

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-121-131>

УДК 551.466.3

## **Групповая структура волн во время черноморского шторма 25–26 ноября 2023 г.**

***А.В. Гармашов, А.С. Запезалов***

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия  
sevzepter@mail.ru*

Анализируются изменения характеристик групповой структуры поверхностных волн во время экстремального шторма в Черном море 25–26 ноября 2023 года. Для анализа используются данные волновых измерений, которые проводились на стационарной океанографической платформе, расположенной около Южного берега Крыма. Расчет характеристик групповой структуры проводится в рамках двух процедур, в основе которых лежат преобразование Гильберта и функция SIWEH. Построен временной ход фактора групповитости и числа волн в группе. Временной ход параметров групповой структуры, рассчитанных в рамках двух процедур, подобен. На стадии развития шторма фактор групповитости и число волн в группе меняются незначительно, на стадии ослабления шторма значения указанных параметров уменьшаются. Во время шторма происходит значительный рост периодов доминантных волн, что приводит к увеличению длины группы.

*Ключевые слова:* морская поверхность, волны, групповая структура, шторм, Черное море

## **Group structure of waves during the Black Sea storm on November 25-26, 2023**

***A.V. Garmashov, A.S. Zapevalov***

*Marine Hydrophysical Institute  
Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
sevzepter@mail.ru*

The paper analyzes changes in the characteristics of the group structure of surface waves during the extreme storm in the Black Sea on November 25-26, 2023. The analysis uses wave measurement data from a stationary oceanographic platform located near the southern coast of Crimea. The group structure characteristics are calculated using two procedures based on the Hilbert transform and the SIWEH function. The temporal variations in the group factor and the number of waves in a group are constructed. The temporal variations in the group structure parameters calculated within the two procedures are similar. At the storm development stage, the group factor and the number of waves in a group changed insignificantly. At the storm weakening stage, the values of the parameters decreased. During the storm, there was a significant increase in the periods of dominant waves, which led to an increase in the group length. *Keywords:* sea surface, waves, group structure, storm, Black Sea

*Keywords:* sea surface, waves, group structure, storm, Black Sea

## Введение

Морские поверхностные волны являются случайным процессом, который описывается в рамках спектральных и стохастических моделей. Их важным свойством является групповая структура, выражающаяся в чередовании волн большой и малой высоты, которая наблюдается на всех стадиях развития волнового поля. Сгруппированные волны, как показывает численный анализ, оказывают более сильное воздействие на суда [19, 23], морские буровые платформы, прибрежные сооружения и волнорезы [21, 22], чем регулярные волны. Включение в модели вызванных группами волн эффектов переноса осадков важно для улучшенного описания эволюции профиля пляжа [2, 9, 10]. Существование групповой структуры также необходимо учитывать в задачах передачи энергии морских поверхностных волн земной коре [4, 5].

Анализируемые в настоящей работе данные получены во время экстремального шторма, который наблюдался в ноябре 2023 г. и оказал существенное воздействие на черноморское побережье Крыма. Волновые измерения проводились со стационарной океанографической платформы, расположенной у Южного берега Крыма. В центральной части моря высота волн превышала 9 м, вблизи платформы высота волн достигала 7.2 м. Подобные шторма имеют повторяемость 1 раз в 25 лет [1, 3].

В основе расчета параметров групповой структуры лежит процедура выделения волновой огибающей. Наиболее часто эта процедура реализуется с помощью преобразования Гильберта [7, 8, 16] и с помощью функции SIWEN (Smoothed Instantaneous Wave Energy History) [12]. Также для выделения волновой огибающей используются Марковские цепи [15] и вэйвлет-преобразования [17].

Основными характеристиками групп волн, используемыми в инженерных приложениях, являются фактор групповитости  $GF$  и длина группы  $GL$ . Безразмерный параметр  $GF$  описывает относительное изменение высот волн внутри группы, безразмерный параметр  $GL$  определяет среднее число волн в группе. Используемые разными авторами методы расчета этих параметров дают близкие, но не тождественные результаты [14]. В настоящей работе выделение волновой огибающей и расчет параметров  $GF$  и  $GL$  осуществляется в рамках двух процедур: с помощью преобразования Гильберта и с помощью функции SIWEN. Проводится сравнение параметров  $GF$  и  $GL$ , рассчитанных в рамках указанных процедур.

Целью работы является анализ изменения групповой структуры поверхностных волн во время экстремального черноморского шторма.

## Данные и методы

### *Волновые измерения*

Для анализа изменений групповой структуры поверхностных волн во время экстремального шторма использовались данные измерений, которые проводились на стационарной океанографической платформе Морского

гидрофизического института РАН, расположенной в Черном море у Южного берега Крыма. Расстояние от берега до платформы составляет ~600 м, глубина в том месте, где установлена платформа 28 м.

Использовались данные непрерывных волновых измерений, полученные в период 25–26 ноября 2023 г. Непрерывная запись волнения разбивалась на фрагменты длительностью 30 мин, для каждого из которых рассчитывались статистические характеристики волн. Измерения проводились струнным волнографом с дискретностью 0.25 с, ошибка измерений не превышала 1 см [13].

### *Описание групповой структуры*

Фактор групповитости определен как [6]

$$GF = \sqrt{2}\sigma_G/\bar{G}, \quad (1)$$

где  $\sigma_G$  – стандартное отклонение огибающей от ее среднего значения  $\bar{G}$ . Большие значения  $GF$  соответствуют более выраженной групповой структуре, если  $GF$  стремится к нулю, то волновая огибающая вырождается в константу.

Существует несколько методов расчета длины группы. В частности, ее можно определить как отношении частот пиков спектров волновой огибающей и волнового спектра (спектра возвышений поверхности) [19, 23] или как отношение средних частот этих спектров [6]. Сложность применения указанных методов при анализе данных волновых измерений связана с тем, что спектр волновой огибающей, в отличие от волнового спектра, не является узкополосной функцией [7].

Использовались два метода расчета параметров групповой структуры. Первый метод основан на преобразовании Гильберта. Пусть возвышение поверхности в фиксированной точке  $\eta(t)$ , где  $t$  – время. Интегральное преобразование Гильберта представляет собой свертку двух функций  $\eta(t)$  и  $f(t)=1/t$ :

$$H(\eta(t)) = \frac{1}{\pi} \text{v. p.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta(u)}{t-u} du, \quad (2)$$

где *v. p.* означает главное значение интеграла по Коши. Ядро свертки  $f(t)$  имеет сингулярность в точке  $t=0$ . С помощью преобразования (2) волновая огибающая определена как

$$G_H(t) = \sqrt{\eta^2(t) + (H(\eta(t)))^2}. \quad (3)$$

Далее, используя (2), согласно (1), с помощью волновой огибающей  $G_H(t)$  рассчитывается фактор групповитости  $GF_H$ .

Также существует несколько определений длины группы волн. Здесь мы определим эту длину, используя метод волновой огибающей, как отношение двух характерных временных масштабов [23]

$$GL_H = T_H / T_W, \quad (4)$$

где  $T_H$  – среднее время между двумя последовательными пересечениями волновой огибающей  $G_H(t)$  порогового уровня  $G_0$  снизу вверх [14];  $T_W$  – характерный период волн. Пороговый уровень  $G_0$  зависит от значительной высоты волн  $H_S$  и равен  $G_0 = 0.4H_S$  [11]. Характерный период волн можно определить как период доминантных волн

$$T_{W,p} = T_p = 1/f_p, \quad (5)$$

где  $f_p$  – частота пика волнового спектра. Соответственно, длину группы, определенную с помощью  $T_{W,p}$ , обозначим как  $GL_{H,p}$ .

В рамках второго метода при расчете параметров  $GF$  и  $GL$  вместо волновой огибающей используется функция SIWEN [12], заданная выражением:

$$E(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t + \tau) Q(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где  $Q(\tau)$  – окно Бартлетта;  $T = 1/f_p$  период волн, соответствующих частоте спектрального волнового пика  $f_p$ . Фактор групповитости определяется как [20]

$$GF_E = \frac{1}{\langle E \rangle} \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [E(t) - \bar{E}]^2 dt}, \quad (7)$$

где  $\tau$  – длительность волнограммы; черта сверху означает осреднение.

С помощью функции SIWEN длина группы определяется аналогично (4):

$$GL_{E,p} = T_E / T_{W,p}, \quad (8)$$

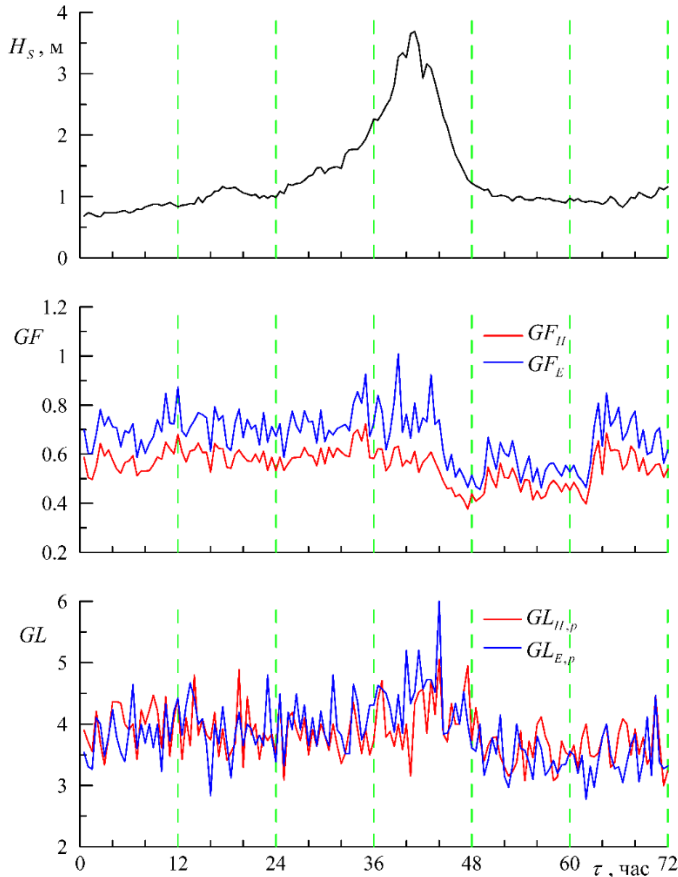
где  $T_E$  – среднее время между двумя последовательными пересечениями функцией  $E(t)$  порогового значения  $E_0 = 0.08H_S^2$  снизу вверх [14].

## Результаты

### *Изменения групповой структуры волн во время шторма*

Изменения фактора групповитости и длины группы волн представлены на рис. 1. Чтобы определить, какой стадии шторма соответствуют параметры  $GF$  и  $GL$ , там же показаны изменения значительной высоты волн.

Максимальное значение  $H_S = 3.7$  м достигается при  $\tau = 41$  час. Здесь  $\tau = 0$  соответствует моменту времени 0 часов 25 ноября 2023 года.



**Рис. 1.** Изменения во время шторма значительной высоты волн  $H_S$ , фактора групповитости  $GF$  и среднего числа волн в группе  $GL$ .

**Fig. 1.** Changes during a storm of significant wave height  $H_S$ , groupiness factor  $GF$  and average number of waves in a group  $GL$ .

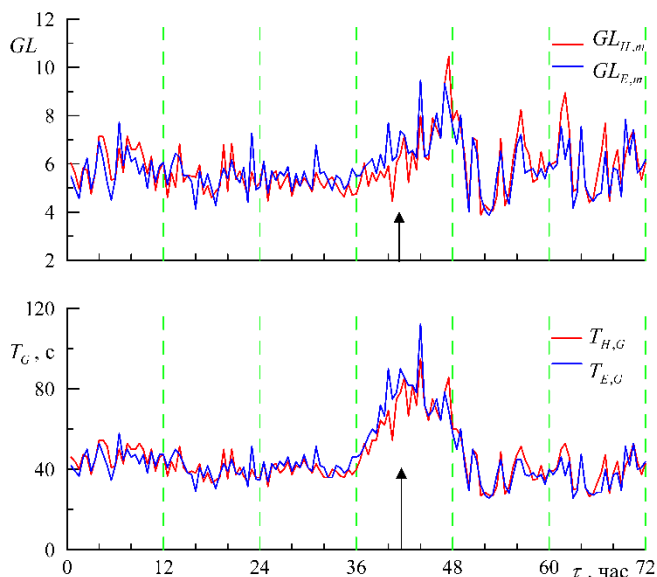
Основные изменения групповой структуры происходят на стадии, когда значительная высота волн начинает уменьшаться. В это время происходит уменьшение фактора групповитости, а также уменьшается среднее число волн в группе.

Одной из характеристик, которая рассчитывается разными методами, что приводит к неоднозначности определения  $GL$ , является характерный период волн или соответствующая ему характерная частота. Наряду с входящим в выражениях (4) и (8) характерным волновым периодом, который

соответствует частоте  $f_p$ , используется волновой период, соответствующий средней частоте спектра  $f_m$ . Средняя частота  $f_m$  определена с помощью спектральных моментов как [18]

$$f_m = m_1/m_0, \quad (9)$$

где  $m_n = \int_0^\infty f^n Y(f) df$ ;  $n$  – порядок момента;  $\Psi(f)$  – волновой спектр. Частота  $f_p$  чаще используется при построении моделей, частота  $f_m$  чаще используется при анализе данных волновых измерений. Длину группы волн, рассчитанную для  $T_w = T_{w,m} = 1/f_m$ , обозначим как  $GL_{H,m}$  и  $GL_{E,m}$  соответственно двум используемым здесь методам выделения волновой огибающей. Следствием асимметрии спектра возвышений поверхности является неравенство  $f_p < f_m$ , поэтому, как видно при сравнении рис. 1 и рис. 2, выполняются неравенства  $GL_{H,m} > GL_{H,p}$  и  $GL_{E,m} > GL_{E,p}$ .

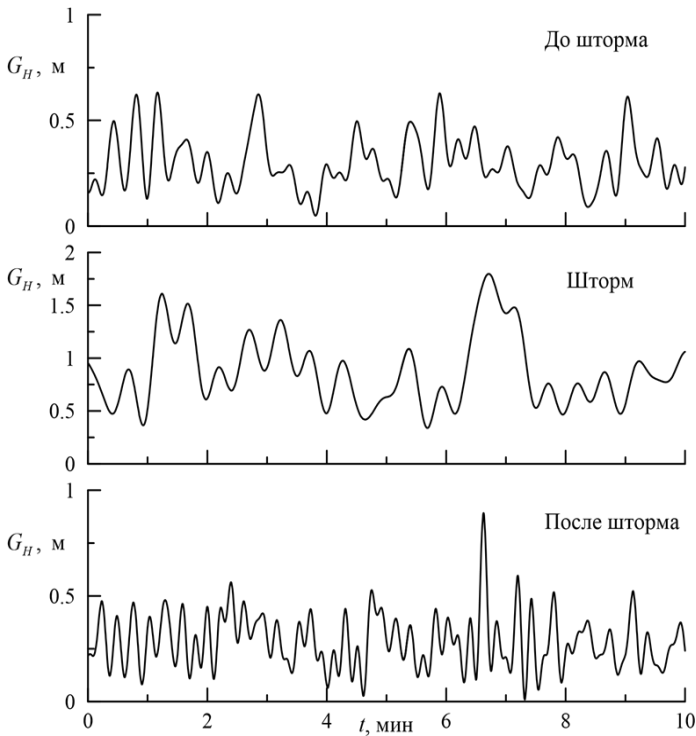


**Рис. 2.** Изменения среднего числа волн в группе  $GL$  рассчитанных для волновых периодов  $T_m$ , и физической длины (продолжительности) группы  $T_G$ . Стрелкой показан момент времени, когда значительная высота достигает максимума

**Fig. 2.** Changes in the average number of waves in the  $GL$  group calculated for wave periods  $T_m$ , and the physical length (duration) of the group  $T_G$ . The arrow shows the moment in time when a significant height reaches its maximum.

Среднее число волн в группе  $GL$  в анализируемый период меняется незначительно. Однако физическая длина группы  $T_G$ , определенная как время между двумя последовательными пересечениями волновой огибающей или функцией SIWEN заданного уровня, во время шторма существенно возрастает.

Изменения волновой огибающей на разных стадиях развития шторма показаны на рис. 3. Видно, что в период шторма длина огибающей значительно возрастает. Это вызвано увеличением периодов доминантных волн. Различие в форме волновых огибающих до и после шторма обусловлено тем, что после шторма на морской поверхности присутствовали две хорошо выраженные системы волн: ветровые волны и зыбь.



**Рис. 3.** Изменения волновой огибающей  $G_H(t)$  на разных фазах развития шторма.

**Fig. 3.** Changes in the wave envelope  $G_H(t)$  at different phases of storm development.

Сравним оценки параметров, характеризующих групповую структуру волн, которые получены в рамках двух используемых в настоящей работе методов. Между значениями  $GF_H$  и  $GF_E$  существует систематическое расхождение,  $GF_H < GF_E$ . Параметры  $GF_H$  и  $GF_E$  меняются подобным

образом, коэффициент корреляции между ними равен 0.93. Средние значения фактора групповитости  $\overline{GF_H}$  и  $\overline{GF_E}$ , соответственно, равны 0.55 и 0.67. Средние значения параметров  $GL_H$  и  $GL_E$  практически совпадают,  $\overline{GL_H}$  и  $\overline{GL_E}$ , соответственно, равны 3.84 и 3.85. Коэффициент корреляции между  $GL_H$  и  $GL_E$  равен 0.59.

### Заключение

Представленный в настоящей работе анализ характеристик групповой структуры поверхностных волн основан на данных волновых измерений, полученных во время экстремального шторма в Черном море. Установлено, что на стадии развития шторма фактор групповитости  $GF$  и число волн в группе  $GL$  в среднем меняются незначительно, на стадии ослабления шторма значения этих параметров уменьшаются. Во время шторма происходит значительный рост периодов доминантных волн (волн, соответствующих частоте пика волнового спектра), который приводит к увеличению длины (длительности) группы.

Анализ проводился с использованием двух процедур расчета характеристик групп волн, в основе которых лежит преобразование Гильберта и функция SIWEN. Средние значения фактора групповитости  $\overline{GF_H}$  ниже, чем значения  $\overline{GF_E}$ , и, соответственно, равны 0.55 и 0.67. Временной ход параметров  $GF_H$  и  $GF_E$  подобен, коэффициент корреляции между ними равен 0.93. Определенные в рамках двух процедур среднее число волн в группе и средняя длина (длительность) группы практически совпадают.

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН в рамках государственного задания по теме: FNNN-2024-0014 "Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах".

The work was carried out at the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences within the framework of a state assignment on the topic: FNNN-2024-0014 "Fundamental studies of interaction processes in the sea – air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales".

### Список литературы

1. Горячкин Ю.Н., Марков А.А., Фомин В.В. Воздействие шторма 26–27 ноября 2023 г. на побережье Крыма // Гидротехника. 2025. № 1. С. 32–40.
2. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д. Взвешивание донных осадков в условиях нерегулярного поверхностного волнения // Океанология. 2019. Том 59, № 4. С. 533–543. DOI: 10.31857/S0030-1574594533-543.

3. Дулов В.А., Юровская М.В., Фомин В.В., Шокуров М.В., Юровский Ю.Ю., Барабанов В.С., Гармашов А.В. Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 325-347.

4. Запелалов А.С. Влияние асимметрии и групповой структуры морских волн на генерацию инфразвука морской поверхностью // Морской гидрофизический журнал. 2023. Том 39, № 2. С. 177-188. DOI: 10.29039/0233-7584-2023-2-177-188

5. Запелалов А.С., Показеев К.В. Моделирование спектра инфразвукового гидроакустического излучения, генерируемого морской поверхностью в штормовых условиях // Акустический журнал. 2016. Том 62, № 5. С. 550-555. DOI: 10.7868/S0320791916050208.

6. Преснухин А.В. Групповая структура ветровых волн в Каспийском море // Литодинамика донной контактной зоны океана: Матер. межд. конф., посв. 100-летию со дня рождения профессора В.В. Лонгинова (14–17 сентября 2009, г. Москва). 2009. С. 31-33.

7. Соловьев Ю.П. Моделирование спектральных характеристик огибающей ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 1989. № 2. С. 27-34.

8. Якубов Ш.Х., Амбросимов А.К. Экспериментальное исследование взаимосвязи между групповой структурой волнения и высотой волн // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 60-67.

9. Baldock T.E., Alsina J., Caceres I., Vicinanza D., Contestabile P., Power H., Sanchez-Arcilla A. Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves // Coast. Eng. 2011. Vol. 58. P. 214-227.

10. Cáceres I., Alsina J.M. Suspended sediment transport and beach dynamics induced by monochromatic conditions, long waves and wave groups // Coast. Eng. 2016. Vol. 108. P. 36-55. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.11.004

11. Dawson T.H., Kriebel D.L., Wallendorf L.A. Experimental study of wave groups in deep-water random waves // Appl. Ocean Res. 1991. Vol. 13, is. 3. P. 116-131.

12. Funke E.R., Mansard E.P.D. On the synthesis of realistic Sea States in a laboratory flume // Report LTR-HY-66 of the Division of Mechanical Engineering, National Research Council Canada. 1979.

13. Garmashov A., Toloknov Y., Korovushkin A. Hydrometeorological monitoring on the stationary oceanographic platform in the Black Sea // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2019. Vol. 19, № 3.1. P. 259-264. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.034.

14. Huang W., Dong S. Statistical description of wave groups in three types of sea states // Ocean Engineering. 2021. Vol. 225. P. 108745. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108745.

15. Kimura A. Statistical properties of random wave groups // Proceedings of 17th International Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia, March 23–28, 1980. Vol. 3. P. 2955-2973.

16. Liu Y., Li S. Variation of wave groupiness across a Fringing Reef // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 2018. Vol. 144, is. 6. P. 04018022. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000475.

17. Liu P.C. Wavelet Spectrum Analysis and Ocean Wind Waves // Wavelets in Geophysics. Wavelet in vol. 4. New York: Academic Press, 1994. P. 151-166.

18. Longuet-Higgins M.S. Statistical properties of wave groups in a random sea state // Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A. 1984. Vol. 312, is. 1521. P. 219-250. DOI: 10.1098/rsta.1984.0061.

19. Ma X.J., Sun Z.C., Zhang Z.M., Yang G.P., Zhou F. The effect of wave groupiness on a moored ship studied by numerical simulations // J. Hydrodyn. 2011. Vol. 23, no. 2. P. 145-153. DOI: 10.1016/S1001-6058(10)60098-4.

20. Mase H. Groupiness factor and wave height distribution // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1989. Vol. 115, no. 1. P. 105-121.

21. Medina J.R., Hudspeth R.T. A review of the analyses of ocean wave groups // Coast. Eng. 1990. Vol. 14, no. 6. P. 515-542.

22. Sun Z.C., Wang X.G., Liang S.X., Liu S.X., Liu S. Dynamic response analysis of DDMS platform subjected to actions of wave groups and current sources // J. Hydrodyn. Ser. Bull. 2011. Vol. 23, no. 6. P. 697-708.

23. Wang L., Tang Y., Zhang X., Zhang J. Studies on parametric roll motion of ship under wave group by numerical simulation // Ocean. Eng. 2018. Vol. 163. P. 391-399. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.066.

### References

1. Goryachkin Yu.N., Markov A.A., Fomin V.V. Vozdeystvie shtorma 26–27 noyabrya 2023 g. na poberezh'e Kryma [Impacts of the November 26–27, 2023 storm on the coast of Crimea]. *Gidrotehnika* [Hydrotechnika], 2025, no. 1, pp. 32–40 [in Russ.].

2. Divinsky B.V., Kosyan R.D. Bottom sediment suspension under irregular surface wave conditions. *Oceanology*, 2019, Vol. 59, no. 4, pp. 482–490. DOI: 10.1134/S0001437019040039

3. Dulov V.A., Yurovskaya M.V., Fomin V.V., Shokurov M.V., Yurovsky Yu.Yu., Barabanov V.S., Garmashov A.V. Extreme Black Sea storm in November, 2023. *Physical Oceanography*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 295–316.

4. Zapevalov A.S. Impact of the sea waves' skewness and group structure on the infrasound generation by the sea surface. *Physical Oceanography*, 2023, Vol. 30, no. 2, pp. 160–170. DOI:10.29039/1573-160X-2023-2-160-170.

5. Zapevalov A.S., Pokazeev K.V. Modeling the spectrum of infrasonic hydroacoustic radiation generated by the sea surface under storm conditions. *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no 5, pp. 554–558. DOI: 10.1134/s1063771016050195.

6. Presnukhin A.V. Gruppovaya struktura vetrovyykh voln v Kaspiyskom more [Group structure of wind waves in the Caspian sea] *Litodinamika donnoy kontaktnoy zony okeana*: Mater. mezhd. konf., posv. 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.V. Longinova (14–17 sentyabrya 2009, g. Moskva) [*Lithodynamics of the bottom contact zone of the ocean*. Proceedings of the international conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor V.V. Longinov (September 14–17, 2009, Moscow)]. Moscow, GEOS publ., 2009, pp 31–33 [in Russ.].

7. Solov'yev Yu.P. Modelirovaniye spektral'nykh harakteristik ogibayushchey vetrovyykh voln [Modeling of spectral characteristics of the wind wave envelope]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 1989, no. 2, pp 27–34 [in Russ.].

8. Yakubov S.K., Ambrosimov A.K. Experimental study of the relationship between the wave groupiness and wave height. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, no. 11–12, pp. 773–778. DOI: 10.3103/S1068373916110054.

9. Baldock T.E., Alsina J., Cáceres I., Vicinanza D., Contestabile P., Power H., Sanchez-Arcilla A. Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves. *Coast. Eng.*, 2011, vol. 58, pp. 214–227.

10. Cáceres I., Alsina J.M. Suspended sediment transport and beach dynamics induced by monochromatic conditions, long waves and wave groups. *Coast. Eng.*, 2016, vol. 108, pp. 36–55. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.11.004.

11. Dawson T.H., Kriebel D.L., Wallendorf L.A. Experimental study of wave groups in deep-water random waves. *Appl. Ocean Res.*, 1991, vol. 13, no. 3, pp. 116–131.

12. Funke E.R., Mansard E.P.D. On the synthesis of realistic Sea States in a laboratory flume. Report LTR-HY-66 of the Division of Mechanical Engineering, National Research Council Canada. 1979.

13. Garmashov A., Toloknov Y., Korovushkin A. Hydrometeorological monitoring on the stationary oceanographic platform in the Black Sea. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, SGEM, 2019, vol. 19, no. 3.1, pp. 259–264. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.034.

14. Huang W., Dong S. Statistical description of wave groups in three types of sea states. *Ocean Engineering*, 2021, vol. 225, p. 108745. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108745.

15. Kimura A. Statistical properties of random wave groups. *Proceedings of 17th International Conference on Coastal Engineering*. Sydney, Australia, March 23–28, 1980, vol. 3, pp. 2955–2973.

16. Liu Y., Li S. Variation of wave groupiness across a Fringing Reef. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2018, vol. 144, no. 6, p. 04018022. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000475.
17. Liu P.C. Wavelet Spectrum Analysis and Ocean Wind Waves. *Wavelets in Geophysics*, Wavelet in vol. 4. New York: Academic Press publ., 1994, pp. 151-166.
18. Longuet-Higgins M.S. Statistical properties of wave groups in a random sea state // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A.*, 1984, vol. 312, no. 1521, pp. 219-250. DOI: 10.1098/rsta.1984.0061.
19. Ma X.J., Sun Z.C., Zhang Z.M., Yang G.P., Zhou F. The effect of wave groupiness on a moored ship studied by numerical simulations. *J. Hydrodyn.*, 2011, vol. 23, no. 2, pp. 145-153. DOI: 10.1016/S1001-6058(10)60098-4.
20. Mase H. Groupiness factor and wave height distribution. *Journal of Waterway. Port. Coastal and Ocean Engineering*, 1989, vol. 115, no. 1, pp. 105-121.
21. Medina J.R., Hudspeth R.T. A review of the analyses of ocean wave groups. *Coast. Eng.*, 1990, vol. 14, no. 6, pp. 515-542.
22. Sun Z.C., Wang X.G., Liang S.X., Liu S.X., Liu S. Dynamic response analysis of DDMS platform subjected to actions of wave groups and current sources. *J. Hydrodyn. Ser. Bull.*, 2011, vol. 23, no. 6, pp. 697-708.
23. Wang L., Tang Y., Zhang X., Zhang J. Studies on parametric roll motion of ship under wave group by numerical simulation. *Ocean. Eng.*, 2018, vol. 163, pp. 391-399. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.066.

Поступила 08.09.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025;  
принята в печать 15.10.2025.

Submitted 08.09.2025; approved after reviewing 01.10.2025;  
accepted for publication 15.10.2025.