.52	1.02	1.27	1.14	0.73	0.25	0.18	0.21
6	0.27	0.33	0.36	0.30	0.23	0.20	0.19	0.21
7	0.20	0.24	0.23	0.20	0.17	0.21	0.22	0.19
8	0.18	0.21	0.20	0.17	0.16	0.21	0.25	0.22
9	0.15	0.18	0.22	0.21	0.17	0.19	0.22	0.20
10	0.13	0.20	0.25	0.23	0.17	0.16	0.17	0.14
при $W = W_2$ / at $W = W_1$								
1	5.55	8.33	8.64	5.80	3.40	1.19	0.57	1.58
2	2.49	4.35	5.43	4.69	2.90	1.04	0.44	0.75
3	1.40	2.67	3.57	3.47	2.31	0.90	0.43	0.49
4	0.78	1.43	1.88	1.75	1.25	0.67	0.31	0.29
5	0.90	1.59	1.92	1.77	1.20	0.52	0.33	0.39
6	0.50	0.62	0.65	0.57	0.46	0.38	0.36	0.37
7	0.35	0.43	0.43	0.35	0.32	0.38	0.42	0.32
8	0.32	0.38	0.36	0.30	0.29	0.38	0.46	0.39
9	0.29	0.33	0.41	0.39	0.32	0.35	0.42	0.37
10	0.25	0.35	0.46	0.41	0.31	0.29	0.31	0.27

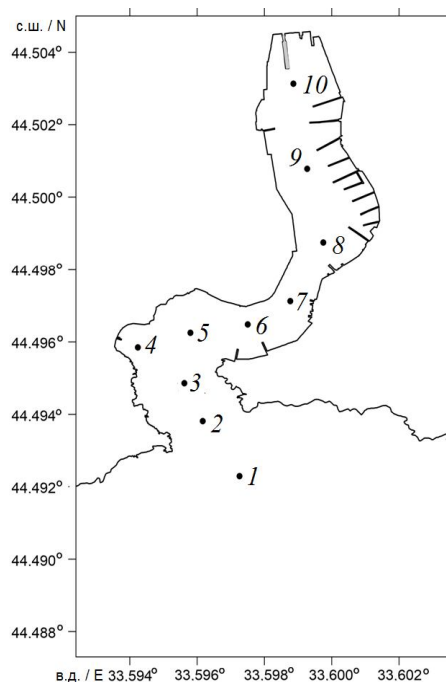


Рис. 5. Расположение и нумерация точек на акватории Балаклавской бухты, в которых изучались волновые характеристики

Fig. 5. Position and numbering of points in the Balaklava Bay water area, where wave characteristics were studied

Как видно из таблицы, на взморье (точка 1) и в южной части бухты (точки 2–3, 5) интенсивность волнения максимальна при южном и юго-западном направлениях ветра. При этом высота волн у пляжа «Мраморный» (точка 4) в значительной степени определяется разгоном ветра от восточного берега бухты. Это хорошо заметно при восточном ветре. На входе в бухту (точка 2) максимальные значения h_s при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 3.02 и 5.43 м.

Поскольку северная часть бухты имеет меридиональную ориентацию, при ветрах южных румбов здесь высота волн в северном направлении (от точки 8 к точке 10) увеличивается. Напротив, при ветрах северных румбов высота волн увеличивается в южном направлении (от точки 10 к точке 8). В северной части бухты максимальные значения h_s при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 0.25 и 0.46 м.

Приведенные выше расчеты высоты волн в Балаклавской бухте получены при предположении, что скорость и направление ветра постоянны. Эти результаты следует рассматривать как некоторые оценки сверху, обычно используемые в расчетах волновых нагрузок на гидротехнические сооружения²⁾. Реальные штормы характеризуются определенной продолжительностью, в своем развитии каждый шторм проходит обязательные стадии развития и затухания. Ниже приведен пример расчета и анализа волновых характеристик для реального шторма в районе Балаклавской бухты.

2. Экстремальный шторм 11 ноября 2007 г.

Исследовалась эволюция поля ветровых волн в Балаклавской бухте в период экстремального шторма, возникшего в ноябре 2007 г. Шторм был вызван прохождением над Азово-Черноморским бассейном глубокого атмосферного циклона, который спровоцировал сильное волнение у Южного берега Крыма и привел к ряду кораблекрушений в Керченском проливе.

В качестве атмосферного форсинга для *SWAN* использовались поля скорости и направления приземного ветра из мезомасштабной модели *SKIRON*

²⁾ СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) : Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. М., 2012. 142 с.

(URL: forecast.uoa.gr) с дискретностью по времени 2 ч и пространственным разрешением 0.1° . Применялся нестационарный вариант модели *SWAN* ($\partial N/\partial t \neq 0$). Интегрирование по времени выполнялось с нулевыми начальными данными по неявной схеме с шагом 30 мин. Период модельных расчетов составил 5 сут (9–13 ноября 2007 г.). Первые сутки использовались для разгона модели.

Графики скорости и направления ветра для точки 1 и указанного периода времени даны на рис. 6. Видно, что 10 ноября в районе Балаклавской бухты преобладал юго-восточный ветер со скоростью 10–12 м/с. В первой половине суток 11 ноября ветер стал усиливаться и изменил свое направление на западное и затем на юго-западное. При этом скорость ветра в течение 7 ч превышала значение 20 м/с, что привело к формированию интенсивного волнения на подходах к бухте и усилило волнение внутри бухты.

На рис. 7–9 приведены зависимости от времени высоты значительных волн h_s , среднего направления волнения θ и среднего периода волн τ для различных точек акватории бухты. Видно, что штормовая ситуация в районе Балаклавской бухты получила свое максимальное развитие в первой половине суток 11 ноября. При этом в южной части бухты (точки 2, 3) $\max h_s \sim 1.5\text{--}2.5$ м. В устьи, соединяющей южную и северную части бухты (точки 6, 7), значения $\max h_s \sim 0.3\text{--}0.4$ м. В северной части бухты (точки 8, 9, 10) $\max h_s \sim 0.2\text{--}0.25$ м. В целом графики высот значительных и средних периодов волн качественно соответствуют графикам скорости ветра: фазы увеличения и уменьшения скорости ветра хорошо совпадают с фазами возрастания и убывания высот волн и периодов.

Анализ зависимостей $\theta(t)$ показывает, что волнение в южной части бухты направлено с юга на север, в устьи – с запада на восток. В этих областях никакого видимого соответствия между направлением волн и направлением ветра не прослеживается. В северной части бухты, напротив, такое соответствие хорошо выражено.

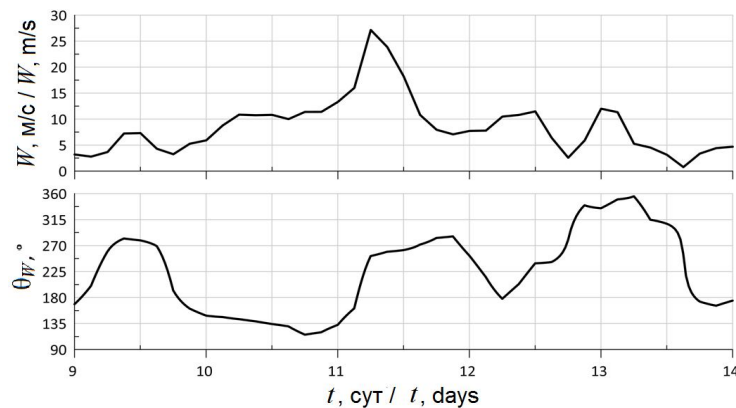


Рис. 6. Скорость W и направление θ_W ветра в точке 1 9–13 ноября 2007 г. по данным атмосферной модели

Fig. 6. Wind speed W and direction θ_W at point 1 on November 9–13, 2007, according to the atmospheric model

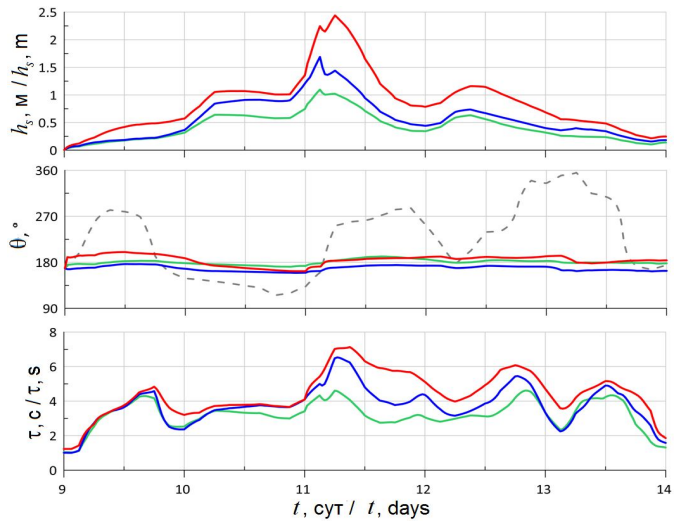


Рис. 7. Высота значительных волн h_s , среднее направление волнения θ и средний период волн τ в точках 2 (красные кривые), 3 (синие кривые) и 5 (зеленые кривые) акватории Балаклавской бухты 9–13 ноября 2007 г. Штриховая кривая – направление ветра

Fig. 7. Significant wave height h_s , mean wave direction θ and mean wave period τ at points 2 (red curves), 3 (blue curves) and 5 (green curves) in the Balaklava Bay water area on November 9–13, 2007. Dashed curve is for wind direction

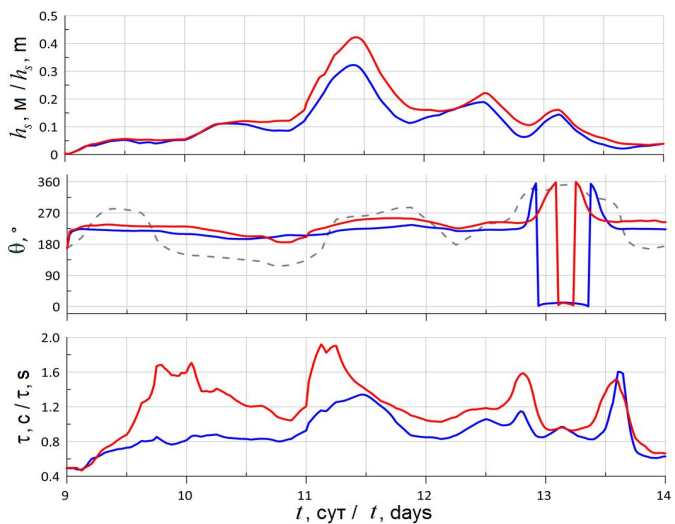


Рис. 8. Высота значительных волн h_s , среднее направление волнения θ и средний период волн τ в точках 6 (красные кривые) и 7 (синие кривые) акватории Балаклавской бухты 9–13 ноября 2007 г. Штриховая кривая – направление ветра

Fig. 8. Significant wave height h_s , mean wave direction θ and mean wave period τ at points 6 (red curves) and 7 (blue curves) in the Balaklava Bay water area on November 9–13, 2007. Dashed curve is for wind direction

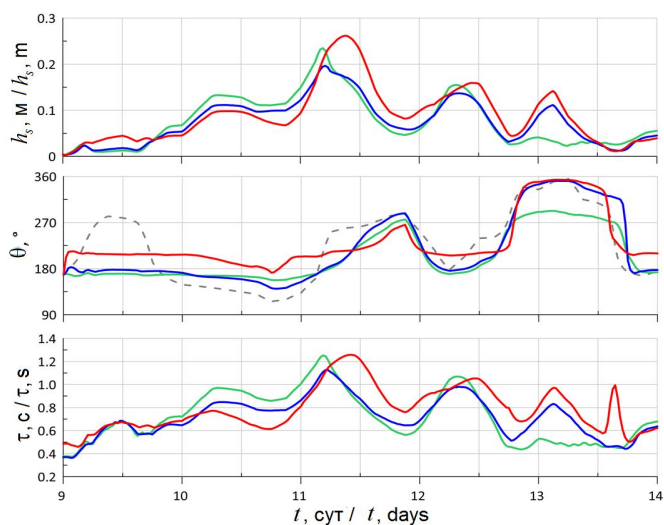


Рис. 9. Высота значительных волн h_s , среднее направление волнения θ и средний период волн τ в точках 8 (красные кривые), 9 (синие кривые) и 10 (зеленые кривые) акватории Балаклавской бухты 9–13 ноября 2007 г. Штриховая кривая – направление ветра

Fig. 9. Significant wave height h_s , mean wave direction θ and mean wave period τ at points 8 (red curves), 9 (blue curves) and 10 (green curves) in the Balaklava Bay water area on November 9–13, 2007. Dashed curve is for wind direction

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что зонально-ориентированная узость существенно затрудняет проникновение штормового волнения из открытого моря в северную часть бухты. Большая часть энергии волн теряется в южной части.

Для количественной оценки степени затухания штормового волнения в Балаклавской бухте выполнен дополнительный численный эксперимент (аналогичный проведенному в работе [19]), в котором скорость ветра в расчетной области А7 (см. рис. 2) не учитывалась ($W \equiv 0$). Форсингом для волнения в бухте являлись только условия на жидких границах области А7. Таким образом, волны проникали в бухту из открытого моря в режиме зыби.

Табл. 2 содержит рассчитанные по модели *SWAN* максимальные высоты значительных волн h_s в Балаклавской бухте (точки 1–10) в период шторма 11 ноября 2007 г. с учетом и без учета ветра. Здесь $M_1 = \max h_s$ при учете ветра в области А7; $M_2 = \max h_s$ без учета ветра в области А7; $\varepsilon = M_1 - M_2$; $\delta = 100 \% (M_2 - M_1)/M_1$.

Естественно, что без учета ветра в области А7 высоты волн во всей акватории бухты становятся меньше, и по мере их распространения от входа в бухту до вершины бухты это уменьшение становится все более существенным. Если в южной части бухты δ составляет 2–13 %, то в узости значения δ уменьшаются на 33–36 %, а в северной части бухты – более чем на 80 %. Можно констатировать, что проникающее из открытой части моря штормовое волнение достаточно быстро затухает по мере распространения

Таблица 2. Значения M_1 , M_2 , ε и δ в точках 1–10 Балаклавской бухты в период шторма 11 ноября 2007 г. с учетом и без учета ветра в области А7

Table 2. Values M_1 , M_2 , ε and δ at points 1–10 in the Balaklava Bay during the storm of November 11, 2007, inclusive and exclusive of wind in area A7

№ п/п / No.	M_1 , м / M_1 , m	M_2 , м / M_2 , m	ε , м / ε , m	δ , %
1	4.42	4.34	-0.08	-2
2	2.44	2.38	-0.06	-2
3	1.69	1.59	-0.10	-6
4	0.99	0.86	-0.13	-13
5	1.10	0.99	-0.11	-10
6	0.42	0.27	-0.15	-36
7	0.32	0.12	-0.20	-63
8	0.26	0.05	-0.21	-81
9	0.20	0.02	-0.18	-90
10	0.23	0.02	-0.21	-91

через узость в северную часть бухты. Таким образом, определяющим фактором, влияющим на интенсивность волнения в северной части бухты, является локальное поле ветра (т.е. поле ветра непосредственно над этой частью бухты).

Заключение

На основе численной модели *SWAN* с использованием последовательности вложенных сеток исследованы характеристики ветрового волнения в Балаклавской бухте при различных типах ветровых воздействий. Анализ результатов моделирования позволил установить следующее.

В южной части бухты наиболее интенсивное волнение формируется при ветрах южного направления. На входе в бухту при скоростях ветра, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, максимальные высоты значительных волн h_s достигают 3.02 и 5.43 м соответственно. Волнение в южной части бухты имеет веерообразный характер распространения.

В зонально-ориентированном сужении бухты, соединяющем южную и северную ее части, интенсивность волнения снижается почти на порядок. Здесь для скоростей ветра, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, максимумы h_s соответственно равны 0.36 и 0.65 м.

В северной части бухты максимальные значения h_s при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 0.25 и 0.46 м. Поскольку северная часть бухты ориентирована меридионально, то здесь при ветрах южных румбов волнение усиливается в северном направлении, а при ветрах северных румбов – в южном направлении.

Характерной особенностью формирования поля волнения в бухте является тот факт, что проникающее в южную часть бухты штормовое волнение быстро затухает по мере распространения через узость в северную часть бухты, и, таким образом, определяющим фактором, влияющим на интенсивность волнения в северной части бухты, является поле ветра над этой частью бухты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Оценка степени загрязнения и перспектива экологических исследований вод Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 195–213.
2. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Современное состояние основных компонентов экосистемы Балаклавской бухты по материалам комплексного мониторинга ИнБИОМ НАН Украины // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. Одесса, 2011. № 1(12). С. 83–95. URL: <http://www.hmcbas.od.ua/2012-06-07-20-19-49.html?download=11%3A-12> (дата обращения: 16.02.2021).
3. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 523–533. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-523-533
4. *Кубряков А. И., Попов М. А.* Моделирование циркуляции и распространения загрязняющей примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 3. С. 49–61.
5. *Фомин В. В., Полозок А. А.* Режим ветрового волнения в районе Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 53–67. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-53-67
6. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // Journal of Geophysical Researches: Oceans. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
7. *Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В.* Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіди Національної академії наук України. 2011. № 8. С. 108–112.
8. Statistics for the evaluation and comparison of models / C. J. Willmott [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1985. Vol. 90, iss. C5. P. 8995–9005. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
9. *Grant W. D., Madsen O. S.* Combined wave and current interaction with a rough bottom // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1979. Vol. 84, iss. C4. P. 1797–1808. <https://doi.org/10.1029/JC084iC04p01797>
10. *Zijlema M.* Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // Coastal Engineering. 2010. Vol. 57, iss. 3. P. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>
11. *Fomin V. V.* Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899, iss. 5. 052005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/5/052005>
12. *Мысленков С. А., Столярова Е. В., Архипкин В. С.* Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Информационный сборник № 44. Результаты испытания новых и усовершенствованных

технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. М. ; Обнинск : ИГ–СОЦИН, 2017. С. 126–135. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb44/sb44.pdf> (дата обращения: 16.02.2021).

13. Extreme wind waves in the Black Sea / B. V. Divinsky [et al.] // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
14. Nearshore wave forecasting and hindcasting by dynamical and statistical downscaling / Ø. Breivik [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2009. Vol. 78, supplement. P. S235–S243. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.025>
15. Wave forecasting system for operational use and its validation at coastal Puducherry, east coast of India / K. G. Sandhya [et al.] // *Ocean Engineering*. 2014. Vol. 80. P. 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.01.009>
16. Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов / Ю. Б. Ратнер [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 5. С. 51–59. doi:10.22449/0233-7584-2017-5-56-66
17. Downscaling of wave climate in the western Black Sea / B. Bingölbali [et al.] // *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 172. P. 31–45. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.11.042
18. Estimation of extreme wind wave heights / L. J. Lopatoukhin [et al.]. WMO, 2000. 73 p. (JCOMM Technical Report ; No. 9).
19. *Мысленков С. А.* О влиянии локального ветрового воздействия на высоту волн в Цемесской бухте Черного моря // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 7, часть 2. С. 42–47. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.61.021>

Об авторах:

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

Полозок Антон Александрович, старший инженер-программист отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская 2), **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, polozok.umi@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Фомин Владимир Владимирович – постановка задачи, анализ результатов моделирования и подготовка статьи

Полозок Антон Александрович – проведение численных экспериментов и анализ результатов моделирования

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2014. [Assessment of the Pollution Degree and the Prospect of Environmental Studies of the Balaklavskaya Bay Waters]. In: MHI, 2014. *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. 28, pp. 195–213 (in Russian).

2. Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2011. [The Current State of the Main Components of the Ecosystem of the Balaklava Bay Based on Integrated Monitoring of the IBSS of the National Academy of Sciences of Ukraine]. In: V.N. Sytov, ed., 2011. *Vestnik Gidromettsentra Chernogo i Azovskogo Morey* [Bulletin of the Hydrometeorological Center of the Black and Azov Seas]. Odessa. Issue 1(12), pp. 83–95. Available at: <http://www.hmcbas.od.ua/2012-06-07-20-19-49.html?download=11%3A-12> [Accessed: 16 February 2021] (in Russian).
3. Orekhova, N.A., Ovsyany, E.I., Gurov, K.I. and Popov, M.A., 2018. Organic Matter and Grain-Size Distribution of the Modern Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 25(6), pp. 479–488. doi:10.22449/1573-160X-2018-6-479-488
4. Kubryakov, A.I. and Popov, M.A., 2005. Modeling of Circulation and Propagation of Contaminating Impurities in the Balaklava Bay. *Physical Oceanography*, 15(3), pp. 180–191. <https://doi.org/10.1007/s11110-005-0040-3>
5. Fomin, V.V. and Polozok, A.A., 2020. Wind Wave Regime in the Area of Balaklava Bay. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 53–67. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-53-67 (in Russian).
6. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions: 1. Model Description and Validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), pp. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
7. Polonsky, A.B., Fomin, V.V. and Garmashov, A.V., 2011. Characteristics of Wind Waves of the Black Sea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (8), pp. 108–112 (in Russian).
8. Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J. and Rowe, C.M., 1985. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), pp. 8995–9005. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
9. Grant, W.D. and Madsen, O.S., 1979. Combined Wave and Current Interaction with a Rough Bottom. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C4), pp. 1797–1808. <https://doi.org/10.1029/JC084iC04p01797>
10. Zijlema, M., 2010. Computation of Wind-Wave Spectra in Coastal Waters with SWAN on Unstructured Grids. *Coastal Engineering*, 57(3), pp. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>
11. Fomin, V.V., 2017. Numerical Modeling of Wind Waves in the Black Sea Generated by Atmospheric Cyclones. *Journal of Physics: Conference Series*, 899(5), 052005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/5/052005>
12. Myslenkov, S.A., Stolyarova, E.V. and Arkhipkin, V.S., 2017. [System for Prognosis of Wind Waves in the Black Sea as Detailed in Shelf Areas]. In: A. A. Alekseeva, ed., 2017. *Informatsionnyy sbornik № 44. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Information Collection of Papers no. 44. Results of Tests of New and Advanced Technologies, Models, and Methods of Hydrometeorological Prognoses]. Moscow; Obninsk: IG-SOTsIN, pp. 126–135 (in Russian).
13. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. *Oceanologia*, 62(1), pp. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>

14. Breivik, Ø., Gusdal, Y., Furevik, B.R., Aarnes, O.J. and Reistad, M., 2009. Nearshore Wave Forecasting and Hindcasting by Dynamical and Statistical Downscaling. *Journal of Marine Systems*, 78(Suppl.), pp. S235–S243. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.025>
15. Sandhya, K.G., Balakrishnan Nair, T.M., Bhaskaran, P.K., Sabique, L., Arun, N. and Jeykumar, K., 2014. Wave Forecasting System for Operational Use and its Validation at Coastal Puducherry, East Coast of India. *Ocean Engineering*, 80, pp. 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.01.009>
16. Ratner, Yu.B., Fomin, V.V., Ivanchik, A.M. and Ivanchik, M.V., 2017. System of the Wind Wave Operational Forecast by the Black Sea Marine Forecast Center. *Physical Oceanography*, (5), pp. 51–59. doi:10.22449/1573-160X-2017-5-51-59
17. Bingölbali, B., Akpınar, A., Jafali, H. and van Vledder, G.Ph., 2019. Downscaling of Wave Climate in the Western Black Sea. *Ocean Engineering*, 172, pp. 31–45. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.11.042
18. Lopatoukhin, L.J., Rozhkov, V.A., Ryabinin, V.E., Swail, V.R., Boukhanovsky, A.V. and Degtyarev, A.B., 2000. *Estimation of Extreme Wind Wave Heights*. WMO, 73 p.
19. Myslenkov, S.A., 2017. On Effect of Local Wind Influence on Wave Height in Tse-mes Bay of the Black Sea. *International Research Journal*, 7(2), pp. 42–47. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.61.021> (in Russian).

About the authors:

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

Anton A. Polozok, Senior Engineer-Programmer of Department of Computational Technologies and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, polozok.umi@gmail.com

Contribution of the authors:

Vladimir V. Fomin – statement of the problem, analysis of simulation results and preparation of the article

Anton A. Polozok – carrying out numerical experiments and analysis of simulation results

All the authors have read and approved the final manuscript.