

А.В.Гармашов^{1,2}, Ю.Н.Толокнов¹, А.И.Коровушкин¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

²Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова» г.Севастополь

ВЕТРОВОЕ ВОЛНЕНИЕ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В 1995 – 2002 ГГ.

Приводятся результаты длительного мониторинга ветрового волнения, проводимого в 1995 – 2002 гг. на морской стационарной газодобывающей платформе, расположенной в северо-западной части Черного моря. Анализ более 18000 волнограмм позволил получить достоверные статистические характеристики ветрового волнения, описывающие волновой режим на северо-западе Черного моря в 1995 – 2002 гг. Было выявлено, что максимальные высоты волн летом достигали высоты 4,8 м, зимой 8,76 м. За 1 час наблюдений максимальная высота волны в подавляющем большинстве случаев была больше высоты значительной волны в 1,9 раза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ветровое волнение, высоты волн, период волн, мониторинг, измерения, Каркинитский залив, Черное море*

Введение. В связи с расширением разведки и добычи нефти и газа на северо-западном шельфе Черного моря, а также возрастающей активностью военного и гражданского судоходства актуализировалась проблема наличия достоверной информации о климатических характеристиках этой акватории.

Из-за отсутствия длительных инструментальных измерений параметров ветрового волнения сведения о режиме волнения в Черном море получают расчетным путем [1 – 4]. В последние годы для расчета параметров волнения используются волновые модели, например, модели *SWAN* [5 – 7] или *WAM* [8, 9].

Несмотря на большое количество справочной литературы по режимным характеристикам ветрового волнения Черного моря [8 – 10 и др.], отсутствуют работы, которые опирались бы на продолжительные измерения в северо-западной части (СЗЧ) Черного моря. Здесь необходимо отметить единственные комплексные измерения ветро-волновых параметров, которые проводились в Черном море в рамках проекта *NATO TU-WAVES Project*, на шести станциях: Синоп и Хопа (Турция), Геленджик (Россия), платформы Кацивели и Голицыно-4 (Украина), платформа Глория (Румыния). Измерения на станциях Синоп и Хопа и Геленджик проводились с помощью заякоренной волновой станции *DATAWELL*. Продолжительность измерений на станции Геленджик составляла 52 месяца, на Хопа – 41 месяц и на Синопе – 8 месяцев. Волновые данные с этих станций достаточно хорошо освещены в различных статьях и представлены на научных конференциях [6, 7, 12, 13, 16]. Мониторинг на стационарных платформах Кацивели, Голицыно-4 и Глория проводился с помощью автоматизированного гидрометеорологического комплекса [14]. Данные со стационарных платформ Кацивели, Голицыно-4 и Глория практически не представлены в литературе.

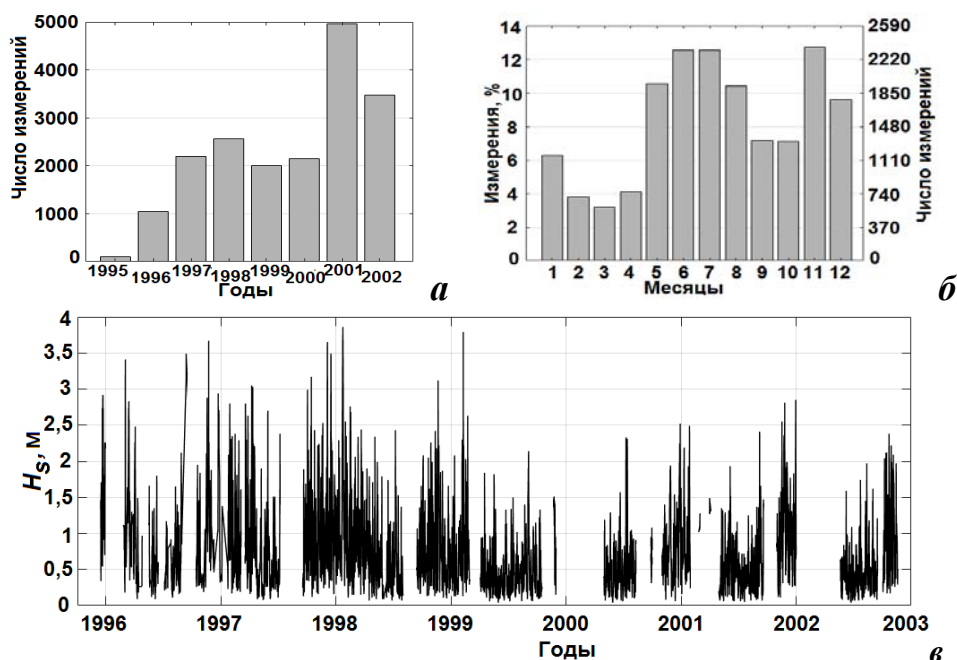
Цель настоящей работы состояла в анализе данных многолетнего гидрометеорологического мониторинга в северо-западной части Черного моря

для получения статистических характеристик ветрового волнения, описывающих волновой режим на северо-западе Черного моря в 1995 – 2002 гг.

Используемые данные. С декабря 1995 г. на морской стационарной газодобывающей платформе (МСП) Голицыно-4, расположенной на северо-западном шельфе Черного моря в точке с координатами 45°42,5' с.ш., 31°52,5' в.д. (расстояние от берега примерно 50 км), было установлено оборудование для гидрометеорологического мониторинга [15]. Для измерения высот волн использовался витой резистивный волнограф с дискретность опроса 4 Гц и возможностью регистрации высот волн до 10 м [14]. Ошибка измерения уровня не превышала 1 см.

Запись ветрового волнения с 1995 г. по ноябрь 1999 г. проводилась 1 раз в 3 часа с продолжительностью приблизительно 17 мин. За период 1995 – 1999 гг. было накоплено почти 8000 волнограмм. С ноября 1999 г. регистрация волнения производилась раз в 3 часа, но с продолжительностью записи 51 мин. С сентября 2000 г. запись велась каждый час в течение 51 мин. За весь период наблюдений 1995 – 2002 гг., который с перерывами охватывает 8 лет, было накоплено более 18000 волнограмм (рис.1), из них продолжительностью 51 мин. – более 11000 записей. Распределение данных по месяцам показано на рис.1, б. Наименьшее количество наблюдений (589) было произведено в марте, что составляет примерно 3,2 % от общего числа регистраций. Больше всего записей (2347) было сделано в ноябре, что равняется 12,7 % от общего числа наблюдений. Имеющего количества данных достаточно для анализа сезонной изменчивости ветрового волнения в СЗЧ, однако недостаточно для исследования межгодовых изменений.

Обработка данных. Распределение высот (удвоенных амплитуд) волн



Р и с . 1 . Число измерений на платформе по годам (а) и месяцам (б). Высоты значительных волн (в) с 1995 по 2002 гг.

подчиняется закону Рэлея. Справедливость распределения Рэлея проверялась многими исследователями. В [16, 17] показано, что распределения, рассчитанные для океанов, морей и озер, подчиняются закону Рэлея.

Из распределения Рэлея следуют важные для практических расчетов соотношения:

$$H_s = h_{1/3} \approx 4\sqrt{m_0} \approx 0,79H_{3\%} \approx 1,58\bar{h}, \quad (1)$$

где H_s , $h_{1/3}$ – средняя высота, соответствующая $1/3$ наибольших волн (высота значительных волн); m_0 – нулевой момент функции спектральной плотности (среднеквадратическое отклонение); $H_{3\%}$ – высота волны 3 %-ой обеспеченности; h и \bar{h} – высота и средняя высота волнового колебания.

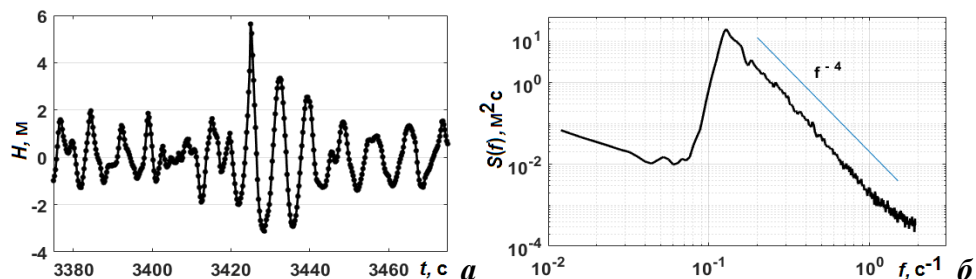
Наибольшая из тысячи волн ($H_{1/1000}$), принимаемая часто за максимальную волну, равна:

$$H_{1/1000} \approx 1,9h_{1/3} \approx 1,5H_{3\%} \approx 3\bar{h}. \quad (2)$$

Волновые данные прошли контроль качества с отбраковкой ненадежных фрагментов. В данной работе для расчета H_s используется формула (1), при этом H_s вычисляется для всей длины реализации (17 – 60 мин, см. «Используемые данные»). Максимальная высота волны (H_{max}) в волнограмме определялась как наибольшее расстояние между подошвой и гребнем.

Для каждой волнограммы был получен частотный спектр, из которого определялся пиковый период волнения. Двумерный спектр рассчитывался преобразованием Фурье корреляционной функции с использованием окна Тьюки [18], число степеней свободы варьировалось от 21 до 77. На рис.2, а в качестве примера показан 50-ти секундный отрезок (200 измерений) часовой реализации с наибольшей высотой волны (8,76 м), зарегистрированной в СЗЧ Черного моря. Высота значительной волны для часовой реализации составляла 3,74 м, т.е. индекс аномальности (H_{max}/H_s), согласно [19, 20], был равен 2,3. Точками показаны измерения волнографа. Пиковый период волнения для данной часовой волнограммы составлял 7,8 с (рис.2, б).

Результаты. Характеристики ветрового волнения, измеренного на МСП в 1995 – 2002 гг., показаны в табл.1 и на рис.1, в. В табл.1 для каждого месяца приведена средняя высота волн \bar{h} , средняя высота волн 3 %-ой обеспеченности $H_{3\%}$, средняя высота значительных волн $H_{s\,av}$, максимальная высота значительных волн $H_{s\,max}$, максимальная измеренная высота волн H_{max} , наибольшая из тысячи волн $H_{1/1000}$, рассчитанная по (2), средний пиковый период волн T_{av} . Так как в русскоязычной литературе встречается использо-



Р и с . 2 . Максимальная высота волны (а) зарегистрированная в СЗЧ Черного моря и ее частотный спектр (б).

Т а б л и ц а 1 . Характеристики ветрового волнения.

величина месяц	\bar{h} , м	$H_{3\%}$, м	$H_{s\text{ av}}$, м	$H_{s\text{ max}}$, м	H_{max} , м	$H_{1/1000}$, м	T_{av} , с
январь	0,61	1,23	0,96	3,86	8,76	7,33	5,38
февраль	0,62	1,24	0,98	3,79	6,63	7,20	5,41
март	0,70	1,41	1,11	3,41	6,37	6,48	4,96
апрель	0,48	0,96	0,76	3,05	5,14	5,79	4,91
май	0,32	0,64	0,51	2,70	4,81	5,13	4,57
июнь	0,32	0,63	0,50	1,93	3,62	3,67	4,52
июль	0,27	0,54	0,43	2,43	4,80	4,62	4,23
август	0,32	0,64	0,50	2,12	4,29	4,03	4,20
сентябрь	0,39	0,79	0,62	3,49	6,15	6,63	4,89
октябрь	0,61	1,21	0,96	3,17	5,58	6,02	5,43
ноябрь	0,64	1,28	1,01	3,67	6,01	6,97	5,80
декабрь	0,66	1,32	1,05	3,65	6,80	6,94	5,63

вание терминов «средние высоты» и «высоты волн 3 %-ой обеспеченности», то данные величины также приводятся в табл.1.

Наименьшие средние высоты значительных волн в СЗЧ Черного моря наблюдались летом и составляли 0,43 – 0,5 м. Во время летних штормов максимальные высоты значительных волн достигали 2,4 м, единичные волны доходили до значения 4,8 м. Зимой происходило значительное усиление волнения. Средние высоты значительных волн в зимний период составляли 0,96 – 1,05 м, что в 2 раза больше, чем в летний. Во время штормов с сентября по апрель наблюдались высоты значительных волн более 3 м, максимальные волны в среднем превышали 6 м. Наибольшая волна (рис.2, а) по данным мониторинга составляла 8,76 м и была зарегистрирована 22 января 1998 г. Различия в средних периодах волн между летними (4,2 с) и зимними (5,8 с) месяцами составляет примерно 1,5 с.

Сравнение теоретически вычисленной максимальной высоты $H_{1/1000}$ и максимальной измеренной высоты волны H_{max} показало (табл.1, рис.3), что использование выражения (2) с большой точностью (коэффициент корреляции 0,985, смещение $(H_{\text{max}} - H_{1/1000})$ равно – 0,1 м) можно использовать для определения максимальной высоты волны по известной высоте значительной волны. Данное утверждение наглядно демонстрирует рис.3, где за период с мая по октябрь 2002 г. представлена измеренная максимальная высота волны H_{max} и рассчитанная максимальная высота волны $H_{1/1000}$. Видно, что рассчитанная максимальная высота волны идеально отображает реальную изменчивость как по фазе, так и по амплитуде. Т.е. для СЗЧ Черного моря максимальная высота волны за 1 час наблюдений в подавляющем большинстве случаев была больше высоты значительной волны в 1,9 раза.

Обратим внимание на то, что в морях и океанах, и в Черном море в частности, существуют «необычные» («ненормальные», «волны-убийцы» в англо-

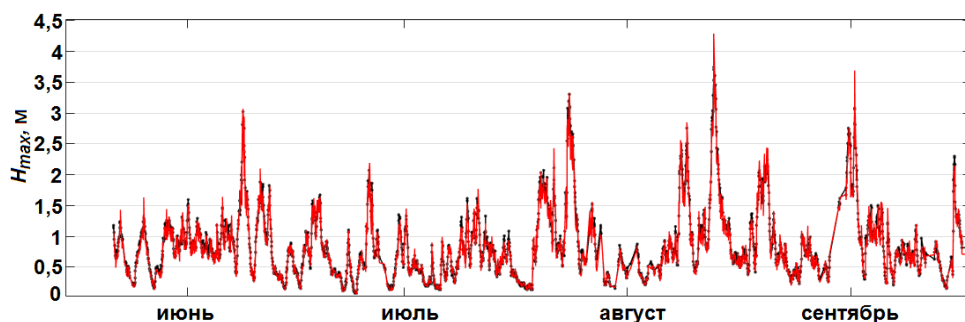


Рис. 3. Максимальные высоты волн H_{max} , измеренные на МСП (красная кривая). Рассчитанные максимальные высоты волн $H_{1/1000}$ с мая по октябрь 2002 г. (черная кривая).

язычной литературе – «*freak*» или «*rogue waves*») волны [21 – 23], индекс аномальности (H_{max}/H_s) которых может достигать 3,9 [12].

При анализе повторяемости ветрового волнения (табл.2) было использовано следующее разделение по высотам значительных волн:

- $H_s < 0,1$ м, 0 – 1 балл – штиль, рябь;
- $H_s = 0,1 - 0,5$ м, 2 балла – слабое волнение;
- $H_s = 0,5 - 1,25$ м, 3 балла – легкое волнение;
- $H_s = 1,25 - 2,5$ м, 4 балла – умеренное волнение;
- $H_s = 2,5 - 4,0$ м, 5 баллов – бурное волнение;
- $H_s = 4,0 - 6,0$ м, 6 баллов – очень бурное волнение.

Волнение с высотами значительных волн меньше 0,1 м в СЗЧ Черного моря наблюдалось достаточно редко (табл.2). Наиболее часто данный тип волнения был зарегистрирован в июне (3,6 %). В течение года волнение в 1 балл в среднем наблюдалось только в 1,4 % всех случаев. Слабое волнение является доминирующим с мая по сентябрь, наибольшую повторяемость

Таблица 2. Повторяемость (%) высот значительных волн (H_s , м).

H_s , м	0 – 0,1	0,1 – 0,5	0,5 – 1,25	1,25 – 2,5	2,5 – 4,0	> 4,0
январь	0	26,37	49,4	19,93	4,30	0
февраль	0	22,95	49,58	25,35	2,12	0
март	0	13,07	52,46	31,75	2,72	0
апрель	0,66	37,71	46,12	14,59	0,92	0
май	2,67	54,48	39,01	3,79	0,05	0
июнь	3,62	53,32	40,55	2,50	0	0
июль	3,20	70,19	23,67	2,94	0	0
август	0,83	60,5	35,45	3,22	0	0
сентябрь	1,36	46,49	43,62	8,38	0,15	0
октябрь	0,08	24,89	44,81	29,47	0,76	0
ноябрь	0,17	17,34	52,75	29,19	0,55	0
декабрь	0,51	24,2	43,65	26,96	4,68	0
за год	1,42	41,65	41,62	14,23	1,07	0

(70,2 %) данное волнение имело в июле. Зимой волнение с высотами волн менее 0,5 м имело повторяемость 20 – 26 %. В течение года волнение в 2 и 3 балла имело примерно одинаковый процент появления (42 %). Легкое волнение наиболее часто регистрировалось с октября по апрель. Повторяемость такого волнения составляла 44 – 53 %. Летом процент наблюдений легкого волнения не превышал 40 %. Умеренное волнение достаточно редко наблюдалось (до 3 %) с мая по август. В холодные месяцы вероятность регистрации 4-х балльного волнения составляла до 31 %. В среднем за год волнение с высотами 1,25 – 2,5 м было измерено в 14 % случаях. Бурное волнение в летние месяцы зарегистрировано не было. В декабре 5-ти балльное волнение имело повторяемость 4,7 %. В среднем за год данное волнение наблюдалось в 1 % всех случаев. Штормовое волнение с высотами значительных волн более 4 м в районе МСП зарегистрировано не было.

По результатам проведенного гидрометеорологического мониторинга в 1995 – 2002 гг. на МСП Голицыно-4 в Каркинитском заливе можно сформулировать следующие **выводы**:

- среднемесячная высота значительных волн в летние месяцы составляла 0,4 – 0,5 м, в зимние месяцы 0,96 – 1,05 м;
- максимальные высоты волн при штормах достигали значений 4,8 м летом и 8,76 м зимой;
- наибольшую повторяемость в летние месяцы имело слабое волнение ($0,1 \text{ м} < H_s < 0,5 \text{ м}$), в зимние месяцы легкое волнение ($0,5 \text{ м} < H_s < 1,25 \text{ м}$);
- максимальная высота волны за 1 час наблюдений в подавляющем большинстве случаев составляла $1,9 H_s$ для СЗЧ Черного моря;

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00067 мол_а и темы государственного задания № 0827-2015-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доклады НАН Украины.– 2011.– № 8.– С.108-112.
2. Руководство по расчету параметров ветровых волн.– Л.: Гидрометеиздат, 1969.– 96 с.
3. Типовые поля ветра и волнения Черного моря.– Севастополь: ФОЛ СО ГОИН, 1987.– 116 с.
4. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей.– СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006.– 451 с.
5. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте Черного с использованием модели SWAN // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ.– 2013.– № 350.– С.58-67.
6. Akpinar A., Leon, S.P. An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea // Dyn. Atmosph. Ocean.– 2016.– v.73.– P.61-75.
7. Van Vledder GP, Akpinar A. Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields // Appl. Ocean Res.– 2015.– v.53.– P.161-178.
8. Ефимов В.В. Комаровская О.И. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря.– Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– 59 с.

9. Шокуров М.В., Дулов В.А., Скиба Е.В., Смолов В.В. Ветровые волны в прибрежной зоне южного берега Крыма – оценка качества моделирования на основе морских натуральных измерений // *Океанология*.– 2016.– т.56, № 2.– С.230-241.
10. *Атлас волнения и ветра Черного моря*.– Л.: Гидрометеоздат, 1969.– 112 с.
11. *Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные*.– Л.: Транспорт, 1974.– 360 с.
12. Divinsky B.V., Levin B.V., Lopatukhin L.I., Pelinovsky E.N., Slyunyaev, A.V. A freak wave in the Black Sea: observations and simulation // *Doklady Earth Sciences*.– 2004.– 395A, № 3.– P.438-443.
13. Yilmaz N. Spectral characteristics of wind waves in the eastern Black Sea / PhD Thesis Middle East Technical University.– Ankara, Turkey, 2007.– 108 p.
14. Толокнов Ю.Н., Коровушкин А.И., Козлов К.Г. Автоматизированный гидрометеорологический комплекс // *Системы контроля окружающей среды*.– 1998.– С.12-17.
15. Garmashov A.V., Polonskii A.B. Wind variability in the Northwestern part of the Black Sea from the offshore fixed platform observation data // *Russian Meteorology and Hydrology*.– 2011.– v.36, № 12.– P.811-818.
16. Лопатухин Л.И. Анализ распределения элементов волн // *Труды ВНИИГМИ МЦД*.– 1978.– вып.1.– С.116-142.
17. Bauer E., Staabs C. Statistical properties of global significant wave heights and their use for validation // *J. Geophys. Res.*– 1998.– № 103 (C1).– P.1153-1166.
18. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып.1.– М.: Мир, 1971.– 316 с.
19. Guedes Soares C., Cherneva Z., Antao E.M. Abnormal waves during Hurricane Camille // *J. Geophys. Res.*– 2004.– v.109, C08008.– P.1-7.
20. Kharif C., Pelinovsky E., Slyunyaev A. Rogue waves in the ocean.– Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.– 216 p.
21. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пушкарев О.В. Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2003 г. // *Океанология*.– 2003.– т.43, № 6.– С.948-950.
22. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение / Учеб. пособие. 2-е изд., доп.– СПб.: ВВМ, 2012.– 165 с.
23. Fedele F., Brennan J., Ponce de León S., Dudley J., Dias F. Real world ocean rogue waves explained without the modulational instability // *Sci. Rep.*– 2016.– 6, 27715.– 11 p.

Материал поступил в редакцию 01.12.2016 г.
После доработки 22.05.2017 г.

A.V.Garmashov, Yu.N.Toloknov, A.I.Korovushkin

WIND WAVES IN THE NORTHWEST BLACK SEA IN 1995 – 2002

The long-term monitoring of wind waves was carried out in 1995 – 2002 on a fixed offshore gas production platform located in the northwest Black Sea. As a result of the analysis of more than 18000 wave records reliable statistical parameters of wind waves, describing the wave regime in the northwest Black Sea in 1995 – 2002, were obtained. It was found that the maximum wave height in summer reached 4,8 m, and in the winter – 8,76 m. Maximum wave height during 1-hour observation in the vast majority of cases exceeds 1,9 times the significant wave height.

KEYWORDS: wind wave, wave heights, wave period, monitoring, measurements, Karkinitzky Bay, Black Sea