

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-24-40>

УДК 551.466.3

Использование классификации для анализа сезонной изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях

***А.Д. Рыбалко¹, С.А. Мысленков²,
В.С. Архипкин²***

*¹ Институт океанологии имени П.П. Шириова
Российской академии наук, г. Москва, Россия;*

*² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия
rybalko.ad@ocean.ru*

На примере 2020 года исследована сезонная изменчивость частотных спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях. Для этого выбраны 8 точек, представляющих районы с разными физико-географическими характеристиками и режимами ветрового волнения. В этих точках были проанализированы частотные спектры, полученные с помощью модели WAVEWATCH III. Для описания изменчивости спектров на основе кластерного анализа были определены 23 референтных спектра, по которым проводилась классификация. Классы отличались друг от друга по частоте основного пика и по значению максимума спектральной плотности. Показано, что в Азовском море преобладают спектры с низкой спектральной плотностью с частотой пика выше 0.2 Гц. Даже в холодную часть года частота пиков спектральной плотности в среднем больше 0.15 Гц, а значения спектральной плотности редко превышают 2 м²/Гц. Частота пика спектральной плотности в Черном море во все сезоны превышает 0.1 Гц. Значения спектральной плотности более 5 м²/Гц встречаются в основном в холодную половину года. Дополнительно была проанализирована повторяемость классов по сезонам в зависимости от направления распространения волн. Показано, что доминирующее направление не всегда совпадает с направлением распространения волн, спектры которых имеют наибольшую спектральную плотность.

Ключевые слова: Черное море, Азовское море, сезонная изменчивость ветрового волнения, частотные спектры ветровых волн, референтные спектры, классификация спектров

Analysis of seasonal variability in wind wave spectra in the Black and Azov Seas based on classification

A.D. Rybalko¹, S.A. Myslenkov², V.S. Arkhipkin²

*¹ Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia;*

*² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
rybalko.ad@ocean.ru*

Based on year 2020, the seasonal variability of wind wave frequency spectra in the Black and Azov Seas is studied. Eight points representing areas with different characteristics and wind wave regimes were selected for analysis. Frequency spectra for these points were obtained using the WAVEWATCH III model. To describe the variability of the spectra, 23 reference spectra were identified based on cluster analysis for further classification. The classes differed from each other in terms of the peak frequency and the value of the maximum spectral density. It was shown that in the Sea of Azov, spectra with low spectral density and peak frequencies above 0.2 Hz predominate. Even during the cold season, the peak frequency generally exceeds 0.15 Hz, and spectral density values rarely exceed 2 m²/Hz. In the Black Sea, the peak frequency exceeds 0.1 Hz in all seasons. Spectral density values exceeding 5 m²/Hz are primarily observed during the cold half of the year. Additionally, the classes repeatability depending on the direction of wave propagation across seasons was analyzed. It was shown that the dominant direction does not always coincide with the direction of wave propagation, whose spectra have the highest spectral density.

Keywords: Black Sea, Sea of Azov, seasonal variability of wind waves, frequency spectra of wind waves, reference spectra, spectra classification

Введение

Для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации инженерных сооружений, подверженных длительному воздействию морской среды, предпочтительнее изучать волновые спектры, так как информации об интегральных параметрах (высота волн, период, длина и т. д.) бывает недостаточно [21]. Например, для судов в море низкочастотные волны зыби не представляют большой опасности, однако зыбь может представлять угрозу для судов, заякоренных в гаванях и бухтах [17]. Спектры ветрового волнения несут в себе наиболее полную информацию о взволнованной морской поверхности, позволяя, кроме интегральных параметров, получать распределения спектральной плотности по частотам (и направлениям). В работе [22, рис. 1] наглядно продемонстрировано, что при одинаковой значительной высоте волн формы спектров могут существенно отличаться в зависимости от продолжительности и силы ветра, стадии нарастания и затухания шторма, наличия зыби.

Один из методов описания изменчивости спектров ветрового волнения – классификация по референтным спектрам. Например, в [22] было предложено описывать частотные спектры шестью параметрами: высотой волн, модальной частотой и параметрами, контролирующими форму спектра для высокочастотной и низкочастотной частей спектра. Исследования проводились на 800 измеренных частотных спектрах, которые были разделены на 10 групп, внутри которых выделялся наиболее вероятный математический спектр и 10 дополнительных. Эти выделенные спектры были приняты в качестве репрезентативных для каждой группы. Эта же методика была применена в [18] для обнаружения наиболее репрезентативного спектра для каждого месяца в прибрежной зоне на северо-западном побережье

Австралии. В [1, 13] с помощью разработанной классификации исследовались частотно-направленные модельные спектры. Основой классификации являлось разделение спектра на собственно ветровое волнение и зыбь на основе безразмерного параметра крутизны [26]. В результате все модельные спектры делились на пять классов: собственно ветровые волны, волны зыби, два класса, характеризующиеся сочетанием ветровых волн и зыби, а также класс с многопиковыми спектрами. Авторы рассматривали как повторяемость классов, так и повторяемость переходов между классами в конкретных точках Мирового океана.

В [17] был предложен принципиально другой подход к поиску репрезентативных частотных спектров. Автор проводил кластерный анализ без предварительной обработки и предварительной информации о форме спектра, статистических распределениях или других параметрах. Основным критерием при кластеризации была форма спектра. Для частотных спектров с диапазоном высот волн от 0.5 до 1.5 м было выделено 20 кластеров, для которых был найден репрезентативный спектр как среднее от 1/3 наибольших значений спектральной плотности в частотных интервалах и определены условия, способствующие формированию спектров в этом кластере.

В Черном и Азовском морях ветровое волнение хорошо изучено на основе интегральных параметров. Среди исследований, посвященных частотным и частотно-направленным спектрам ветрового волнения в данных акваториях следует отметить, например, такие работы, как [10, 19, 29]. В исследовании [1] на основе модельных расчетов исследуется повторяемость классов частотно-направленных спектров морей России, в том числе Черного и Азовского.

Целью данной работы является исследование сезонной изменчивости частотных спектров в Черном и Азовском морях на основе специально разработанной классификации на примере 2020 года. Анализ изменчивости интегральных параметров ветрового волнения в исследуемых акваториях показал, что 2020 год не демонстрирует аномалий поля ветрового волнения, а следовательно, может быть тестовым.

В 2020 году наблюдалось усиление волновой активности в холодную часть года и отсутствие сильного ветра волн летом, что характерно для сезонной изменчивости ветрового волнения в исследуемых акваториях. Эта работа продолжает опубликованное ранее исследование [23], в котором была проанализирована пространственная изменчивость наиболее повторяемых классов частотных спектров в данных акваториях на нерегулярной вычислительной сетке с высоким пространственным разрешением. В настоящей работе изменчивость повторяемости классов по сезонам года рассмотрена подробнее на примере нескольких репрезентативных точек, а также проанализирована повторяемость классов по сезонам в зависимости от направления распространения волн.

Материалы и методы

Модельные данные

Для расчетов частотных спектров ветрового волнения в выбранных точках была использована спектральная волновая модель WAVEWATCH III [25]. Спектральное разрешение составило 36 направлений с шагом 10° . Частотный диапазон составил 36 интервалов от 0.03 до 0.84 Гц. Рельеф дна, задаваемый в модель, был получен в результате оцифровки карт Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны России. В качестве основных входных данных задавались поля ветра на высоте 10 метров из реанализа NCEP/CFSv2 [24]. Шаг данных о ветре по времени составлял 1 час, пространственное разрешение было равно $\sim 0.2^\circ$. Дополнительно для Азовского моря задавались данные о концентрации морского льда, полученные из реанализа ESA SST CCI and C3S [14] и откорректированные по экспертным ледовым картам Гидрометцентра России [4]. Шаг реанализа по пространству составлял 0.05° , шаг по времени – 1 сутки. Оценка качества воспроизведения моделью интегральных параметров для данной реализации приводилась в [12]. Оценка качества моделирования частотных спектров была выполнена ранее и описана в [11]. С более подробным описанием настройки модели можно ознакомиться в [23].

Район исследования. Выбор точек для анализа

Для рассмотрения сезонной изменчивости частотных спектров в исследуемых акваториях были выбраны восемь точек (рис. 1), характеризующихся разными физико-географическими условиями и разным режимом ветрового волнения.

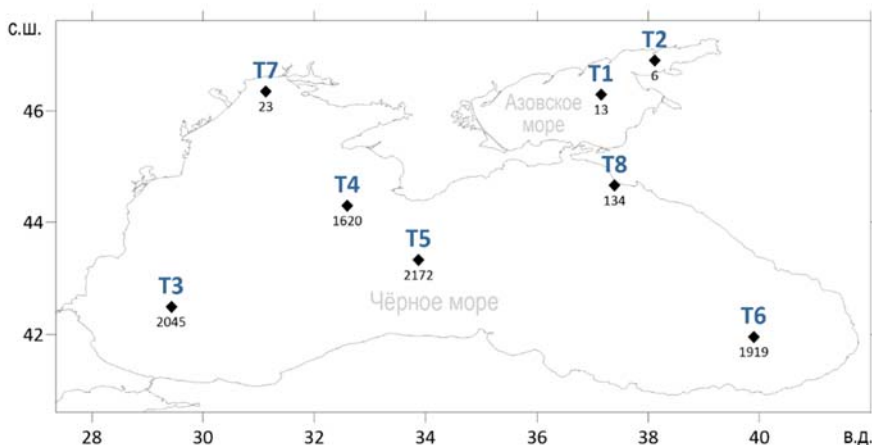


Рис. 1. Местоположение точек для анализа сезонной изменчивости частотных спектров. Черным подписаны глубины в метрах.

Fig. 1. The location of points for analyzing the seasonal variability of frequency spectra. Depths in meters are labeled in black.

В Азовском море это точка Т1 (46.3° с. ш., 37.1° в. д.), расположенная в «глубоководной» части Азовского моря (12.52 м), и точка Т2 (46.9° с. ш., 38.1° в. д.), расположенная в Таганрогском заливе с глубиной 5.9 м. К факторам, влияющим на ветровое волнение в Азовском море, относятся в первую очередь малые глубины и малые размеры моря. Для всей акватории Азовского моря характерно воздействие отрога Сибирского антициклона в осенне-зимнее время. Антициклон обуславливает преобладание северо-восточных и восточных ветров со средней скоростью 4–7 м/с [3]. Направление ветра и волн в данной статье рассматривается в варианте «откуда». Усиление интенсивности отрога циклона приводит к развитию сильных ветров со скоростью 15 м/с и более. В теплый период акватория находится под действием отрога Азорского максимума. Преобладают неустойчивые по направлению ветры со средними скоростями 3–5 м/с. Характерны в этот сезон также юго-западные и западные ветры со скоростями 4–6 м/с, вызванные прохождением средиземноморских циклонов [3]. Азовское море относится к замерзающим морям, ледообразование начинается с Таганрогского залива, где, согласно среднесезонным данным, лед появляется в конце ноября. Полное очищение ото льда происходит в конце марта [2, 8]. Максимальная высота волн в точке Т1, согласно многолетним модельным данным, достигает около 3 м в зимние месяцы, а летом – до 1.7 м. В данной статье под высотой волн подразумевается высота значительных волн. В точке Т2 максимальная высота волн зимой составляет до 1.3 м, а летом даже максимальные высоты волн составляют менее 1 м [28].

В Черном море рассматривались шесть точек с разными физико-географическими особенностями. Основные черты ветрового режима над Черным морем определяются взаимодействием Азиатского минимума, Азорского и Сибирского максимумов и Средиземноморского зимнего циклона [3]. Точки Т3, Т4, Т5 и Т6 относятся к глубоководной части Черного моря. Точка Т3 имеет глубину более 2 тыс. м и располагается в западном районе акватории, характеризующемся наиболее интенсивным ветровым волнением [7, 9]. Зимой средняя скорость ветра составляет около 7–8 м/с [3, 9] с преобладанием северо-восточного направления. Средняя высота волн в зимний сезон здесь составляет 1.4–1.6 м [9]. Развитие ветров со скоростью более 10 м/с связано в основном с прохождением циклонов [3]. Летом средняя скорость ветра ниже и составляет 5 м/с [3, 9]. Средняя высота волн для этого сезона составляет 0.8 м, преобладает северное и северо-восточное направление. Точки Т4 и Т5 могут быть отнесены к центральным частям акватории, их глубина составляет 1620 и 2172 м соответственно. Ветроволновые условия для этого района схожи с условиями в районе точки Т3, только зимой преобладает восточное направление ветра и волн, согласно [9]. Точка Т6 имеет глубину 1919 м и расположена в восточной части акватории. Зимой скорости ветра здесь ниже, чем в западной части, в среднем до 4.5 м/с. Средняя высота волн составляет около 1 м, преобладают волны с севера. Летом район характеризуется частыми штилевыми условиями.

Средняя высота волн в этот сезон составляет 0.6–0.8 м [9]. Точка Т7 расположена на северо-западном шельфе Черного моря, ее глубина составляет 22.64 м. Зимой в этом районе средние скорости ветра равны 8 м/с, что выше, чем над другими районами Черного моря. Однако средняя высота волн составляет около 0.6–0.8 м. Среднее направление волн, согласно [9], восточное и юго-восточное. Летом средняя высота волн менее 0.5 м. Точка Т8 находится в прибрежной зоне северо-восточной части акватории. Этот район побережья характеризуется узким шельфом с большим уклоном дна (до 30°) [6], глубина в точке Т8 составляет 133.5 м. Зимой скорости ветра в районе в среднем составляют 7 м/с, средняя высота волн – 0.8 м [9, 16]. Летом эти значения ниже. Значительное влияние на район оказывает местный ветер – Новороссийская бора [5].

В результате моделирования для этих восьми точек были получены ряды частотных спектров ветрового волнения с шагом по времени 3 часа для 2020 года.

Методика классификации

Разработка классификации проходила в три этапа: кластеризация выборки частотных спектров без предварительной обработки спектров, поиск референтных спектров для каждого кластера, классификация всего массива данных по референтным спектрам. Для проведения классификации необходимо заранее задать форму характерных спектров, например, из эксперимента JONSWAP, однако в конкретных условиях Черного и Азовского морей набор спектров другой, так как большинство спектров имеют небольшую максимальную спектральную плотность и частоты основного пика выше, чем, например, в открытых частях Мирового океана. Кластерный анализ позволяет выбрать необходимое количество эталонов, в результате чего можно проводить классификацию с учетом региональных особенностей. На первом этапе к выборке частотных спектров в Черном и Азовском морях был применен иерархический агломеративный кластерный анализ с использованием евклидового расстояния [15]. Для объединения кластеров по выбранным расстояниям использовался метод Уорда (метод минимальной дисперсии) [27]. В результате были получены 23 кластера, отличающиеся по частоте основного пика, максимальному значению спектральной плотности и форме спектра. Далее для каждого кластера был определен референтный спектр как наиболее близкий модельный спектр к среднему значению спектральной плотности на каждой частоте. Эти 23 референтных спектра представлены на рис. 2, а краткие характеристики полученных на их основе классов с некоторым диапазоном частот пиков и максимумов спектральной плотности представлены в табл. 1. На последнем этапе каждый модельный спектр за каждый срок был отнесен к одному из 23 классов путем нахождения минимального

расстояния Махаланобиса [20] между спектром, который необходимо классифицировать, и референтным спектром. Подробнее о методике классификации и, в частности, создании выборки написано в [23].

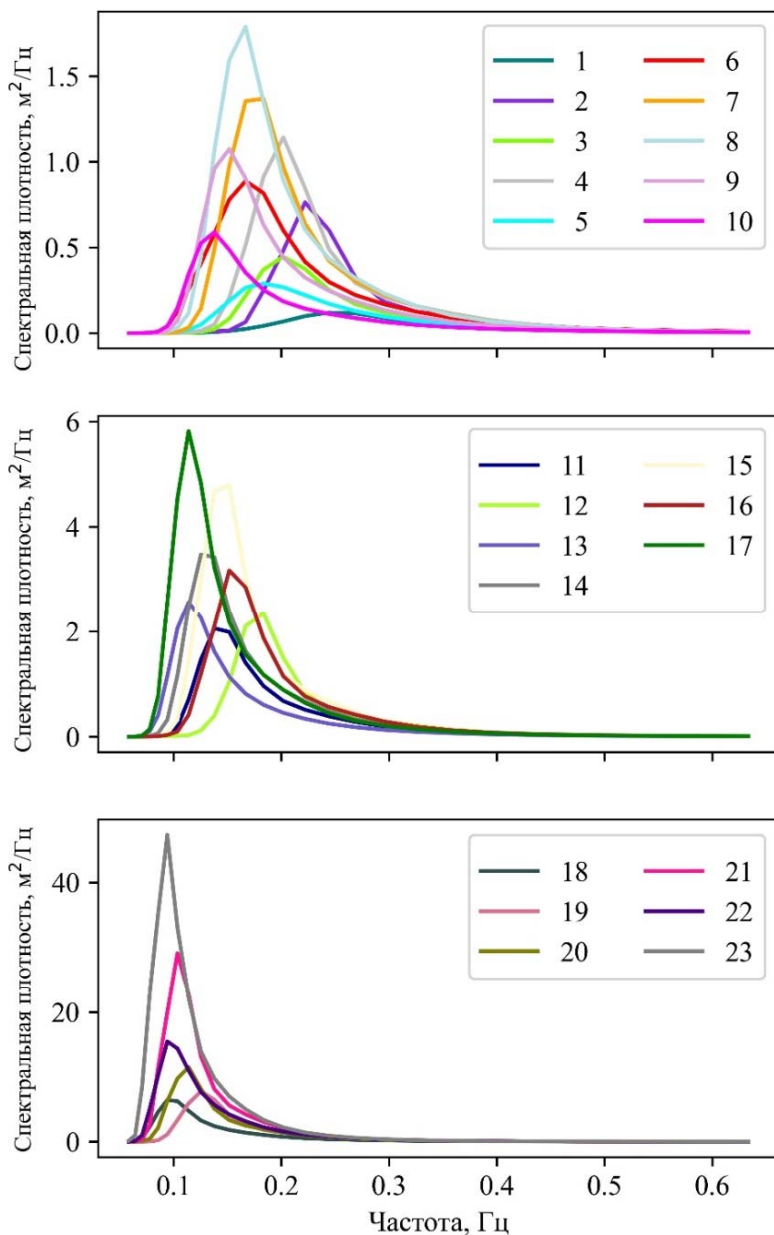


Рис. 2. Референтные спектры, по которым выполнялась классификация.
Fig. 2. Reference spectra used for classification.

Таблица 1. Характеристики выделенных классов
Table 1. Characteristics of the identified classes

Номер класса	Средняя частота основного пика в классе, Гц	Среднее значения максимума спектральной плотности в классе, м ² /Гц	Примерный диапазон значений максимума спектральной плотности в классе, м ² /Гц
1	0.25	0.15	до 0.30
2	0.22	0.76	0.30–0.85
3	0.20	0.44	0.20–0.65
4	0.20	1.14	0.65–1.35
5	0.18	0.30	0.20–0.60
6	0.17	0.90	0.60–1.05
7	0.18	1.35	1.05–1.55
8	0.17	1.79	1.15–1.95
9	0.15	1.03	0.65–1.40
10	0.14	0.60	0.20–0.80
11	0.14	2.05	1.00–3.20
12	0.18	2.34	1.00–2.75
13	0.10	2.50	1.25–3.75
14	0.12	3.26	2.25–5.00
15	0.15	4.08	3.15–6.00
16	0.12	3.31	2.05–4.15
17	0.11	5.09	3.95–8.85
18	0.09	6.27	5.00–9.25
19	0.12	7.65	6.15–9.25
20	0.11	10.98	7.00–13.5
21	0.10	29.00	12.00–35.00
22	0.094	15.46	9.00–25.00
23	0.09	47.00	более 25

Визуальный анализ результатов классификации показал, что при выполнении классификации в первую очередь учитывалась частота максимума спектральной плотности, а затем – само значение максимума спектральной плотности. Классы нумеровались от характеризующихся наибольшей частотой максимума спектральной плотности (самых коротких волн) до наименьшей частоты максимума (длинных волн), а внутри каждой частоты дополнительно выделялись классы по значению максимума спектральной плотности. Таким образом, например, классы 3 и 4, 5 и 6 являются парными, характеризующимися примерно одним значением частоты основного пика, но разными значениями спектральной плотности. К классу 1 были также отнесены все спектры со спектральной плотностью

до $0.2 \text{ м}^2/\text{Гц}$ независимо от частоты основного пика. Такие небольшие значения спектральной плотности не представляют интереса с практической точки зрения. Тестовые расчеты показали, что спектры этого класса образуются при малых скоростях ветра, в среднем до 3–4 м/с. Классы 20–23 встречаются редко в Черном море при сильных штормах.

Предложенная классификация учитывает развитие спектров морского волнения при разных скорости и продолжительности действия ветра и разгоне. Финальное количество референтных спектров и, соответственно, классов было определено путем тестирования разного количества кластеров. Именно такое количество классов позволило подробно рассматривать изменчивость частотных спектров ветровых волн в исследуемых акваториях. Необходимо отметить, что спектры ветровых волн при классификации рассматривались как однопиковые. Предыдущее исследование [23] показало, что спектры, максимальная спектральная плотность которых превышает $0.2 \text{ м}^2/\text{Гц}$ и у которых выявляется два или более пиков, в Азовском море в 2020 г. отсутствуют, а в Черном море их количество в среднем не превышает 1.5 %. Поэтому такое допущение представляется оправданным.

Результаты

Сезонная изменчивость спектров

Для определения сезонной изменчивости спектров ветрового волнения на примере 2020 г. было рассмотрено распределение спектров по классам в каждом конкретном месяце (рис. 3).

Для точек Азовского моря характерно небольшое количество классов, особенно в точке Т2. В 2020 г. в точке Т1, в «глубоководной» части Азовского моря, во все месяцы присутствуют спектры классов 1, 2 и 4 (кроме августа, в котором класс 4 отсутствует), однако сезонная изменчивость этих классов отличается. Класс 1 хотя и преобладает во все месяцы, имеет разную долю в зависимости от сезона: в летние месяцы его доля от всех случаев максимальна, а в зимние месяцы, наоборот, минимальна. Классы 2 и 4, напротив, чаще встречаются в зимние месяцы, а в летние их доля меньше. Класс 3 отсутствует в летние месяцы, сентябре и ноябре. В холодную половину года обнаруживается класс 12, а в феврале классы 15 и 16. Это свидетельствует о преобладании во все сезоны спектров с частотой основного пика более 0.2 Гц , то есть коротких и невысоких волн. Спектры со спектральной плотностью более $2 \text{ м}^2/\text{Гц}$ обнаруживаются с ноября по май, частота пика этих спектров более 0.15 Гц .

В точке Т2 наибольшее количество классов спектров было обнаружено в феврале. В этом месяце, кроме класса 1, который является наименее энергонесущим и составляет в точке Т2 свыше 93 % от всех случаев, был обнаружен класс 2 и отдельные случаи классов 4, 7, 8 и 12. Классы 2 и 4 также были обнаружены в январе, апреле и мае. В апреле, кроме названных классов, был определен класс 3. Во все остальные месяцы был выявлен

только класс 1. Это свидетельствует о том, что в Таганрогском заливе на протяжении всего года преобладают короткие и невысокие волны, частота основного пика спектральной плотности на протяжении всего года больше 0.2 Гц, кроме отдельных случаев в зимние месяцы, когда частота составляет около 0.18 Гц. Спектральная плотность составляет в основном до $0.5 \text{ м}^2/\text{Гц}$ и лишь в отдельных случаях – около $1 \text{ м}^2/\text{Гц}$.

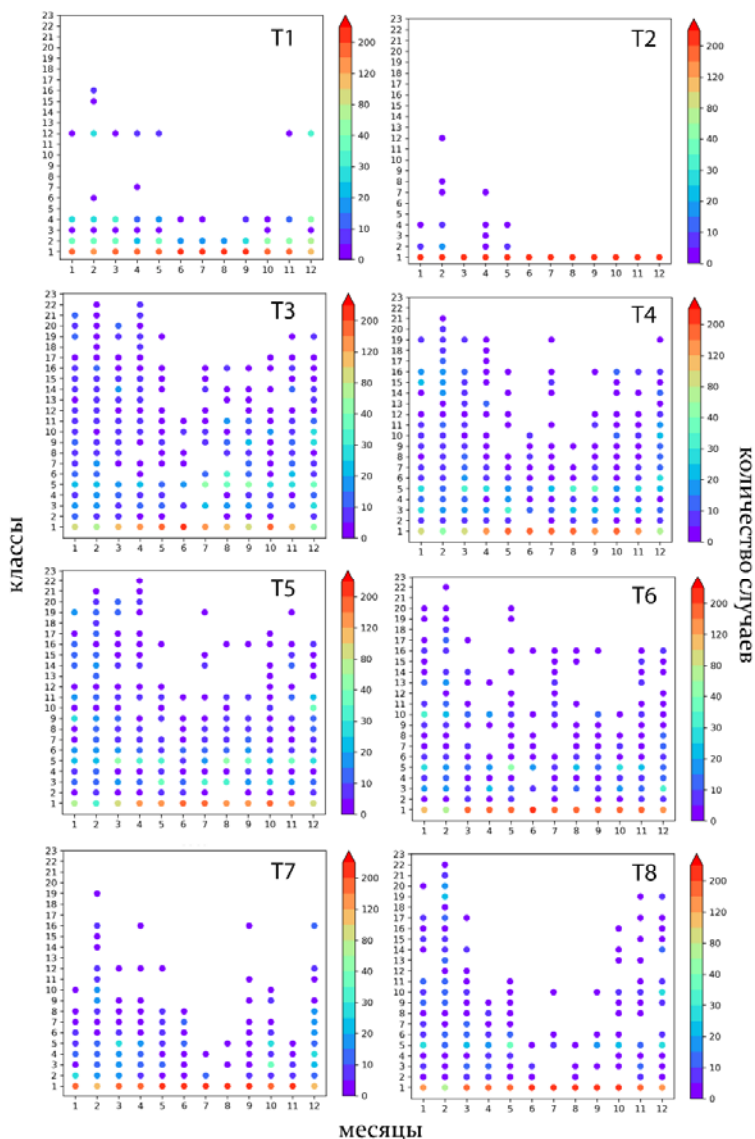


Рис. 3. Количество частотных спектров (цвет шкалы) в каждом конкретном классе по месяцам в исследуемых точках.

Fig. 3. The number of frequency spectra (color scale) in each class per each month at the investigated points.

В точках Т3, Т4 и Т5, которые относятся к западной и центральной глубоководным частям Черного моря, сезонная изменчивость классов имеет общие черты. В зимние месяцы обнаруживается большее количество классов, чем в летние. Класс 1 преобладает во все месяцы, однако его доля в летние месяцы больше, чем в холодную половину года. Во все месяцы также встречаются классы 3 и 5, спектральная плотность которых низка, до $0.65 \text{ м}^2/\text{Гц}$. Интересно, что в точке Т3 доля класса 5 выше летом, чем в зимние месяцы. Классы 2, 4 и 6, где частота максимума спектральной плотности в среднем соответствует частотам в классах 1, 3 и 5 соответственно, а значение спектральной плотности выше (до $1.35 \text{ м}^2/\text{Гц}$), встречаются чаще в холодное время года. Классы, для которых характерны максимумы спектральной плотности более $5 \text{ м}^2/\text{Гц}$ (т. е. класс 17 и выше), характерны для зимних и первых весенних месяцев, однако в отдельных случаях встречаются и теплое время года. В точке Т3 во все месяцы 2020 г. были выявлены классы 10 и 11, частота основного пика которых равна около 0.14 Гц . И почти во все месяцы встречались классы 8, 9, 12, частота основного пика которых составляет от 0.15 до 0.18 и значение спектральной плотности до $1.4\text{--}2.75 \text{ м}^2/\text{Гц}$, и классы 14 и 16 с частотой максимума спектральной плотности около 0.12 Гц и значением спектральной плотности до $4.5\text{--}5 \text{ м}^2/\text{Гц}$. В точке Т5 во все месяцы встречаются, кроме уже перечисленных, классы 7, 9, 11 и почти во все месяцы – класс 8. Значения спектральной плотности этих классов в среднем более $1 \text{ м}^2/\text{Гц}$. В точке Т4 классов с наибольшими спектральными плотностями меньше. В точке Т6, которая находится в восточной части акватории, первые классы с 1 по 5 имеют такие же закономерности в сезонной изменчивости, как и в других точках в глубоководной части Черного моря. Классы 17 и выше обнаруживаются только в январе, феврале, марте и мае.

В точке Т7, которая относится к северо-западному шельфу, класс 1 – единственный класс, обнаруживаемый во все месяцы 2020 г. Также почти во все месяцы встречаются 2, 3, 4 и 5, но их доля во все месяцы значительно меньше, чем у класса 1. Только в феврале встречается класс со средним значением спектральной плотности выше $5 \text{ м}^2/\text{Гц}$, это класс 19. В точке Т8 сохраняются черты сезонной изменчивости классов, характерные и для других точек Черного моря. Зимние месяцы, среди которых особенно выделяется февраль, характеризуются обнаружением классов с большой спектральной плотностью. В июне, июле и августе встречаются только отдельные случаи классов 2, 3, 5, 6 и 10.

Таким образом, в Черном море выделяется большее количество классов спектров, чем в Азовском море, что объясняется разницей в размерах бассейнов. Чем больше глубина точки в Черном море, тем больше классов в ней обнаруживается. Существует выраженная сезонная изменчивость спектров ветрового волнения – в летние месяцы во всех точках значения максимума спектральной плотности ниже, чем в зимние месяцы. Даже

в зимние месяцы частота максимума спектральной плотности в основном больше 0.1 Гц, лишь в отдельных случаях частота равна или меньше этого значения.

Сезонная изменчивость спектров по направлениям

Для точек Т1, Т5 и Т8 была также рассмотрена сезонная изменчивость спектров ветрового волнения в зависимости от направления распространения волн. В качестве направления было взято направление максимума спектральной плотности. На рис. 4 показаны «розы спектров», где цветом отмечены классы спектров ветрового волнения.

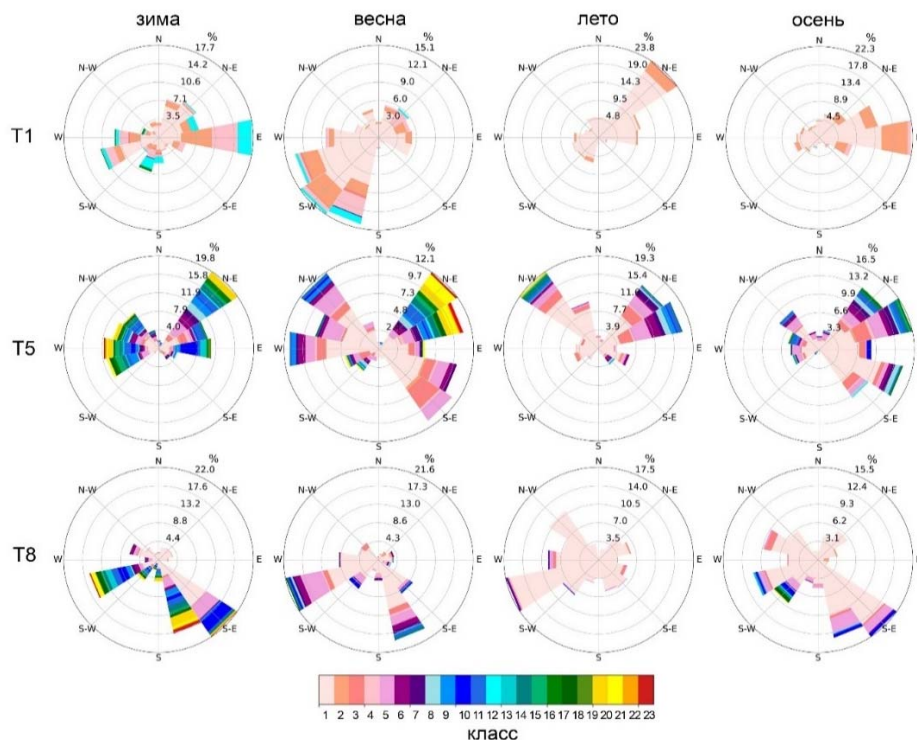


Рис. 4. Повторяемость классов спектров ветрового волнения по направлениям за сезоны в 2020 г.

Fig. 4. Repeatability of wind wave spectrum classes by directions for the seasons of 2020.

В точке Т1, которая располагается в «глубоководной» части Азовского моря, зимой преобладают волны восточного направления, однако спектры классов 15 и 16, которые имеют наибольшую спектральную плотность из всех выявленных в данной точке, приходят с юго-западного сектора. Весной юго-западные волны преобладают над остальными направлениями.

Летом преобладающее направление меняется и становится северо-восточным. Распределение повторяемости по направлениям осенью схоже с зимним, однако спектральная плотность в это время года ниже, чем зимой.

В точке T5, располагающейся в центральной глубоководной части Черного моря, во все сезоны практически отсутствуют волны с южного сектора, а также волны с севера. Спектры ветрового волнения, имеющие спектральную плотность более $5 \text{ м}^2/\text{Гц}$, приходят зимой с нескольких направлений: с западного сектора, с северо-востока и в меньшей степени – с востока. Весной наиболее энергонесущие спектры наблюдаются с северо-востока, а летом – с северо-запада. Интересно, что, как и в точке T1, осенью спектры ветрового волнения в точке T5 имеют меньшую спектральную плотность, чем весной. Однако это может быть особенностью конкретно 2020 года.

В точке T8, расположенной близ побережья в северо-восточной части Черного моря, во все сезоны преобладают волны с юго-востока и западно-юго-запада, за исключением лета, когда преобладает северо-западное направление волн. Как и ожидалось, расположение прибрежной линии препятствует образованию волн с северо-восточного сектора, а редкие спектры этого направления относятся к классу I.

Таким образом, учет направлений при анализе повторяемости классов позволяет оценивать повторяемость прохождения волн с той или иной частотой основного пика и значением максимума спектральной плотности с разных направлений, что может иметь большую практическую значимость. Одни и те же классы могут приходиться с разных направлений, однако существует сезонная изменчивость. Важно отметить, что выборка спектров за 1 год не является достаточной для достоверной оценки сезонной изменчивости, необходим анализ более продолжительного ряда.

Заключение

В ходе исследования была изучена сезонная изменчивость спектров ветрового волнения в 2020 году в Черном и Азовском морях на примере восьми репрезентативных точек в исследуемых акваториях. Точки для анализа выбирались таким образом, чтобы были представлены разные характерные ветро-волновые условия, районы открытых и глубоководных частей и прибрежные зоны рассматриваемых морей. Частотные спектры ветрового волнения были получены с помощью спектральной волновой модели WAVEWATCH III.

На основе кластерного анализа были выделены 23 референтных частотных спектра, отличающиеся друг от друга по спектральной энергии и частоте основного пика. На основе этих спектров, путем вычисления расстояния Махаланобиса, были классифицированы частотные спектры в рассматриваемых точках.

В Азовском море во все сезоны преобладают спектры с частотой основного пика более 0.2 Гц и с низкой спектральной плотностью. Спектры

со значением спектральной плотности более $2 \text{ м}^2/\text{Гц}$ обнаруживаются в «глубоководной» части моря с ноября по май, частота пика этих спектров более 0.15 Гц . В Таганрогском заливе на протяжении всего года преобладают короткие и невысокие волны, частота основного пика спектральной плотности во все сезоны больше 0.2 Гц , кроме отдельных случаев в холодное время года, когда частота составляет около 0.18 Гц . Спектральная плотность составляет в основном до $0.5 \text{ м}^2/\text{Гц}$ и лишь в отдельных случаях – около $1 \text{ м}^2/\text{Гц}$.

В Черном море выделяется большее количество классов, чем в Азовском море. Наблюдается выраженная сезонная изменчивость спектров ветрового волнения – в летние месяцы во всех точках значения максимума спектральной плотности ниже, чем в зимние месяцы. В глубоководных частях Черного моря обнаруживается большее количество классов, и спектральная плотность в них, в целом, выше. Спектры со значениями спектральной плотности более $5 \text{ м}^2/\text{Гц}$ встречаются в основном в холодную половину года, в зимние месяцы и первые весенние, однако в отдельных случаях встречаются и в теплое время года. Даже в зимние месяцы частота максимума спектральной плотности в основном больше 0.1 Гц , лишь в отдельных случаях частота равна или меньше этого значения.

Преобладающее направление волн в рассмотренных точках разнится по сезонам, причем не всегда доминирующее направление совпадает с направлением распространения волн, спектры которых имеют наибольшую спектральную плотность.

В дальнейшем планируется использовать предложенную методику для анализа продолжительных рядов (40 лет) спектров ветрового волнения в рассматриваемых морях.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания № FMWE-2022-0002.

Список литературы

1. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышѣва Е.С. Климатические спектры ветрового волнения, включая экстремальные ситуации // *Океанология*. 2013. Т. 53, №. 3. С. 304-312.
2. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 218 с.
3. Добровольский А.Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Издательство МГУ, 1982. 192 с.
4. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. Оперативный модуль ЕСИМО. Ледовые условия в Азовском море. (http://193.7.160.230/web/esimo/azov/ice/ice_azov.php?date=19.03.2012).
5. Иванов А.Ю. Новороссийская бора: взгляд из космоса // *Исследование Земли из космоса*. 2008. №. 2. С. 68-83.
6. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт, 2011. 212 с.

7. Мысленков С.А., Столярова Е.В., Гиппиус Ф.Н. Оценка ресурсов энергии волн в Черном море // Науки о Земле. 2018. №. 2. С. 21-32.
8. Яцкая Н.А., Магаева А.А. Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв. // Лёд и снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 373-386.
9. Akpinar A., Bingölbali B., Van Vledder G. P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds // Ocean Engineering. 2016. Vol. 126. P. 276-298.
10. Amarouche K., Akpinar A. Long-term characterisation of directional wave spectra in the Black Sea and the Sea of Azov // Applied Ocean Research. 2023. Vol. 141. P. 103783.
11. Amarouche K., Akpinar A., Rybalko A., Myslenkov S. Assessment of SWAN and WAVEWATCH-III models regarding the directional wave spectra estimates based on Eastern Black Sea measurements // Ocean Engineering. 2023. Vol. 272. P. 113944.
12. Amarouche K., Akpinar A., Soran M.B. et al. Spatial calibration of an unstructured SWAN model forced with CFSR and ERA5 winds for the Black and Azov Seas // Applied Ocean Research. 2021. Vol. 117. P. 102962.
13. Boukhanovsky A.V., Lopatoukhin L.J., Soares C.G. Spectral wave climate of the North Sea // Applied Ocean Research. 2007. Vol. 29, no. 3. P. 146-154.
14. ESA SST CCI and C3S reprocessed sea surface temperature analyses // Copernicus Marine Service (https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_024/description).
15. Everitt B.S. Cluster Analysis // Halsted-Heinemann: London, 1980. 170 p.
16. Gippius F.N., Myslenkov S.A. Black Sea wind wave climate with a focus on coastal regions // Ocean Engineering. 2020. Vol. 218. P. 108199.
17. Hamilton L.J. Characterising spectral sea wave conditions with statistical clustering of actual spectra // Applied Ocean Research. 2010. Vol. 32, no. 3. P. 332-342.
18. Hamilton L.J. Methods to obtain representative surface wave spectra, illustrated for two ports of north-western Australia // Marine and freshwater research. 1997. Vol. 48, no. 1. P. 43-57.
19. Kos'yan R.D., Divinsky B.V., Pushkarev O.V. Measurements of parameters of wave processes in the open sea near Gelendzhik // The Eight Workshop of NATO TU-WAVES/Black Sea. Ankara, Turkey: Middle East Technical University. 1998. P. 5-6.
20. Mahalanobis P.Ch. On the generalised distance in statistics // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. 1936. Vol. 2, no 1. P. 49-55.
21. Mansour A.E., Ertekin R.C. Report of technical committee I. 1 environment // Proceedings of the 15th international ship and offshore structures congress. 2003. Vol. 1. P. 24.
22. Ochi M.K., Hubble E.N. Six-parameter wave spectra // Coastal Engineering. 1976. P. 301-328.
23. Rybalko A, Myslenkov S., Arkhipkin V. Seasonal variability of wind wave spectra in the Black Sea and Sea of Azov. Oceanology. 2023. Vol. 63. Suppl. 1. P. S72-S82.
24. Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP climate forecast system version 2 // Journal of Climate. 2014. Vol. 27, no. 6. P. 2185-2208.
25. Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07. – Tech. Note 333, March 2019. NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/> (accessed on 18 December 2020).
26. Wang D.W., Hwang P.A. An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. Vol. 18, no. 12. P. 2052-2062.

27. Ward Jr. J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. 1963. Vol. 58, no. 301. P. 236-244.

28. Yaitskaya N. The wave climate of the Sea of Azov // Water. 2022. Vol. 14, no. 4. P. 555.

29. Yilmaz N., Özhan E. Characteristics of the frequency spectra of wind-waves in Eastern Black Sea // Ocean Dynamics. 2014. Vol. 64. P. 1419-1429.

References

1. Bukhanovsky A.V., Lopatukhin L.I., Chernysheva E.S. Climatic spectra of wind waves including extreme situations. Oceanology. 2013, vol 53, pp. 269-276.

2. Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoj zony morej SSSR. T. 3. Azovskoe more [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the USSR seas. T. 3. Sea of Azov]. Saint-Peterburg, Gidrometeoizdat publ., 1986, 218 p. [in Russ.].

3. Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. Morya SSSR [Seas of the USSR]. Moscow, MSU publ., 1982, 192 p. [in Russ.].

4. Edinaya gosudarstvennaya sistema informacii ob obstanovke v Mirovom okeane [Unified state information system on the situation in the World Ocean]. Operativnyj modul' ESIMO [ESIMO operational module]. Ledovye usloviya v Azovskom more [Ice conditions in the Sea of Azov]. Available at: http://193.7.160.230/web/esimo/azov/ice/ice_azov.php?date=19.03.2012 [in Russ.].

5. Ivanov A.Y. Novorossiyskaya bora: vzglyad iz kosmosa [Novorossiysk bora: view from space]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2008, no. 2, pp. 68-83 [in Russ.].

6. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Okeanografiya Chernogo morya [Oceanography of the Black Sea]. Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute, 2011, 212 p. [in Russ.].

7. Myslenkov S.A., Stoliarova E.V., Gippius F.N. Ocenka resursov energii voln v Chernom more [Estimation of wave energy resources of the Black Sea]. *Nauki o Zemle [Earth Sciences]*, 2018, no. 2, pp. 21-32 [in Russ.].

8. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Dinamika ledovogo rezhima Azovskogo morya v XX–XXI vv [Ice regime dynamics of the Sea of Azov in the 20th–21st centuries]. *Lyod i sneg [Ice and snow]*, 2018, vol. 58, no 3, pp.373-386 [in Russ.].

9. Akpinar A., Bingölbalı B., Van Vledder G.P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds. *Ocean Engineering*. 2016, vol. 126, pp. 276-298.

10. Amarouche K., Akpinar A. Long-term characterisation of directional wave spectra in the Black Sea and the Sea of Azov. *Applied Ocean Research*. 2023, vol. 141, pp. 103783.

11. Amarouche K., Akpinar A., Rybalko A., Myslenkov S. Assessment of SWAN and WAVEWATCH-III models regarding the directional wave spectra estimates based on Eastern Black Sea measurements. *Ocean Engineering*. 2023, vol. 272, pp. 113944.

12. Amarouche K., Akpinar A., Soran M.B. et al. Spatial calibration of an unstructured SWAN model forced with CFSR and ERA5 winds for the Black and Azov Seas. *Applied Ocean Research*. 2021, vol. 117, pp. 102962.

13. Boukhanovsky A.V., Lopatoukhin L.J., Soares C.G. Spectral wave climate of the North Sea. *Applied Ocean Research*, 2007, vol. 29, no 3, pp. 146-154.

14. ESA SST CCI and C3S reprocessed sea surface temperature analyses. Copernicus Marine Service. Available at: https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_024/description.

15. Everitt B.S. Cluster Analysis. Halsted-Heinemann: London, 1980, 170 p.
16. Gippius F.N., Myslenkov S.A. Black Sea wind wave climate with a focus on coastal regions. *Ocean Engineering*, 2020, vol. 218, pp. 108199.
17. Hamilton L.J. Characterising spectral sea wave conditions with statistical clustering of actual spectra. *Applied Ocean Research*, 2010, vol. 32, no 3, pp. 332-342.
18. Hamilton L.J. Methods to obtain representative surface wave spectra, illustrated for two ports of north-western Australia. *Marine and freshwater research*. 1997, vol. 48, no 1, pp. 43-57.
19. Kos'yan R.D., Divinsky B.V., Pushkarev O.V. Measurements of parameters of wave processes in the open sea near Gelendzhik. The Eight Workshop of NATO TU-WAVES/Black Sea. Ankara, Turkey: Middle East Technical University, 1998, pp. 5-6.
20. Mahalanobis P.Ch. On the generalised distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India*, 1936, vol. 2, no. 1, pp. 49-55.
21. Mansour A.E., Ertekin R.C. Report of technical committee I. *1 environment. Proceedings of the 15th international ship and offshore structures congress*, 2003, vol. 1, pp. 24.
22. Ochi M.K., Hubble E.N. Six-parameter wave spectra. *Coastal Engineering*, 1976, pp. 301-328.
23. Rybalko A, Myslenkov S., Arkhipkin V. Seasonal variability of wind wave spectra in the Black Sea and Sea of Azov. *Oceanology*, 2023, vol. 63, suppl. 1, pp. S72-S82.
24. Saha S., Moorthi S., Wu X., et al. The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, no 6, pp. 2185-2208.
25. Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07. Tech. Note 333, March 2019. NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/>
26. Wang D.W., Hwang P.A. An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, vol. 18, no 12, pp. 2052-2062.
27. Ward Jr. J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 1963, vol. 58, no 301, pp. 236-244.
28. Yaitskaya N. The wave climate of the Sea of Azov. *Water*, 2022, vol. 14, no 4, pp. 555.
29. Yilmaz N., Özhan E. Characteristics of the frequency spectra of wind-waves in Eastern Black Sea. *Ocean Dynamics*, 2014, vol. 64, pp. 1419-1429.

Поступила 21.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;
принята в печать 10.04.2024.

Submitted 21.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;
accepted for publication 10.04.2024.