

РЕЖИМ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В РАЙОНЕ ГУРЗУФА (ЮЖНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ КРЫМА)

И.Н. Фомина¹, А.А. Полозок², В.В. Фомин²

¹ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, г. Москва

² Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

polozok.umi@gmail.com

Аннотация. Волновой режим прибрежных акваторий имеет большое практическое значение для безопасности мореплавания, проектирования и эксплуатации объектов береговой инфраструктуры. В настоящей работе исследованы режимные характеристики ветрового волнения в районе пгт Гурзуф (Южный берег Крыма) на основе математического моделирования. В качестве исходных данных использованы результаты ретроспективных расчетов ветровых волн в Черном море за период 1979–2019 гг. с дискретностью 1 час, полученные с помощью спектральной волновой модели SWAN на неструктурированной сетке. Ветровое воздействие задавалось по данным атмосферных ре-анализов ERA-Interim и ERA5. На основе статистической обработки результатов моделирования для изучаемого района получена информация о повторяемости элементов волн, длительностях штормовых и штилевых ситуаций, экстремальных характеристиках волнения. Анализ оперативных характеристик показал, что более чем в 46 % случаев высота значительных волн не превышает 0,5 метра. Волны высотой 1 м возникают в 12 % случаев, а повторяемость волн высотой $h_s \geq 2,5$ м составляет 1,3 %. В большинстве случаев волны в исследуемый район приходят с восточного направления (повторяемость 23 %), наиболее высокие ветровые волны подходят к району береговой линии пгт Гурзуф с востока и юга. Для штормов, возможных 1 раз в 25 лет, значение h_s около 7 м. Наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе. Минимальная продолжительность штормов отмечается в июне – июле.

Ключевые слова: Черное море, прибрежная зона Гурзуфа, ветровое волнение, математическое моделирование, SWAN, статистические характеристики.

Введение. Район пгт Гурзуф имеет важное рекреационное значение. Поселок находится в 18 км к северо-востоку от Ялты, на северном побережье Черного моря в устье р. Авунда, расположен на южном склоне Крымских гор (рис. 1). Рядом с поселком работает Международный детский центр «Артек». Тут же расположена гора Аю-Даг, являющаяся естественным минералогическим музеем Южного берега Крыма. Перед Гурзуфом в море находятся скалы Адалары – заповедный памятник природы. Вдоль набережной Гурзуфа имеется большое количество санаториев, пансионатов и здравниц.

В настоящее время в береговой зоне Южного Крыма, в том числе и в районе пгт Гурзуф, активно проводятся работы по реконструкции берегозащитных сооружений, а также по проектированию и строительству новой инфраструктуры для развития рекреационной деятельности. Для подобных мероприятий необходимы сведения о режимно-климатических особенностях ветрового волнения прибрежной акватории Крыма, однако

региональных работ по исследованию волнового режима в районе пгт Гурзуф практически нет.

Цель настоящей работы – на основе данных математического моделирования выполнить статистический анализ ветро-волновых условий на участке акватории Черного моря, примыкающей к пгт Гурзуф.

Ниже для указанного района представлены результаты расчетов оперативных и экстремальных характеристик волнения. Оперативные характеристики волнения определяют фоновые условия эксплуатации объектов прибрежной инфраструктуры, а экстремальные характеристики волнения – режим предельных нагрузок на эти объекты.

Исходные данные. Для оценки статистических характеристик волнения в прибрежной зоне исследуемого района использовались данные ретроспективных расчетов ветровых волн в Черном море за многолетний период, полученные с помощью спектральной модели Simulating Waves Near Shore (SWAN) [1].



Рис. 1. Карта-схема прибрежной зоны пгт Гурзуф (точкой указано положение узла расчетной сетки, в котором брались данные ретроспективных расчетов волнения)

В качестве исходных полей ветра использованы данные глобальных атмосферных ре-анализов ERA-Interim и ERA5 за 1979–2019 гг. с пространственным разрешением 0,25°. Эти поля имеются в свободном доступе на сайте Европейского центра среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>). Результаты валидации модели SWAN по данным измерений волнения на морской платформе представлены в работе [2].

Ретроспективные расчеты ветрового волнения по модели SWAN проводились для всего Черного моря на неструктурированной сетке из 10 900 конечных элементов, используемой в работе [3]. 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 минут. В результате ретроспективных расчетов для каждого узла расчетной сетки был получен массив параметров волнения в Черном море длиной 41 год с дискретностью по времени 1 ч. Далее для ссылки на этот массив используется аббревиатура SWAN-ERA. Из массива SWAN-ERA выбран ближайший к Гурзуфу узел расчетной сетки. Глубина моря в этом узле ~ 70 м (рис. 1).

Оперативные характеристики волнения. Перейдем к рассмотрению оперативных характеристик волнения для района Гурзуфа. На рисунках 2 и 3 приведены гистограммы повторяемости высот значительных волн и средних периодов волн \bar{T} по данным SWAN-ERA.

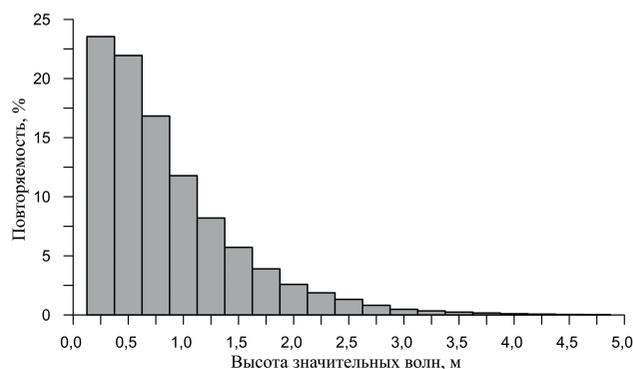


Рис. 2. Повторяемость высоты значительных волн (%) в районе пгт Гурзуф по данным SWAN-ERA

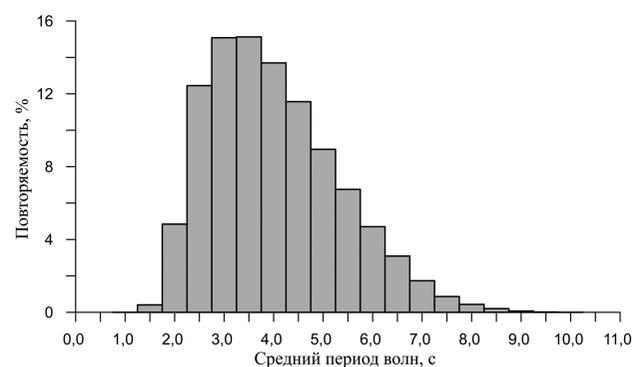


Рис. 3. Повторяемость среднего периода волн (%) в районе пгт Гурзуф по данным SWAN-ERA

Как видно, максимальную повторяемость имеют волны с высотами 0,25 и 0,5 м. На этот интервал приходится 46 % всех случаев. Волны высотой 1 м возникают в 12 % случаев, а повторяемость волн высотой 2,5 м – 1,3 %.

Гистограмма повторяемости средних периодов волн (рис. 3) имеет характерную особенность: на ней отчетливо выделяется интервал 3,0–4,0 с, где повторяемость периодов превышает 13 %. В указанный интервал периодов попадает 32 % всех случаев.

Результаты расчетов повторяемости среднего направления волнения в районе Гурзуфа показаны на рисунке 4а. Отсюда следует, что в большинстве случаев волны в исследуемый район приходят с востока (повторяемость 23 %).

Распределение по направлениям средних многолетних высот значительных волн приведено на рисунке 4б. Как видно, наиболее высокие волны подходят к району Гурзуфа с востока и юга. Средние многолетние значения для этих направлений соответственно равны 1,2 и 1,0 м.

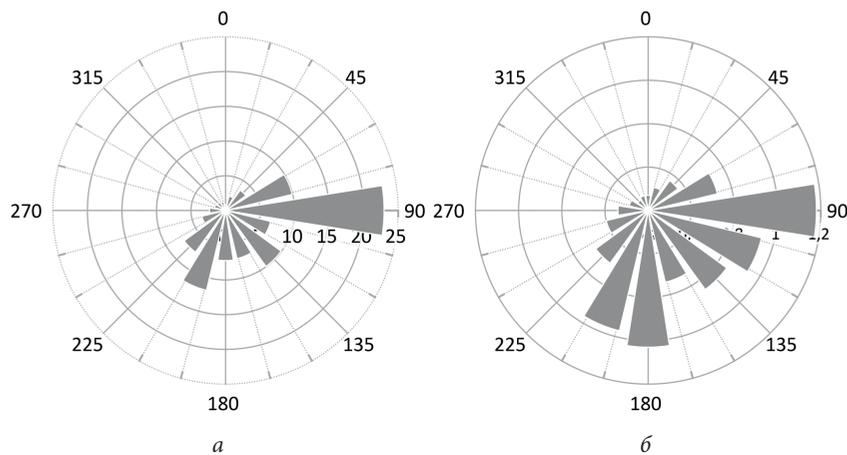


Рис. 4. Повторяемость среднего направления волнения (%) – (а) и распределение по направлениям средних многолетних значений высоты значительных волн (м) – (б) в районе пгт Гурзуф по данным SWAN-ERA

Для исследуемого района получены продолжительности штормовых и штилевых ситуаций. В соответствии с общепринятой практикой для оценок этих характеристик использовались значения высот волн 3-процентной обеспеченности в системе шторма ($h_{3\%}$). Для конкретного шторма равенство $h_{3\%} = a$ означает, что в 3 процентах всех случаев высоты волн будут превышать значение a . Расчет $h_{3\%}$, а также высот волн других обеспеченностей выполнялся с помощью интегральной функции вероятности распределения высот волн для моря конечной глубины [4].

В таблице 1 приведены данные о средней многолетней продолжительности (сут.) по месяцам штормовых ситуаций в районе Гурзуфа.

Продолжительность штормовых ситуаций определялась 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. 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 июне – июле.

На рисунках 5, 6 приведены распределения по годам длительности (сут.) штормов у побережья пгт Гурзуф 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

Таблица 1. Средняя многолетняя продолжительность (сут.) штормовых ситуаций по месяцам в районе Гурзуфа по данным SWAN-ERA

Месяцы	$h_{3\%} \geq 1,25$ м	$h_{3\%} \geq 2$ м	$h_{3\%} \geq 3$ м	$h_{3\%} \geq 4$ м	$h_{3\%} \geq 5$ м
1	22,1	14,1	6,9	3,2	1,5
2	20,0	13,2	7,1	3,5	1,5
3	20,5	12,7	6,0	2,6	1,1
4	16,1	8,2	3,4	1,3	0,5
5	10,8	4,9	1,6	0,6	0,2
6	7,7	3,0	1,0	0,3	0,1
7	8,9	3,7	1,3	0,5	0,1
8	11,4	5,5	2,0	0,5	0,1
9	12,4	6,7	3,0	1,2	0,5
10	17,1	9,7	4,5	2,1	0,9
11	19,9	11,9	5,6	2,8	1,3
12	22,1	14,2	7,4	3,7	1,6
Среднее	15,7	9,0	4,1	1,9	0,8

штормов соответственно равны: 15,7 сут.; 9,0 сут.; 4,1 сут.; 1,9 сут.

На рисунке 7 дано распределение по годам длительности (сут.) штилевых ситуаций ($h_{3\%} \leq 0,25$ м) у побережья Гурзуфа по данным SWAN-ERA. Длительность штилевых ситуаций изменяется в пределах от 0,5 до 2,5 сут., а их среднее значение составляет 1,5 сут.

Экстремальные характеристики волнения. На рисунке 8 приведено распределение годовых максимумов высоты значительных волн в районе Гурзуфа по данным SWAN-ERA за период 1979–2019 гг. Как видно, значения годовых максимумов h_s изменяются в пределах от 3,1 до 6,7 м. Их среднее значение составляет 4,3 м.

Для оценки максимумов средних высот волн $\bar{h} = 0,63 \cdot h_s$ и средних периодов волн $\bar{\tau}$, возможных 1 раз в n лет, использовалось экстремальное распределение Гумбеля [5], построенное на основе последовательности годовых максимумов \bar{h} и $\bar{\tau}$. Затем с помощью функций распределения эле-

ментов волн для моря конечной высоты [4], куда входят максимумы \bar{h} и $\bar{\tau}$, определялись высоты и периоды волн различной обеспеченности в системе штормов, возможных 1 раз в n лет.

Результаты расчетов приведены в таблице 2. Здесь даны значения следующих величин: T – период повторяемости шторма; \bar{h} – средняя длина волны; $h_{50\%}$ – высота волн обеспеченности 50 %; $h_{13\%}$ – высота волн обеспеченности 13%; $h_{3\%}$ – высота волн обеспеченности 3 %; $h_{1\%}$ – высота волн обеспеченности 1 %. В частности, отсюда следует, что для шторма, возможного 1 раз в 25 лет, значение $h_{1\%}$ составляет 8,4 м. Величина $h_{1\%}$ является необходимым параметром при проектировании берегозащитных сооружений 3-го класса [6].

Выводы. Выполнено математическое моделирование ветро-волновых условий на участке акватории Черного моря, примыкающей к береговой зоне Гурзуфа, для штормов 1 %, 2 %, 4 %, 10 % режимной обеспеченности на основе апробированной спектральной волновой модели SWAN.

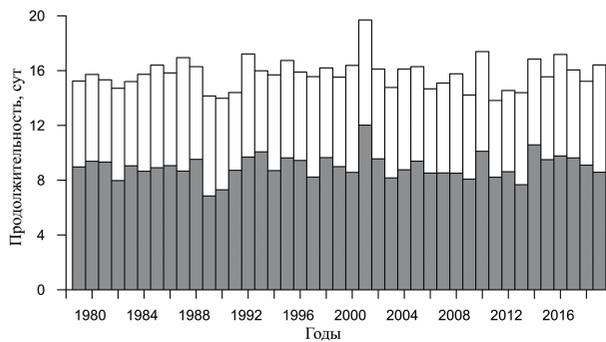


Рис. 5. Распределение по годам продолжительности штормовых ситуаций в районе пгт Гурзуф для $h_{3\%} \geq 1,25$ м и $h_{3\%} \geq 2$ м (серый цвет) по данным SWAN-ERA

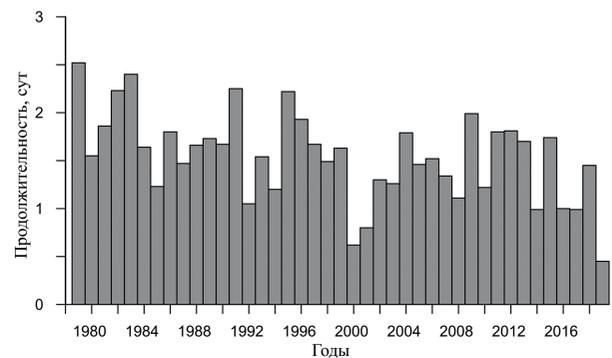


Рис. 7. Распределение по годам продолжительности (сут.) штилевых ситуаций ($h_{3\%} \leq 0,25$ м) в районе пгт Гурзуф по данным SWAN-ERA

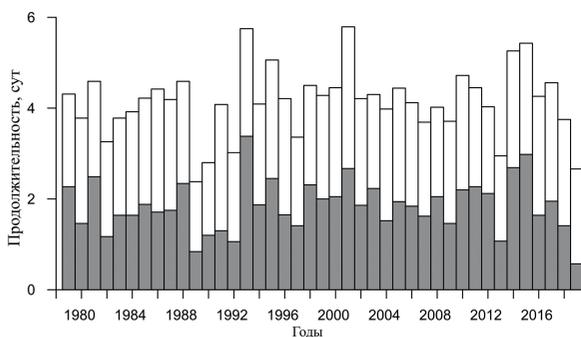


Рис. 6. Распределение по годам продолжительности штормовых ситуаций в районе пгт Гурзуф для $h_{3\%} \geq 3$ м и $h_{3\%} \geq 4$ м (серый цвет) по данным SWAN-ERA

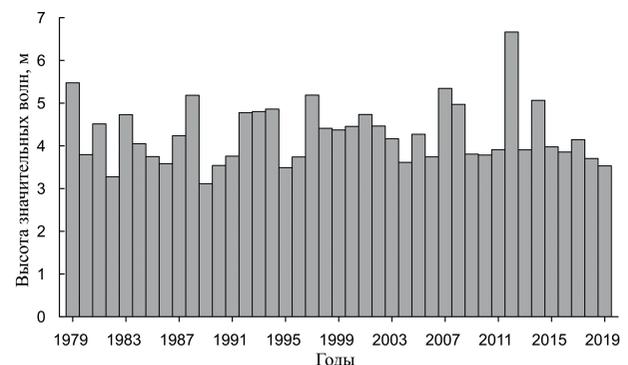


Рис. 8. Распределение годовых максимумов высоты значительных волн h_s в районе пгт Гурзуф по данным SWAN-ERA

Таблица 2. Высота значительных волн h_s , средняя высота волн \bar{h} , средний период волн $\bar{\tau}$, средняя длина волн $\bar{\lambda}$, высота волн 50, 13, 3 и 1 % обеспеченности в системе шторма, возможного в районе пгт Гурзуф 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет

T, годы	h_s , м	\bar{h} , м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\lambda}$, м	$h_{50\%}$, м	$h_{13\%}$, м	$h_{3\%}$, м	$h_{1\%}$, м
1	4,7	2,5	8,5	111	2,3	3,9	5,1	5,8
5	5,7	3,0	9,1	129	2,9	4,8	6,2	7,1
10	6,2	3,3	9,5	138	3,1	5,2	6,7	7,7
25	6,9	3,6	9,9	150	3,4	5,7	7,4	8,4
50	7,3	3,9	10,2	159	3,7	6,1	7,9	9,0
100	7,8	4,1	10,5	169	3,9	6,5	8,4	9,5

Основные результаты научно-исследовательской работы заключаются в следующем.

На основе ретроспективных расчетов волнения в Черном море за период 1979–2019 гг. по данным атмосферного реанализа получены оперативные и экстремальные характеристики волнения в прибрежной зоне Гурзуфа. Анализ оперативных характеристик показал, что более чем в 46 % случаев высота значительных волн $h_s \leq 0,5$ м. Волны высотой $h_s = 1$ м возникают в 12 % случаев, а повторяемость волн высотой $h_s \geq 2,5$ м – 1,3 %. В интервал 3,0–4,0 с входит более 13 % всех значений средних периодов волн. В большинстве случаев волны в исследуемый

район приходят с восточного направления (повторяемость 23 %). Наиболее высокие ветровые волны подходят к району Гурзуфа с востока и юга. Самые продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе. Минимальная продолжительность штормов отмечается в июне – июле.

По данным ретроспективных расчетов получены экстремальные значения волновых характеристик для штормов режимной обеспеченности 10, 4, 2 и 1 %. В частности, для шторма 1 %-ной режимной обеспеченности средняя высота волн, средний период волн и средняя длина волн соответственно равны: 4,1 м; 10,5 с; 169 м.

Работа выполнена в рамках научной темы МГИ № FNNN-2021-0005. Математическое моделирование осуществлено на вычислительном кластере МГИ (www.hpc-mhi.org).

Список литературы

1. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // J. Geophys. Res. 1999. 104(C4). P. 7649–7666.
2. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доклады НАН Украины. 2011. № 8. С. 108–112.
3. Divinskii B., Fomin V., Kosyan R., Lazorenko D. Maximum Waves in the Black Sea // 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: Mediterranean Coastal Foundation (MEDCOAST Foundation), 2019. Vol. 2. P. 799–810.
4. Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 255 с.
5. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabini V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights // World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041. 2000.
6. РД 52.10.865-2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения, Москва, 2018, 58 с.

WIND WAVES REGIME IN THE GURZUF REGION (SOUTHERN COAST OF CRIMEA)

I.N. Fomina¹, A.A. Polozok², V.V. Fomin²

¹ N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol
polozok.umi@gmail.com

Abstract. 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 paper, the regime characteristics of wind waves in the Gurzuf region (Southern coast of Crimea) are studied on the basis of mathematical modeling. As 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 SWAN spectral wave model on an unstructured grid. Wind forcing was set according to ERA-Interim and ERA5 atmospheric reanalyses. On the basis of statistical processing of modeling results for the study area, information was obtained on the frequency of wave elements, the duration of storm and calm situations, and extreme wave characteristics. An analysis of operational characteristics showed that in more than 46 % of cases, the height of significant waves does not exceed 0.5 meters. Waves with a height of 1 m occur in 12 % of cases, and the frequency of waves with a height of ≥ 2.5 m is 1.3 %. In most cases, waves in the study area come from the east (recurrence 23 %), the highest wind waves approach the Gurzuf coastline from the east and south. For storms that are possible once every 25 years, the value is about 7 m. The longest storm situations occur in December-January. The minimum duration of storms is observed in June-July.

Keywords: Black Sea, coastal zone of Gurzuf, wind waves, mathematical modeling, SWAN, statistical characteristics

References

1. Booij. N., Ris. R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. *J. Geophys. Res.* 1999. 104(C4). P. 7649–7666.
2. Polonsky A., Fomin V., Garmashov A. Characteristics of the Black Sea wind waves. *Doklady Natsional'noi Akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2011. No. 8. P. 108–112. (In Russian).
3. Divinskii B., Fomin V., Kosyan R., Lazorenko D. Maximum Waves in the Black Sea. Proceedings of the 14th Int. MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019). Mugla, Turkey: Mediterranean Coastal Foundation (MEDCOAST Foundation), 2019. Vol. 2. P. 799–810.
4. Krylov Yu. *Spektral'nye metody issledovaniia i rascheta vetrovykh voln*. Spectral methods for the study and calculation of wind waves, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. 255 p. (In Russian).
5. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights. World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD-No. 1041. 2000.
6. Guidance document 52.10.865-2017. Guidelines for calculating the regime characteristics of sea wind waves. Moscow, 2018. 58 p. (In Russian).