

Режим ветрового волнения в районе Балаклавской бухты

В. В. Фомин, А. А. Полозок*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Поступила: 02.04.2020 г.; принята к публикации 08.05.2020 г.; опубликована 25.06.2020 г.

Исследование волнового режима прибрежных акваторий имеет большое практическое значение для обеспечения безопасности мореплавания, а также для проектирования и эксплуатации объектов береговой инфраструктуры. В настоящей работе исследованы режимные характеристики ветрового волнения в районе Балаклавской бухты (п-ов Крым) на основе математического моделирования. В качестве исходных данных использованы результаты ретроспективных расчетов ветровых волн в Черном море за 1979–2019 гг. с дискретностью 1 ч. Результаты были получены с помощью спектральной волновой модели *SWAN* на неструктурированной сетке. Ветровое воздействие задавалось по данным атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5*. На основе статистической обработки результатов моделирования для района Балаклавской бухты получена информация о повторяемости элементов волн, длительности штормовых и штилевых ситуаций, экстремальных характеристиках волнения. Установлено, что в большинстве случаев высота значительных волн h_s в исследуемом районе не превышает 0.5 м, а повторяемость волн высотой $h_s \geq 2.5$ м составляет $\sim 1\%$. Максимальную повторяемость и интенсивность имеет волнение юго-западного и юго-юго-западного направлений. Для штормов, возможных один раз в 25 лет, значение h_s превышает 7 м. Наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе. Минимальная продолжительность штормов отмечается в августе. За исследуемый 41-летний период статистически значимого тренда в изменении высот волн не выявлено, хотя тенденция к снижению интенсивности волнения имеет место (за 10 лет среднегодовые значения h_s уменьшились на 3 см).

Ключевые слова: Черное море, Балаклавская бухта, ветровое волнение, математическое моделирование, *SWAN*, статистические характеристики.

Благодарности: волновой режим в районе Балаклавской бухты исследовался в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0827-2018-0004. Математическое моделирование волнового климата в Черном море за период 1979–2019 гг. выполнялось при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-80035).

Для цитирования: 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

© Фомин В. В., Полозок А. А., 2020



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 Wave Regime in the Area of Balaklava Bay

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

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Submitted 02.04.2020; revised 08.05.2020; published 25.06.2020

The wave regime of coastal waters is of great practical importance for the safety of navigation, design and operation of coastal infrastructure facilities. In this work the regime characteristics of wind waves in the area of Balaklava Bay (Crimea Peninsula) are studied on the basis of mathematical modeling. As the initial data we used the results of retrospective calculations of wind waves in the Black Sea for the period 1979–2019 with a discreteness of 1 hour, obtained using the spectral wave model SWAN on an unstructured mesh. The wind impact was determined using data from the atmospheric re-analyses of ERA-Interim and ERA5. Based on statistical processing of simulation results for the Balaklava Bay area, information was obtained on the frequency of wave elements, the duration of storm and calm situations and the extreme characteristics of waves.

It was found that in most cases the significant wave height h_s in the study area does not exceed 0.5 m, and the frequency of waves of height $h_s \geq 2.5$ m is $\sim 1\%$. The wave of the south-west and south-south-west directions has the maximum frequency and intensity. For storms that are possible 1 time in 25 years the value h_s exceeds 7 m. The longest storm situations occur in December – January. The minimum duration of storms is observed in August. During the 41-year period there was no statistically significant trend in changes wave heights, although there is a tendency to decrease the waves intensity (for 10 years the average annual values h_s decrease by 3 cm).

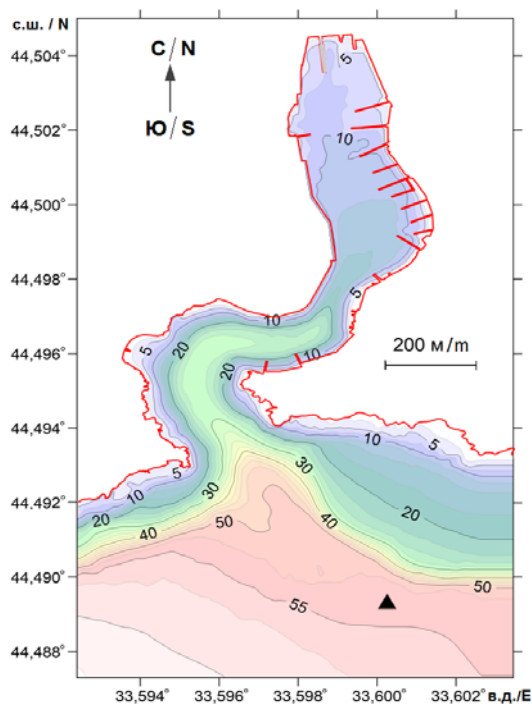
Keywords: Black Sea, Balaklava Bay, wind waves, mathematical modeling, SWAN, statistical characteristics.

Acknowledgements: the Balaklava Bay wave regime was studied under topic No. 0827-2018-0004 of the Marine Hydrophysical Institute of RAS. Mathematical modelling of the Black Sea wave climate for 1979–2019 was performed under project No. 18-05-80035 and funded by the Russian Foundation for Basic Research.

For citation: 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:10.22449/2413-5577-2020-1-53-67 (in Russian).

Введение

Балаклавская бухта представляет собой узкий извилистый залив в юго-западной части п-ова Крым, вдающийся в сушу на 1.5 км (рис. 1). Из-за своей уникальной конфигурации бухта во все времена использовалась в качестве естественного порта для маломерных судов. Современная история и этапы океанологических исследований Балаклавской бухты подробно описаны в [1]. Имеется ряд работ [2–4] по исследованию изменчивости термохалинной структуры вод бухты и проявлений зон апвеллинга. В посвященных комплексному мониторингу Балаклавской бухты публикациях [5, 6] изучается пространственно-временная изменчивость гидробиологических и гидрохимических показателей. Анализ характеристик донных отложений Балаклавской бухты представлен в работах [7–9]. Они посвящены оценкам содержания



Р и с . 1. Распределение глубин (м) Балаклавской бухты. Треугольником показано положение узла расчетной сетки, в котором определялись режимные характеристик волнения

Fig. 1. Depth (m) distribution of the Balaklava Bay. Triangular shows the position of the analysis grid point, in which wave regime characteristics were determined

органических веществ и тяжелых металлов, анализу особенностей физико-химических характеристик донных отложений. Результаты численного моделирования течений и распространения примеси в Балаклавской бухте для характерных ветровых ситуаций приведены в работах [10, 11]. С точки зрения исследования длинноволновых процессов пред-

ставляет интерес работа [12], в которой выполнено численное моделирование сейшевых колебаний моря в Балаклавской бухте.

Как видно, бóльшая часть проведенных исследований Балаклавской бухты имеет экологическую и биогеохимическую направленность. При этом такая важная характеристика, как ветровое волнение, не изучалась вообще, хотя для Балаклавской бухты волнение является одним из наиболее значимых постоянно действующих факторов.

Необходимо отметить, что в 1954–1964 гг. на правом входном мысу существовал пост визуального наблюдения за волнением. По данным поста, высота волн в штормовые периоды достигала 4–5 м. В целом результаты этих наблюдений не дают адекватного представления о характеристиках волнения в районе бухты.

Можно констатировать, что, несмотря на большую научную и практическую значимость, исследований характеристик волнения в указанном районе не проводилось. Настоящая работа восполняет этот пробел и ставит своей целью провести исследование волнового режима в районе Балаклавской бухты на основе статистического анализа результатов численного моделирования ветрового волнения в Черном море за многолетний период.

Рассматриваются два типа режимных характеристик волнения – оперативные и экстремальные. Первые характеристики определяют фоновые условия эксплуатации объектов, вторые – режим предельных нагрузок на объекты или режим их выживания.

Исходные данные

Для оценки режимных характеристик волнения в районе Балаклавской бухты использовались данные ретроспективных расчетов ветровых волн в Черном море за многолетний период, полученные с помощью спектральной

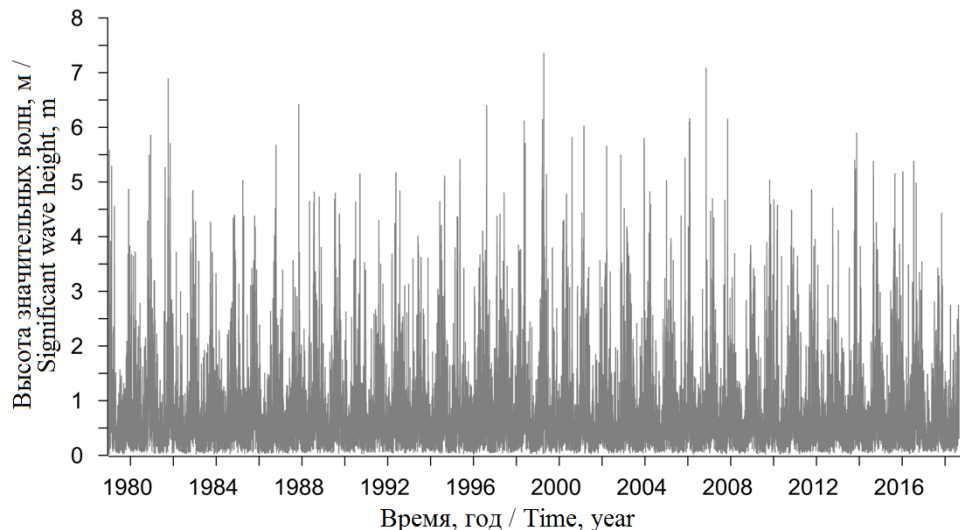
модели *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*) [13, 14]. В качестве исходных полей ветра были использованы данные глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5* за 1979–2019 гг. с пространственным разрешением 0.25° . Эти данные имеются в свободном доступе на сайте Европейского центра среднесрочных прогнозов (URL: <http://apps.ecmwf.int>). Валидация модели *SWAN* по данным измерений волнения на морской платформе в Каркинитском заливе Черного моря проводилась в [15].

Расчеты ветрового волнения выполнялись для всего Черного моря на неструктурированной сетке из 10 900 конечных элементов, ранее использованной в [16]. Угловое разрешение модели *SWAN* составляло 10° . По частотной координате, изменяющейся в диапазоне 0.055–0.625 Гц, использовалась неравномерная сетка с 40 узлами. При интегрировании по времени применялась неявная разностная схема с шагом 30 мин. В результате ретроспективных расчетов для каждого узла расчетной сетки был получен массив параметров волнения в Черном море за 41 год с дискретностью по времени 1 ч (далее – массив *SWAN-ERA*).

Из массива *SWAN-ERA* выбран ближайший к Балаклавской бухте узел расчетной сетки (см. рис. 1). Глубина моря в этом узле ~ 53 м. Для этого узла сформированы многолетние ряды волновых характеристик, включающие высоту значительных волн h_s (рис. 2); средний период волн $\bar{\tau}$ (рис. 3); среднее направление волнения θ ; пиковый период волн τ_p . На основе этих рядов и проводилась оценка режимных характеристик волнения.

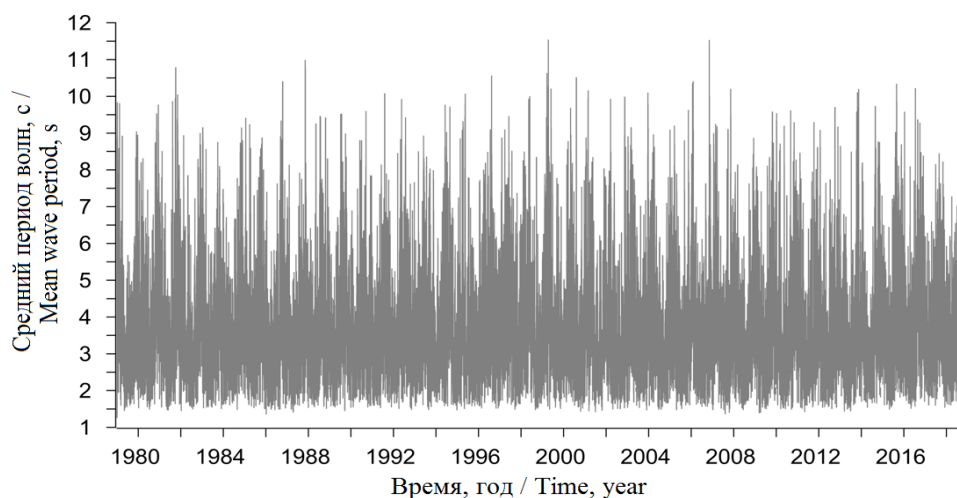
Оперативные характеристики волнения

Перейдем к рассмотрению оперативных характеристик волнения для района Балаклавской бухты. На рис. 4 и 5 приведены гистограммы повторяемости высот значительных волн h_s и средних периодов волн $\bar{\tau}$ по данным *SWAN-*



Р и с . 2. Высота значительных волн (м) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*

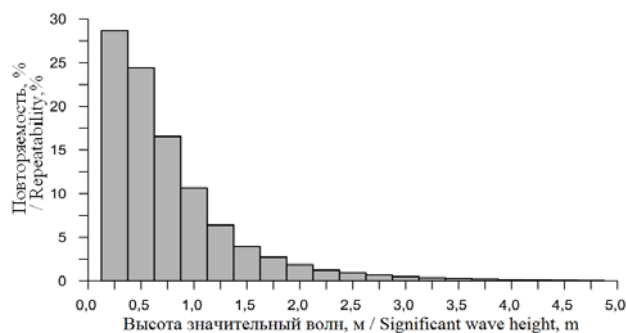
F i g . 2. Significant wave height (m) in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data



Р и с . 3. Средний период волн (с) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*

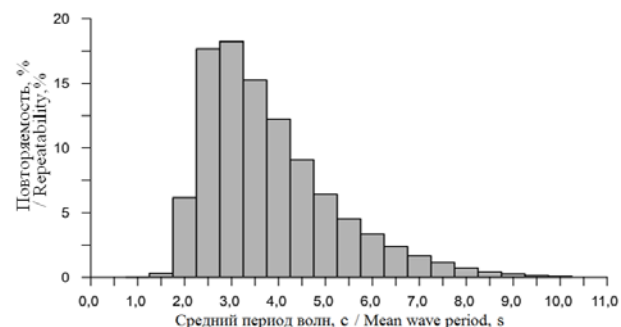
F i g . 3. Mean wave period (s) in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data

ERA1. Как видно, с увеличением высоты волн их повторяемость монотонно уменьшается. Причем более 50 % случаев приходится на волны с высотами 0.5 м и менее. Волны высотой 1 м возникают в 10 % случаев, а повторяемость волн высотой 2.5 м и выше составляет менее 1 %. Гистограмма повторяемости средних периодов волн имеет характерную особенность: на ней отчетливо выделяется интервал 2.5–3.5 с, где повторяемость периодов превышает 15 %, причем в указанный интервал периодов попадает 51 % всех случаев.



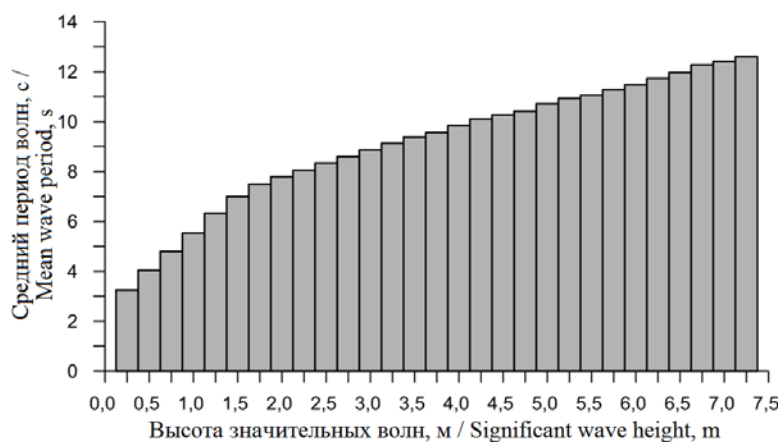
Р и с . 4. Повторяемость высоты значительных волн (%) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*

F i g . 4. Repeatability of significant wave height (%) in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data



Р и с . 5. Повторяемость среднего периода волн (%) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*

F i g . 5. Repeatability of mean wave period (%) in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data



Р и с . 6. Зависимость среднего периода волн (с) от высоты значительных волн (м) для района Балаклавской бухты по данным SWAN-ERA

F i g . 6. Dependence of mean wave period (s) on significant wave height (m) for the Balaklava Bay area according to SWAN-ERA data

На рис. 6 приведена зависимость среднего периода волн в исследуемом районе от высоты значительных волн. Чтобы построить эту зависимость для каждого интервала значений h_s , определялся средний период волн путем осреднения всех значений $\bar{\tau}$, попавших в заданный интервал. Как видно, на интервале $0.125 \text{ м} \leq h_s < 2 \text{ м}$ значения $\bar{\tau}$ увеличиваются быстрее, чем на интервале $2 \text{ м} \leq h_s < 7.5 \text{ м}$. Представленная зависимость удовлетворительно аппроксимируется полиномом второй степени: $\bar{\tau} = a_0 + a_1 h_s - a_2 h_s^2$, где $a_0 = 3.49 \text{ с}$; $a_1 = 2.16 \text{ с/м}$; $a_2 = 0.13 \text{ с/м}^2$.

Результаты расчетов повторяемости среднего направления волнения в районе Балаклавской бухты показаны на рис. 7, а. Видно, что в подавляющем числе случаев волны в исследуемый район приходят со стороны моря. Максимальную повторяемость (более 15 %) имеют волны двух направлений: юго-юго-запад (202.5°), юго-запад (225°). На эти два направления приходится 39 % всех случаев. Распределение по направлениям средних многолетних значений высоты значительных волн приведено на рис. 7, б. Как видно, наиболее высокие ветровые волны подходят к Балаклавской бухте с юго-юго-запада и юго-запада. Средние многолетние значения h_s для этих направлений равны 1.36 и 0.89 м соответственно.

Для исследуемого района были получены значения продолжительности штормовых и штилевых ситуаций. В соответствии с общепринятой практикой для оценок этих характеристик использовались значения высот волн 3%-ной обеспеченности в системе шторма ($h_{3\%}$). Для конкретного шторма равенство $h_{3\%} = a$ означает, что в 3 % всех случаев высоты волн будут превышать значение a . Расчет $h_{3\%}$, а также высот волн любой другой обеспеченности выполнялся с помощью интегральной функции вероятности распределения высот волн для моря конечной глубины [17].

В табл. 1 приведены распределенные по месяцам данные о средней многолетней продолжительности (сут) штормовых ситуаций в районе Балаклавской бухты. Продолжительность штормовых ситуаций определялась

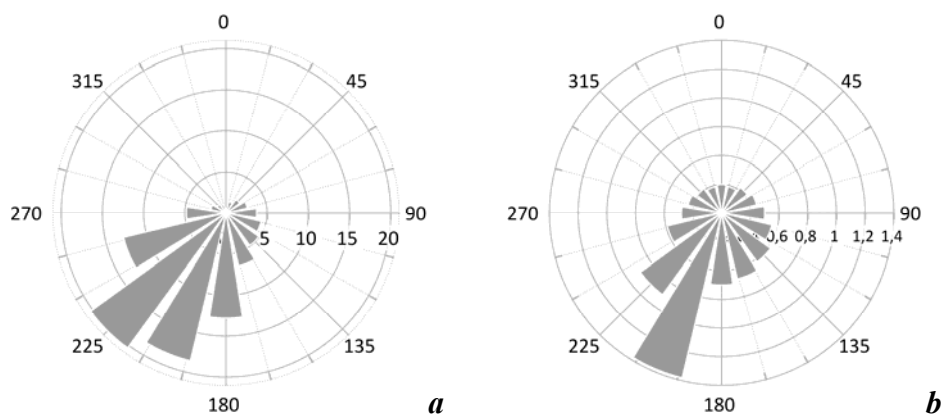


Рис. 7. Повторяемость среднего направления волнения (%) (а) и распределение по направлениям средних многолетних значений высоты значительных волн (м) (б) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*

Fig. 7. Repeatability of average wave direction (%) (a) and distribution by directions of long-term values of significant wave height (m) (b) in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data

Таблица 1. Средняя многолетняя продолжительность (сут) штормовых ситуаций в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*

Table 1. Average long-term duration (days) of storms in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data

Месяц / Month	Средняя многолетняя продолжительность штормовых ситуаций для волн высотой $h_{3\%}$, м, не менее / Average long-term duration of storms for waves with a height of $h_{3\%}$, m, not less					
	1.25	2	3	4	5	6
по месяцам / by month						
1	20.0	13.0	7.1	3.5	1.8	0.9
2	18.3	10.5	5.0	2.5	1.2	0.6
3	17.8	9.8	4.2	1.9	0.9	0.4
4	14.3	6.7	2.4	0.9	0.4	0.2
5	8.9	3.3	1.0	0.3	0.1	0.0
6	7.2	2.5	0.8	0.3	0.2	0.0
7	6.4	1.6	0.4	0.2	0.1	0.0
8	5.4	1.3	0.3	0.0	0.0	0.0
9	9.9	3.5	1.2	0.5	0.2	0.1
10	13.3	5.6	1.9	0.8	0.4	0.2
11	17.4	9.8	4.6	2.2	1.2	0.7
12	20.9	12.9	6.5	3.6	2.0	1.0
за год / for a year						
–	13.3	6.7	3.0	1.4	0.7	0.3

для следующих градаций высот волн: $h_{3\%} \geq 1.25$ м; $h_{3\%} \geq 2$ м; $h_{3\%} \geq 3$ м; $h_{3\%} \geq 4$ м; $h_{3\%} \geq 5$ м; $h_{3\%} \geq 6$ м. В нижней строке таблицы для каждой градации дана ее средняя за год продолжительность. Как видно, наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе. Минимальная продолжительность штормов отмечается в августе.

На рис. 8 приведены распределения по годам длительности (сут) штормов в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA* для четырех градаций интенсивности шторма: $h_{3\%} \geq 1.25$ м; $h_{3\%} \geq 2$ м; $h_{3\%} \geq 3$ м; $h_{3\%} \geq 4$ м. Для этих градаций средние многолетние значения длительности штормов равны 13.3; 6.7; 2.9; 1.4 сут соответственно.

На рис. 9 дано распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ($h_{3\%} \leq 0.25$ м) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*. Длительность штилевых ситуаций изменяется в пределах от 14 до 34 сут, а их среднее значение составляет 22 сут.

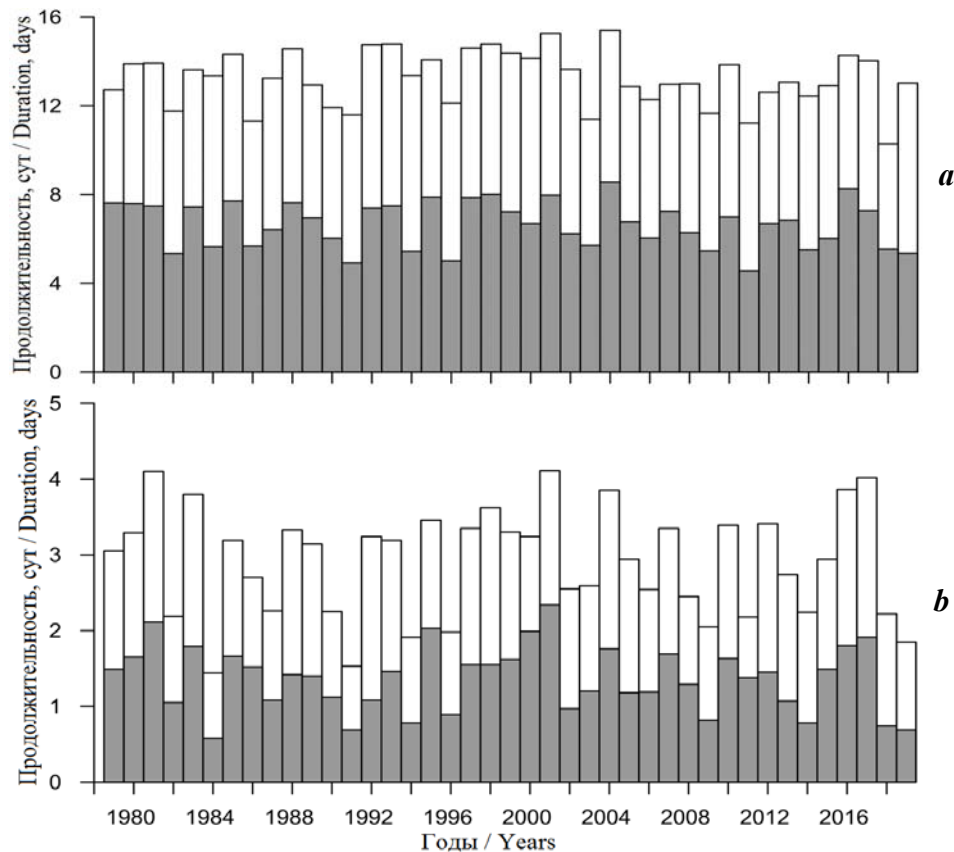
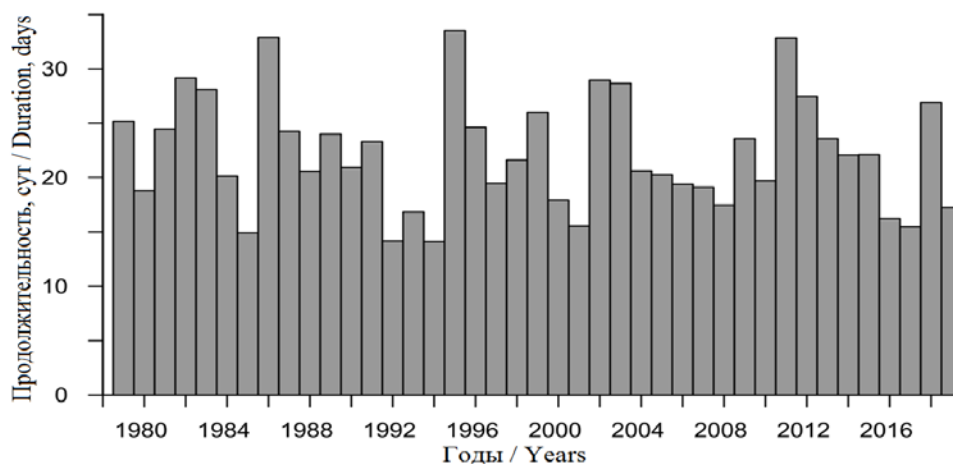


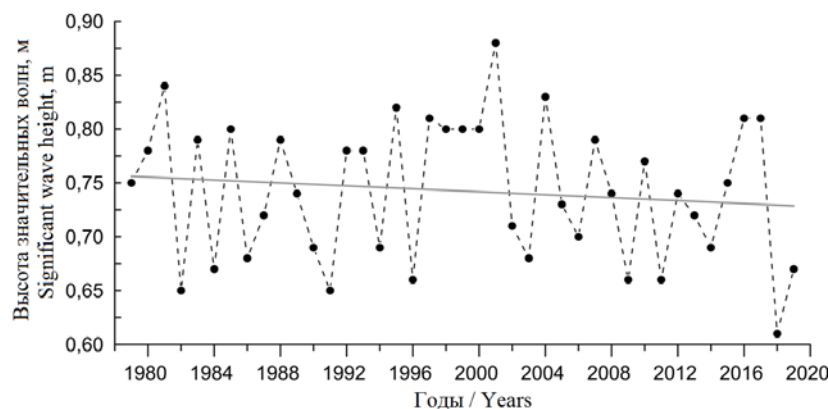
Рис. 8. Распределение по годам продолжительности штормовых ситуаций в районе Балаклавской бухты для волн высотой $h_{3\%} \geq 1.25$ м (белый цвет) и $h_{3\%} \geq 2$ м (серый цвет) (a), $h_{3\%} \geq 3$ м (белый цвет) и $h_{3\%} \geq 4$ м (серый цвет) (b) по данным *SWAN-ERA*

Fig. 8. Distribution by years of storm duration in the Balaklava Bay area for waves with a height of $h_{3\%} \geq 1.25$ m (white bars) and $h_{3\%} \geq 2$ m (grey bars) (a) and $h_{3\%} \geq 3$ m (white bars) and $h_{3\%} \geq 4$ m (grey bars) (b) according to *SWAN-ERA* data



Р и с . 9. Распределение по годам продолжительности (сут) штилевых ситуаций ($h_{3\%} \leq 0.25$ м) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*
 F i g . 9. Distribution by years of calmness ($h_{3\%} \leq 0.25$ m) duration (days) in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data

Для ряда среднегодовых высот значительных волн (рис. 10) выявлен отрицательный линейный тренд следующего вида: $h_s = -0.0032(t - 1979) + 1.1630$. Здесь время t задается в годах. Как показал анализ, погрешность в определении углового коэффициента оказалась сопоставимой с его абсолютным значением. Таким образом, по данным *SWAN-ERA* на интервале времени 1979–2019 гг. статистически значимого тренда в изменении среднегодовых величин высот значительных волн в районе Балаклавской бухты не выявлено, хотя тенденция к снижению интенсивности волнения имеет место (за 10 лет среднегодовые значения h_s уменьшаются примерно на 3 см).



Р и с . 10. Среднегодовые высоты значительных волн (м) в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA* и их линейный тренд (серая линия)

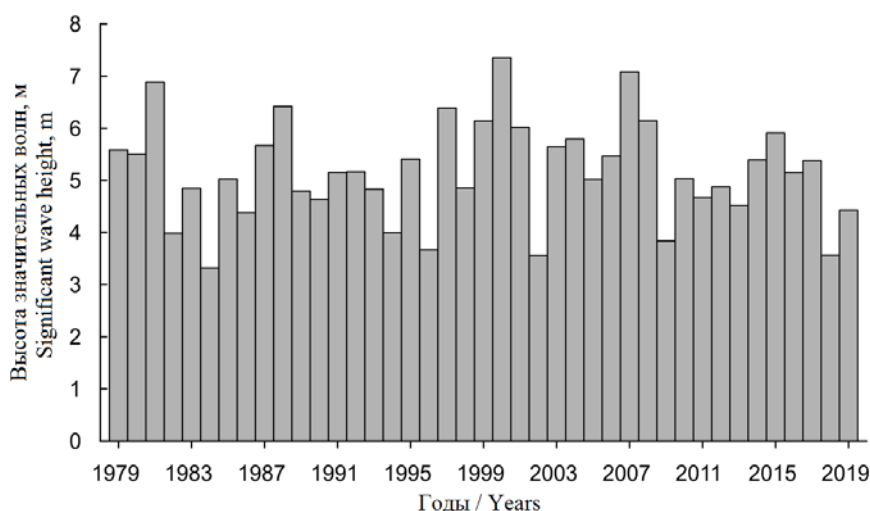
F i g . 10. Average annual of heights (m) of significant waves in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data and their linear trend (grey line)

Экстремальные характеристики волнения

За исследуемый период времени на взморье Балаклавской бухты возникло 10 штормовых событий с высотой значительных волн более 6 м. Значения годовых максимумов h_s показаны на рис. 11. Даты возникновения событий следующие: 10 ноября 1981 г.; 3 марта 1988 г.; 12 апреля 1997 г.; 5 февраля 1999 г.; 29 декабря 1999 г.; 21 января 2000 г.; 30 декабря 2001 г.; 19 января 2007 г.; 11 ноября 2007 г.; 22 ноября 2008 г. События 21 января 2000 г. и 11 ноября 2007 г. соответствуют самым сильным штормам. Во время этих событий высота значительных волн достигала 7.36 и 7.08 м.

Для оценки максимумов средних высот $\bar{h} = 0.63h_s$ и средних периодов волн $\bar{\tau}$, возможных один раз в n лет, использовалось экстремальное распределение Гумбеля [18, 19], построенное на основе последовательности годовых максимумов \bar{h} и $\bar{\tau}$. Затем с помощью функций распределения элементов волн для моря конечной глубины [17] определялись высоты и периоды волн различной обеспеченности в системе штормов, возможных один раз в n лет.

Результаты расчетов приведены в табл. 2 (T – период повторяемости шторма). Видно, что для шторма, возможного один раз в год, значение h_s составляет 4.7 м. Сопоставление данных модели *SWAN* (рис. 11) с данными табл. 2 показывает, что экстремальный шторм 11 ноября 2007 г. можно классифицировать как шторм, возможный один раз в 25 лет. В свою очередь, экстремальный шторм 21 января 2000 г. занимает промежуточное положение между штормами, возможными один раз в 25 и один раз в 50 лет. Полученные экстремальные характеристики волнения могут быть использованы для расчета предельных волновых нагрузок при проектировании элементов прибрежной инфраструктуры Балаклавской бухты.



Р и с . 11. Распределение годовых максимумов высоты значительных волн в районе Балаклавской бухты по данным *SWAN-ERA*

Fig. 11. Distribution of annual max. values of significant wave heights in the Balaklava Bay area according to *SWAN-ERA* data

Таблица 2. Средняя высота волн \bar{h} , средний период $\bar{\tau}$, высота значительных волн h_s и высоты волн 3%-ной и 1%-ной обеспеченности в районе Балаклавской бухты, возможные один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет
 Table 2. Average wave height \bar{h} , average period $\bar{\tau}$, significant wave height h_s and heights of waves of 3 % and 1 % return period in the Balaklava Bay area with possible once per 1 year and per 5, 10, 25, 50, 100 years

T , год / T , year	\bar{h} , м / \bar{h} , m	$\bar{\tau}$, с / $\bar{\tau}$, s	h_s , м / h_s , m	$h_{3\%}$, м / $h_{3\%}$, m	$h_{1\%}$, м / $h_{1\%}$, m
1	3.0	9.4	4.7	5.9	6.6
5	3.7	10.3	5.8	7.1	8.0
10	4.1	10.8	6.5	7.7	8.6
25	4.5	11.4	7.1	8.5	9.4
50	4.8	11.9	7.6	9.0	10.0
100	5.2	12.4	8.2	9.5	10.6

Заключение

Анализ результатов математического моделирования ветровых волн в районе Балаклавской бухты за 1979–2019 гг. показал следующее.

В более чем 50 % случаев высота значительных волн $h_s \leq 0.5$ м. Волны высотой $h_s = 1$ м возникают в 10 % случаев, а повторяемость волн высотой $h_s \geq 2.5$ м составляет ~ 1 %. В интервале 2.5–3.5 с повторяемость средних периодов $\bar{\tau}$ превышает 15 %. В этот интервал попадает около 50 % всех значений $\bar{\tau}$. Максимальную повторяемость (~ 40 %) имеют волны юго-западного и юго-юго-западного направлений. Самые высокие волны подходят к бухте с юго-юго-запада.

Наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе. Минимальная продолжительность штормов отмечается в августе. Продолжительность штилевых ситуаций изменяется в пределах от 14 до 34 сут и в среднем составляет 22 сут.

На интервале времени 1979–2019 гг. статистически значимого тренда в изменении высоты значительных волн h_s в районе Балаклавской бухты не выявлено, хотя тенденция к снижению интенсивности волнения имеет место (за 10 лет уменьшение среднегодовых значений h_s составляет ~ 3 см).

Получены оценки высот и периодов волн различной обеспеченности в районе Балаклавской бухты, возможных 1 раз в заданное количество лет. В частности, для шторма повторяемостью 1 раз в 25 лет высота значительных волн $h_s = 7.1$ м. В системе этого шторма высота волн 1%-ой обеспеченности достигает 9.4 м.

Настоящая работа является первым этапом исследования ветрового волнения в районе Балаклавской бухты. Следующий этап предполагается посвятить моделированию пространственной структуры волнения непосредственно в самой бухте при различных ветровых воздействиях. Для этого будет использована модель *SWAN* с высоким пространственным разрешением в комбинации с методом вложенных сеток.

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.* Структура и сезонная изменчивость термохалинного поля в Балаклавской бухте и прилегающей акватории Черного моря по данным контактных и спутниковых наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 23. С. 171–179.
3. *Боровская Р. В., Ломакин П. Д., Попов М. А.* Апвеллинг в Балаклавской бухте и прилегающих акваториях Черного моря на базе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 20. С. 171–179.
4. Проявление апвеллинга в полях гидрофизических и гидрохимических элементов на акватории Балаклавской бухты / П. Д. Ломакин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 23. С. 180–192.
5. *Попов М. А., Ковригина Н. П., Лисицкая Е. В.* Комплексный мониторинг вод Балаклавской бухты // Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и мировом океане (юбилейный выпуск). Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 118–124. (Труды ЮгНИРО; т. 46).
URL: <https://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/9594/YugNIRO%20Proceedings%20Vol.46%20-%202008.pdf> (дата обращения: 15.05.2020).
6. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Современное состояние основных компонентов экосистемы Балаклавской бухты по материалам комплексного мониторинга ИнБЮМ 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: 10.05.2020).
7. *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:10.22449/2413-5577-2019-3-82-88
8. 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
9. 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
10. *Кубряков А. И., Попов М. А.* Моделирование циркуляции и распространение загрязняющей примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 3. С. 49–61.
11. *Фомин В. В., Репетин Л. Н.* Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 4. С. 43–58.

12. Фомин В. В., Лазоренко Д. И., Иванча Е. В. Численное моделирование сейш в Балаклавской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 3. С. 32–39.
13. 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>
14. 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>
15. Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіді Національної академії наук України. 2011. № 8. С. 108–112.
16. Maximum Waves in the Black Sea / B. Divinskii [et al.] // Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 October 2019). Mugla, Turkey : MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 2. P. 799–810.
17. Крылов Ю. М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 255 с.
18. Estimation of extreme wind wave heights / L. J. Lopatoukhin [et al.]. World Meteorological Organization, 2000. 73 p. (JCOMM Technical Report No. 9, WMO/TD-No. 1041).
19. 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>

Об авторах:

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

Полозок Антон Александрович, старший инженер-программист отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 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., 2010. Structure and Seasonal Variability of the Thermohaline Field in the Balaklava Bay and Adjoining Water Area of the Black Sea on the Basis of Contact and Satellite Data. In: MHI, 2010. *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. 23, pp. 171–179 (in Russian).
3. Borovskaya, R.V., Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2009. Upwelling in the Balaklava Bay and Adjacent Black Sea Using Satellite Data. In: MHI, 2009. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 20, pp. 171–179 (in Russian).
4. Lomakin, P.D., Popov, M.A., Kuftarkova, E.A. and Kovrigina, N.P. Upwelling Display in Fields of Hydrophysical and Hydrochemical Elements on Water Area of the Balaklava Bay. In: MHI, 2010. *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. 23, pp. 180–192 (in Russian).
5. Popov, M.A., Kovrigina, N.P. and Lisitskaya, E.V., 2008. Complex Monitoring of the Balaklavskaya Bay Waters. In: B.N. Panov, ed., 2008. *Main Results of Complex Research in the Azov-Black Sea Basin and the World Ocean (Jubilee Issue)*. YugNIRO Proceedings, vol. 46. Kerch: YugNIRO Publishers, pp. 118–124 (in Russian).
6. 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: 10 April 2020] (in Russian).
7. Tikhonova, E.A., Kotelyanets, E.A. and Gurov, K.I., 2019. Content of Organic Compounds and Trace Metals in Bottom Sediments of the Balaklava Bay (the Black Sea). *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoy i Shel'fovoy Zon Morya = Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 82–88. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-82-88
8. 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
9. Kotelyanets, E.A., Gurov, K.I., Tikhonova, E.A. and Kondratev, S.I., 2019. Pollutants in Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 26(5), pp. 414–424. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-414-424
10. 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>
11. Fomin, V.V. and Repetin, L.N., 2005. Numerical Simulation of Wind Currents and Propagation of Impurities in the Balaklava Bay. *Physical Oceanography*, 15(4), pp. 232–246. <https://doi.org/10.1007/s11110-005-0045-y>
12. Fomin, V.V., Lazorenko, D.I. and Ivancha, E.V., 2017. Numerical Simulation of Seiches in the Balaklava Bay. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoy i Shel'fovoy Zon Morya = Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 32–39.

13. 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>
14. 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>
15. 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.
16. Divinskii, B., Fomin, V., Kosyan, R. and Lazorenko, D., 2019. Maximum Waves in the Black Sea. In: MEDCOAST Foundation, 2019. *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019)*. Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation. Vol. 2, pp. 799–810.
17. Krylov, Yu.M., 1966. [*Spectral Methods for Investigation and Calculation of Wind Waves*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 258 p. (in Russian).
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*. World Meteorological Organization, 73 p.
2. 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>

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.