

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 532.591+519.653

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65>

## Метод определения кривизны морских волн с использованием волномерных буйв традиционной формы

К. А. Глеб<sup>1, 2✉</sup>

<sup>1</sup>ФГУП "Крыловский государственный научный центр", Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉kostya\_gleb@mail.ru

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время волномерные буй (ВБ) повсеместно применяются для измерения статистических и спектральных параметров волн. Современные методы определения пространственного спектра волн используют их представление рядом Фурье, коэффициенты которого определяются по измерениям волновых процессов. Конструктивное исполнение современных ВБ позволяет измерять ординаты волн и углы волнового склона, чего достаточно для определения пяти членов ряда Фурье. Однако по измерениям волновой поверхности можно определить до девяти членов ряда. Для определения недостающих четырех членов необходима информация о кривизне волн. Отсутствие этой информации приводит к низкой разрешающей способности метода и к наличию в спектре отрицательных областей.

**Цель работы.** Разработка метода определения кривизны волн по измерениям ординат волн и углов волнового склона ВБ традиционной формы.

**Методы и материалы.** Приведены теоретические обоснования предложенного метода, представлено математическое моделирование нерегулярных волновых процессов в широком диапазоне интенсивности волн и экспериментальное исследование трех спектров волнения с трехкратным повтором каждого из них.

**Результаты.** Разработан метод определения кривизны волн по измерениям ВБ традиционной формы посредством численного дифференцирования результатов измерений углов волнового склона с использованием информации о скорости распространения волн. Метод дополнен корректировкой амплитудных значений по критерию соответствия спектральных характеристик волновых процессов. Моделирование показало хорошее совпадение расчетной кривизны с заданными значениями. Отклонение по дисперсии составило менее 1 %. Экспериментальное исследование показало большее отклонение по дисперсии – до 9 %, что можно объяснить инструментальной погрешностью и неучтенным влиянием отраженных волн.

**Заключение.** Отличительной особенностью метода является использование измерений ординат волн и углов волнового склона, выполненных ВБ традиционной формы без дополнительных конструктивных элементов. Необходимы дополнительные исследования метода для определения влияния других факторов волнения (крутизны волн, ширины спектра, трехмерной структуры волны и т. д.) на результаты определения кривизны и пространственного спектра.

**Ключевые слова:** волномерный буй, пространственный спектр, кривизна волн, скорость волн, численное дифференцирование, преобразование Фурье

**Для цитирования:** Глеб К. А. Метод определения кривизны морских волн с использованием волномерных буйв традиционной формы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 57–65. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65

---

**Источник финансирования:** Инициативная работа. Грант Правительства Российской Федерации 08-08.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.07.2020; принята к публикации после рецензирования 17.08.2020; опубликована онлайн 29.09.2020

---



## Method for Determining the Sea Waves Curvature Using Wave Buoys Conventional Shape

K. A. Gleb<sup>1,2✉</sup>

<sup>1</sup>Krylov State Research Centre, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>ITMO University, St Petersburg, Russia

✉ kostya\_gleb@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** Modern wave buoys due to their design make it possible to determine a directional wave spectrum using five coefficients of the Fourier series. However, up to nine members of the series can be determined from wave surface measurements. To determine the missing four members, information about wave curvature is necessary. It cannot be obtained by direct measurements with wave buoys of a conventional shape - a sphere, a cylinder or a saucer. The lack of information about the curvature of waves when determining the directional spectrum leads to its low resolution and to the presence of negative regions.

**Aim.** To develop a method for determining the curvature of waves from measurements with conventional shape wave buoys.

**Materials and methods.** Theoretical substantiations of the proposed method were presented, as well as mathematical modeling of irregular wave processes in a wide range of wave intensities and an experimental study of three wave spectra with a threefold repetition of each of them.

**Results.** Numerical simulations demonstrated a good agreement between the calculated curvature and the set values. The variance deviation was less than 1%. The experimental study demonstrated a greater deviation in variance - up to 9%, which can be explained by the influence of an instrumental error and by an unaccounted influence of reflected waves.

**Conclusion.** On the basis of the study, the method for determining the curvature of waves by numerical differentiation of wave slope measurements using information on a wave propagation speed has been developed. The method was supplemented by correcting amplitude values according to the criterion of matching the spectral characteristics of wave processes. Additional studies of the developed method are required to determine the influence of wave factors such as wave steepness, spectrum width, random multidirectional waves, etc. on the calculated curvature and on the directional spectrum.

**Keywords:** wave buoy, directional spectrum, wave curvature, wave speed, numerical differentiation, Fourier transform

**For citation:** Gleb K. A. Method for Determining the Sea Waves Curvature Using Wave Buoys Conventional Shape. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 57–65. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-57-65

**Source of financing:** Initiative work.

**Conflict of interest.** Author declares no conflict of interest. Grant of The Government of the Russian Federation 08-08.

Submitted 29.07.2020; accepted 17.08.2020; published online 29.09.2020

**Введение.** Измерение параметров морского волнения и контроль нарастания его интенсивности необходимы для решения задач безопасности и экономической эффективности различных техногенных объектов, таких, как морские платформы добычи углеводородов, плавучие заводы сжиженного природного газа, порты и др. Актуальность контрольных измерений обусловлена возможностью возникновения аварийной ситуа-

ции в случае превышения высотой волны допустимого значения, при котором может произойти разрушение технических средств. Безопасность этих объектов зависит от оценки текущего состояния морского волнения и его прогнозирования, которые невозможны без прямых измерений взволнованной поверхности. Непрерывные наблюдения волновой обстановки позволяют повысить точность и продолжительность прогнозов.

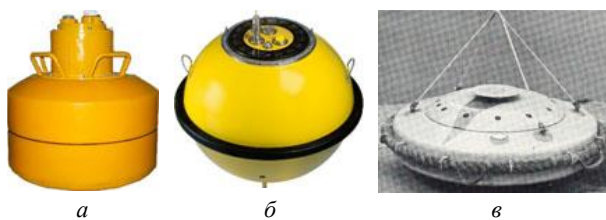


Рис. 1. ВБ традиционной формы: а – цилиндрический ВБ "Шторм"; б – шарообразный ВБ "Waverider"; в – блинновидный ВБ Лонге-Хиггинса

Fig. 1. Wavebuoys with conventional shapes: а – cylinder shaped buoy "Storm"; б – sphere shaped buoy "Waverider"; в – saucer shaped buoy of Longuet-Higgins

Ключевым средством контроля морского волнения являются волномерные буи (ВБ). Большинство ВБ предназначено для измерения только возвышений волновой поверхности, что позволяет определять лишь статистические параметры волнения (высоту, период волн, интенсивность). Однако для получения информации об угловом распределении энергии волн необходимо знать пространственный спектр [1], который можно получить по измерениям ординат волн и пространственных производных в двух взаимно-перпендикулярных направлениях с привязкой к сторонам света. Такими пространственными производными являются угол волнового склона и кривизна волн. Проблема заключается в том, что все современные ВБ, имеющие традиционную форму шара, цилиндра или блина (рис. 1), не способны измерять кривизну волн, информация о которой необходима для достоверного определения пространственного спектра последних.

Для измерения кривизны волн необходимы ВБ, выполненные по трехточечной (клеверовидной) схеме (рис. 2). Однако последние упоминания об использовании таких буюв датированы 1979 г. [2].

Методы описания пространственного спектра морской поверхности по измерениям ВБ отражены в трудах А. А. Свешникова [3] и М. Лонге-Хиггинса [1], которые предложили представлять пространственный спектр (рис. 3) рядом Фурье:

$$S(\omega, \theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)],$$

где  $\omega$  – круговая частота волн;  $\theta$  – географическое направление бега волн;

$$a_n(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) \cos(n\theta) d\theta,$$



Рис. 2. Клеверовидный ВБ, способный измерять кривизну волн

Fig. 2. Clover leaf buoy that can measure wave curvature

$$b_n(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) \sin(n\theta) d\theta$$

– коэффициенты ряда Фурье.

В вычислительных алгоритмах современных ВБ коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  определяются через корреляционные функции ординат волн и углов волнового склона. Недостаток измерительной информации о кривизне волн приводит к грубому приближению пространственного спектра к действительному, в частности к появлению в спектре волн отрицательных областей (рис. 4), что противоречит физике процесса и несоответствию плоского и пространственного спектров, которые взаимосвязаны следующим соотношением:

$$S_{\zeta}(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} S_{\zeta}(\omega, \theta) d\theta,$$

где  $S_{\zeta}(\omega)$  – плоский спектр волн;  $S_{\zeta}(\omega, \theta)$  – пространственный спектр волн.

Для устранения этих недостатков в современных ВБ применяют дополнительные методы математической обработки [4], такие, как метод максимального правдоподобия [6] и др. [7, 8]. С одной стороны, указанные методы позволяют в некоторых случаях избавиться от отрицательных областей спектра и повысить разрешающую способность по угловому распределению [9], с другой – приводят к появлению вторых, ложных пиков в спектре [4, 10], что может привести к ошибочной его интерпретации как второго направления бега волн с большой энергией. Это может повлиять на оценку текущей волновой обстановки и на рост погрешности прогнозирования волнения. Таким об-

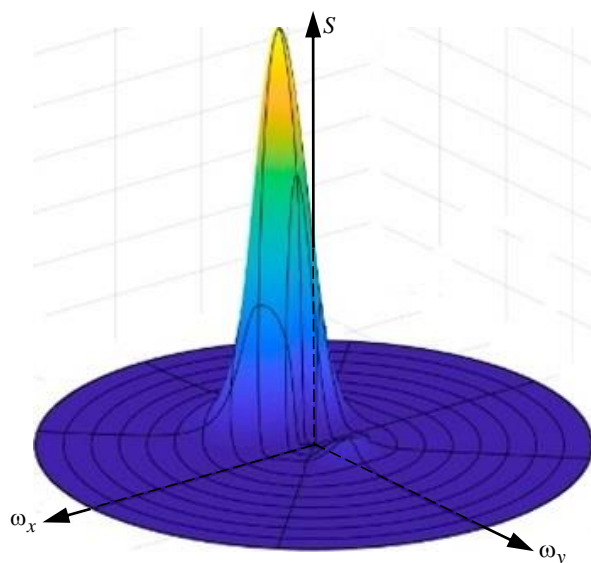


Рис. 3. Пример пространственного спектра морского волнения

Fig. 3. An example of the spatial spectrum of sea waves

разом, проблема достоверного определения пространственного спектра трехмерного волнения остается актуальной по настоящее время. Для ее решения необходим метод, позволяющий косвенным образом определить кривизну волн при помощи ВБ традиционной формы.

**Методы.** Кривизна волновой поверхности является второй пространственной производной ординат волн и первой производной углов волнового склона:

$$\zeta''_x = \frac{\partial^2 \zeta(x, y, t, \theta)}{\partial x^2} = -Ak^2 \cos^2 \theta \cos(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \varphi),$$

где  $\zeta$  – ордината волн;  $x, y$  – пространственные координаты;  $t$  – время;  $A$  – амплитуда волн;  $k$  – волновое число;  $\varphi$  – случайная фаза.

Приведенное выражение справедливо для аналитической записи кривизны в виде непрерывной гладкой кривой. Однако реальные средства измерения, такие, как ВБ, регистрируют процессы волнения в виде дискретных значений. В этом случае дифференцирование необходимо выполнять численным способом по приращению пространственной координаты  $dx$ , т. е. по смещению волны за один шаг опроса  $dt$ :

$$dx = v_\Phi dt = \left[1/(2\pi)\right] g \tau dt,$$

где  $v_\Phi = \left[1/(2\pi)\right] g \tau$  – фазовая скорость волн;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\tau$  – период волн.

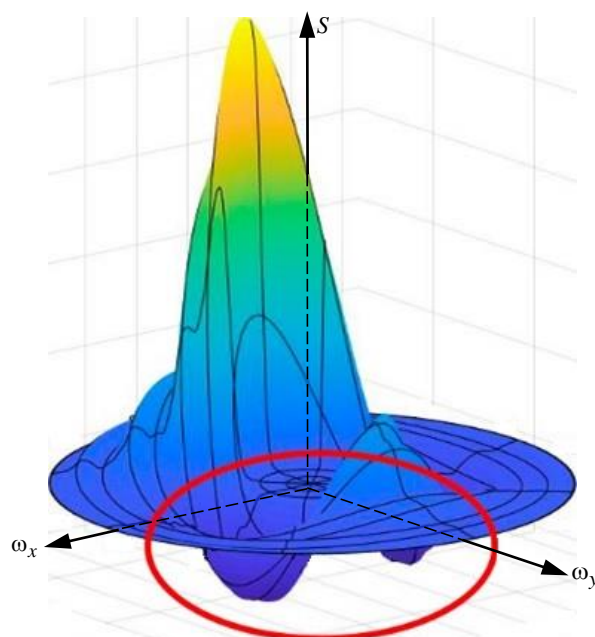


Рис. 4. Пример пространственного спектра морского волнения, построенного по пяти членам ряда Фурье

Fig. 4. An example of the spatial spectrum of sea waves calculated with 5 Fourier series coefficients

С учетом метода конечных разностей выражение для дискретных значений кривизны примет следующий вид:

$$\zeta''_x = \frac{2\pi(\zeta'_{x_{i+1}} - \zeta'_{x_{i-1}})}{(t_{i+1} - t_{i-1})gt}, \quad (1)$$

где  $\zeta'_x$  – угол волнового склона по оси  $x$ ;  $i$  – порядковый номер зарегистрированного дискретного значения величины.

Такой подход применим к определению кривизны регулярных и нерегулярных волн. По реализации ординат регулярной волны можно однозначно определить ее период, который будет постоянным для всей реализации, а значит, постоянным будет и смещение  $dx$ . В этом случае при расчете кривизны по (1) получится гладкая кривая с близкими к истинным значениями. Однако если волнение нерегулярное, возникает неопределенность определения периода волн, поскольку каждая волна будет иметь свой период, а значит, и свою скорость. Проблема усугубляется тем, что периоды кривизны смещены в более высокочастотную область относительно периодов ординат волн, что отражает соотношение их спектральных плотностей:

$$S_{\zeta''} = k^2 S_{\zeta'} = k^4 S_{\zeta}, \quad (2)$$

где  $S_{\zeta''}$  – спектр кривизны;  $S_{\zeta'}$  – спектр углов волнового склона;  $S_{\zeta}$  – спектр ординат.

Это означает, что в момент времени, когда ордината волны равна нулю (при пересечении нулевой линии), углы волнового склона или кривизны имеют ненулевые значения. В том случае, если соседние периоды волн отличаются друг от друга, расчетное значение скорости может резко изменяться, что приведет к скачкообразному изменению расчетного значения кривизны. В результате в расчетной временной зависимости кривизны возникают скачкообразные выбросы (рис. 5).

Чтобы устранить эти выбросы, можно использовать не скорость отдельно взятой волны, а среднюю скорость всех волн в зарегистрированной реализации. При этом необходимо выполнить корректировку амплитудных значений по методу обратной связи [11], чтобы минимизировать отклонения расчетных значений кривизны от истинных из-за несоответствия средней скорости волн и скорости волн каждой отдельной волны. В основе идеи метода корректировки амплитудных значений кривизны лежит (2), связывающее спектры процессов волн. Рассчитав реализацию кривизны по (1) с использованием средней скорости волн, необходимо определить ее спектр. Затем необходимо определить спектр по реализации углов волнового склона и в соответствии с (2) умножить его на  $k^2$  и получить теоретический спектр кривизны. Затем оба спектра кривизны можно сравнить между собой и определить, на каких частотах амплитудные значения расчетной кривизны отличаются от теоретических. Для сохранения частотных и фазовых распределений гармоник вместо спектральных плотностей целесообразно использовать преобразования Фурье

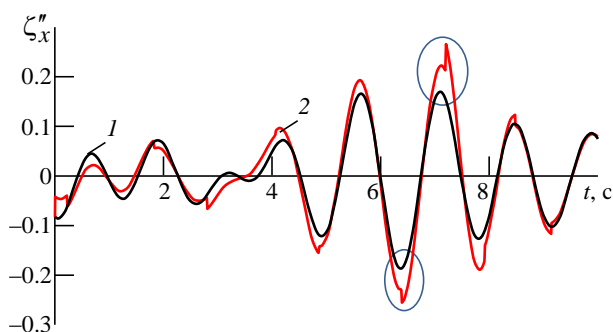


Рис. 5. Заданная (1) и расчетная (2) кривизна нерегулярной волны. Овалами отмечены выбросы расчетных значений

Fig. 5. The given (1) and calculated (2) curvature of the irregular wave. Ovals mark outliers of calculated values

временных реализаций. При этом необходимо учесть, что в (2) при  $S_{\zeta'}$  волновое число будет стоять в первой степени, а при  $S_{\zeta}$  – в квадрате.

Следует отметить, что указанные теоретические обоснования метода справедливы при допущении, что волнение рассматривается в рамках линейной теории как стационарный эргодический процесс, а глубина акватории не учитывается.

Разработанный метод был проверен численным моделированием в программе MatLab и экспериментально в опытовом волновом бассейне. В ходе численного моделирования формировались реализации нерегулярных волн (ординаты, углы и кривизна) по формулам:

$$\begin{aligned}\zeta(x, t) &= \sum_{i=1}^n A_i \cos(k_i x \cos \theta - \omega_i t + \varphi_i); \\ \zeta'_x(x, t) &= \partial \zeta(x, t) / \partial x = \\ &= -\sum_{i=1}^n A_i k \cos \theta \sin(k_i x \cos \theta - \omega_i t + \varphi_i); \\ \zeta''(x, t) &= \partial^2 \zeta(x, t) / \partial x^2 = \\ &= -\sum_{i=1}^n A_i k^2 \cos^2 \theta \cos(k_i x \cos \theta - \omega_i t + \varphi_i),\end{aligned}\quad (3)$$

где  $A_i = \sqrt{2S_P(\omega)(\omega_{i+1} - \omega_i)}$  – амплитуды  $i$ -х волн, причем  $S_P(\omega)$  – спектр Пирсона–Московица [12].

Затем по разработанному методу по реализациям ординат волн и углов волнового склона рассчитывались кривизны волн с корректировкой амплитудных значений. Обе реализации кривизны сравнивались между собой по дисперсии, поскольку этот параметр связан с энергией процесса волнения:

$$\delta = \pm \left| \frac{D(\zeta'') - D(\zeta''_M)}{D(\zeta''_M)} \right| 100\%, \quad (4)$$

где  $D(\zeta'')$  – дисперсия заданной реализации кривизны;  $D(\zeta''_M)$  – дисперсия реализации кривизны, полученной по разработанному методу.

Режимы моделировались в диапазоне интенсивности волн от 1 до 9 баллов (высоты волн 3 % обеспеченности от 0.2 до 12.0 м, периоды волн от 2.08 до 12.76 с. Под высотой волн 3 % обеспеченности понимается такая высота волны, вероятность превышения которой другими волнами в реализации составляет 3 %.





Рис. 6. Моделируемое волнение в опытовом волновом бассейне

Fig. 6. Simulated Waves in the Experimental Wave Pool

Табл. 1. Характеристики воспроизводимых спектров Пирсона–Московица в опытовом волновом бассейне

Table 1. Characteristics of the Pearson–Moskowitz spectra Modeled in the Experimental Wave Basin

Высота волн трехпроцентной обеспеченности $h_3$ , мм	Период волн, соответствующий частоте максимума спектра волнения $T_p$ , с
120	1.50
150	1.68
200	1.95

Экспериментальное исследование проводилось в опытовом волновом бассейне ФГУП "Крыловский государственный научный центр", в котором моделировались нерегулярные волны (рис. 6) с характеристиками, представленными в табл. 1. Каждый режим волнения повторялся по 3 раза.

Для регистрации ординат волн, углов волнового склона и кривизны волн использовался специально созданный для этой задачи электролитический волнограф (рис. 7) [13], содержащий 9 пар струн с расстоянием 150 мм между парами. Использование волнографа вместо ВБ или его масштабной модели обусловлено меньшим значением инструментальной погрешности. Волнографы были калиброваны, погрешность измерения волн в каждой точке волнографа составила не более  $\pm 1.9\%$ .

Методика сравнения результатов инструментальных измерений кривизны волн и расчетных значений аналогична методике математического моделирования.

**Результаты.** Предложенные решения позволили избавиться от выбросов расчетных реализаций кривизны и получить значения, близкие к искомым (рис. 8). На рисунке отчетливо видно, что кривизна,



Рис. 7. Струнный электролитический волнограф с девятью парами струн для экспериментального исследования разработанного метода

Fig. 7. String electrolytic wave recorder with 9 pairs of strings for experimental study of the developed method

рассчитанная по методу с корректировкой амплитудных значений, практически совпадает с искомой кривизной. Отношение дисперсий заданной и расчетной кривизны, рассчитанное по (4), составляет не более  $0.83\%$  в диапазоне интенсивности волн от 1 до 9 баллов ( $b$  – интенсивность волн, баллы) (рис. 9).

Результаты обработки экспериментальных данных показали, что максимальное отклонение дисперсии кривизны (табл. 2), полученной по разработанному методу, от заданных значений составило  $9.27\%$ . Необходимо отметить, что погрешность возрастала с уменьшением высот и периодов моделируемых волн. Пример полученных реализаций кривизны волн представлен на рис. 10.

**Заключение.** В результате исследований предложен метод определения кривизны морских волн, заключающийся в численном дифференцировании временной реализации углов волнового склона с корректировкой амплитудных значений на основа-

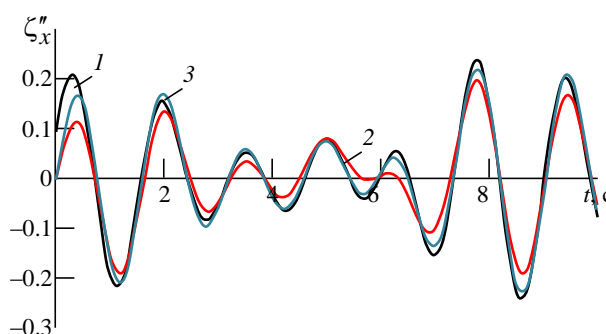


Рис. 8. Коррекция кривизны нерегулярных волн: 1 – заданная кривизна по (3); 2 – расчетная кривизна без коррекции; 3 – расчетная кривизна с коррекцией

Fig. 8. Irregular wave curvature correction: 1 – a given curvature to (3); 2 – calculated curvature without correction; 3 – calculated curvature corrected according

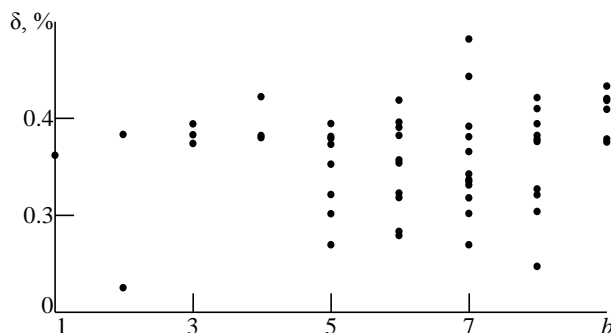


Рис. 9. Отношение дисперсий заданной и расчетной кривизны для промоделированных режимов нерегулярного волнения

Fig. 9. The ratio of variances of a given and calculated curvature for simulated irregular waves

Табл. 2. Результат обработки экспериментальных данных

Table 2. The result of processing of the experimental data

Высота волн трехпроцентной обеспеченности $h_3$ , мм/мм	Период максимумов спектра волнения $\tau_p$ , с	Эксперимент		
		1	2	3
		Отношение дисперсий расчетной и заданной кривизны $\delta$ , %		
120	1.50	9.27	7.58	8.17
150	1.68	6.91	7.05	6.13
200	1.95	4.95	5.53	5.20

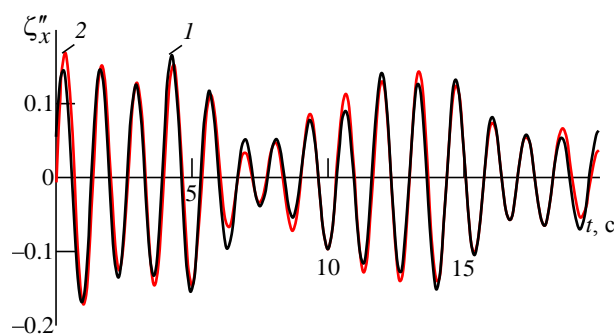


Рис. 10. Пример кривизны реализаций нерегулярной волны, полученных в ходе экспериментального исследования: 1 – заданная кривизна, 2 – расчетная кривизна

Fig. 10. An example of the curvature of the irregular wave realizations obtained during the experimental study:

1 – given curvature, 2 – calculated curvature

нии совпадения спектральных плотностей волновых процессов. Численное и экспериментальное моделирование показало работоспособность разработанного метода. С учетом принятых допущений полученное значение отношения дисперсии расчетной кривизны к заданной составило 0.83 %.

Экспериментальное исследование показало отношение, практически на порядок большее: от 4.95 до 9.27 %, что можно объяснить инструментальной погрешностью струнного волнографа. По причине того, что заданные реализации углов волнового склона и кривизны волн получены косвенным методом, так как рассчитывались по реализациям ординат волн, полученным в девяти точках, погрешности измерений арифметически суммировались, поскольку регистрируемые процессы коррелируемы. Кроме того, большое влияние на расчет кривизны могли оказать волны ряби, отраженные от стен и колонн бассейна. Подтверждением этого является то, что при исследовании волн отношение дисперсий с ростом интенсивности волнения снижается.

Полученные результаты показывают, что разработанный метод определения кривизны волн при помощи ВБ традиционной формы работоспособен. Метод применим в современных ВБ, например в ВБ "Шторм" [14], а также с небольшими группами струнных волнографов [15] для определения пространственного спектра по девяти членам ряда Фурье. Тем не менее необходимы дальнейшие исследования метода в части влияния иных факторов, таких, как крутизна волн, ширина спектра, наличие трехмерных волн и т. д. Кроме того, целесообразно изучить влияние погрешности определения кривизны волн на погрешность получения их пространственного спектра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longuet-Higgins M. S., Cartwright D. E., Smith N. D. Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves using the Motions of a Floating Buoy // Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, Easton, USA, May 1–4, 1961. New York: Prentice-Hall, 1963. P. 111–132, doi: 10.1016 /0011-7471(65)91457-9
2. Observation of the Power Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy / H. Mitsuyasu, F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda, K. Rikiishi // J. of

- Physical Oceanography. 1979. Vol. 10, iss. 2. P. 286–296. doi: 10.1175/1520-0485(1980)010<0286:ootpso>2.0.co;2
3. Свешников А. А. Определение вероятностных характеристик трехмерного волнения моря // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Механика и машиностроение. 1959. № 3. С. 32–41.
4. Earle M. D., Steele K. E., Wang D. W. C. Use of Advanced Directional Wave Spectra Analysis Methods // Ocean Engineering. 1998. Vol. 26, iss. 12. P. 1421–1434. doi: 10.1016/S0029-8018(99)00010-4.

5. Hashimoto N., Kobune K. Estimation of Directional Spectra from the Maximum Entropy Principle // Proc. 5th Int. Offshore Mech. and Arct. Eng. Symp., Tokyo, Japan. British Maritime Technology: London, 13–18 Apr. 1986. Vol. 1. P. 80–85.

6. Krogstad H. E. Maximum Likelihood Estimation of Ocean Wave Spectra from General Arrays of Wave Gauges // Modeling, identification and control. 1988. Vol. 9, № 2. P. 81–97. doi: 10.4173/mic.1988.2.3.

7. Benoit M., Frigaard P., Schäffer A. Analysing Multidirectional Wave Spectra: Alternative Classification of Available Methods // Proc. 27<sup>th</sup> IAHR Congress, Seminar on Multidirectional Waves and their Interaction with Structures, San Francisco, USA, 10–15 Aug. 1997. Ottawa: Canadian Government Publishing, 1997. P. 131–158.

8. Plant W. J., Donelan M. A. Directional Surface Wave Spectra from Point Measurements of Height and Slope // J. Atmos. Oceanic Technol. 2020. Vol. 37, № 1. P. 67–83. doi: 10.1175/JTECH-D-19-0128.1

9. Gorman R. M. Estimation of Directional Spectra from Wave Buoys for Model Validation // Procedia IUTAM. 2018. Vol. 26. P. 81–91. doi: 10.1016/j.piutam.2018.03.008.

10. Kim T., Lin L., Wang H. Comparisons of Directional Wave Analysis Methods // Waves'93. Ocean Wave Measurement and Analysis: Proc. of the 2<sup>nd</sup> Intern. Symp., New Orleans,

USA, 25–28 July 1993. New York: American Society of Civil Engineers, 1993. P. 554–568.

11. Глеб К. А., Грязин Д. Г. Применение стохастического метода управления при исследовании алгоритма расчета характеристик волнения // Всерос. науч. конф. по проблемам управления в технических системах, Санкт-Петербург, 30 окт. – 01 нояб. 2019 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2019. Т. 1. С. 268–270.

12. Pierson W. J., Moskowitz L. A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii // J. of Geophysical Research. 1964. Vol. 69, iss. 24. P. 5181–5190. doi: 10.1029/JZ069i024p05181

13. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 255 с.

14. Волномерный буй "Шторм" с инерциальным микромеханическим измерительным модулем. Результаты разработки и испытаний / Д. Г. Грязин, Л. П. Старосельцев, О. О. Белова, К. А. Глеб // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 667–674. doi: 10.7868/s0030157417040165

15. Dimitra I. M., Constantine D. M., Michalis K. C. A Simple Method for Obtaining Wave Directional Spreading // J. of Applied Water Engineering and Research. 2017. Vol. 5, iss. 2. P. 129–141. doi: 10.1080/23249676.2016.1172270

## Информация об авторах

**Глеб Константин Андреевич** – начальник сектора ФГУП "Крыловский государственный научный центр", аспирант Университета ИТМО. Автор восьми научных работ. Сфера научных интересов – волновые процессы в морях и океанах, измерение спектральных параметров волн.

Адрес: ФГУП "Крыловский государственный научный центр", Московское ш., д. 44, Санкт-Петербург, 196158, Россия

E-mail: kostya\_gleb@mail.ru

## References

1. Longuet-Higgins M. S., Cartwright D. E., Smith N. D. Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves using the Motions of a Floating Buoy. Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, Easton, USA, May 1–4, 1961. New York: Prentice-Hall, 1963, pp. 111–132. doi: 10.1016/0011-7471(65)91457-9

2. Mitsuyasu H., Tasai F., Suhara T., Mizuno S., Ohkusu M., Honda T., Rikiishi K. Observation of the Power Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. J. of Physical Oceanography, 1979, vol. 10, iss. 2, pp. 286–296. doi: 10.1175/1520-0485(1980)010<0286:ootps>2.0.co;2

3. Sveshnikov A. A. Determination of the Probabilistic Characteristics of Three-Dimensional Sea Waves. *Izv. AN USSR. Otd. Tech. nauk. Mekhanika i mashinostroenie* [Izv. Academy of Sciences of the USSR. OTN Mechanics and mechanical engineering]. 1959, no. 3, pp. 32–41. (In Russ.)

4. Earle M. D., Steele K. E., Wang D. W. C. Use of Advanced Directional Wave Spectra Analysis Methods. Ocean Engineering, 1998, vol. 26, iss. 12, pp. 1421–1434. doi: 10.1016/S0029-8018(99)00010-4

5. Hashimoto N., Kobune K. Estimation of Directional Spectra from the Maximum Entropy Principle. Proc. 5<sup>th</sup>

Int. Offshore Mech. and Arct. Eng. Symp., Tokyo, Japan, 13–18 Apr., British Maritime Technology, London U.K., 1986, vol. 1, pp. 80–85.

6. Krogstad H. E. Maximum Likelihood Estimation of Ocean Wave Spectra from General Arrays of Wave Gauges. Modeling, identification and control. 1988, vol. 9, no. 2, pp. 81–97. doi: 10.4173/mic.1988.2.3

7. Benoit M., Frigaard P., Schäffer A. Analysing Multidirectional Wave Spectra: Alternative Classification of Available Methods. Proc. 27<sup>th</sup> IAHR Congress, Seminar on Multidirectional Waves and their Interaction with Structures, San Francisco, USA, 10–15 Aug. 1997, Canadian Government Publishing, 1997, pp. 131–158.

8. Plant W. J., Donelan M. A. 2020: Directional Surface Wave Spectra from Point Measurements of Height and Slope. J. Atmos. Oceanic Technol. 2020, vol. 37, no. 1, pp. 67–83. doi: 10.1175/JTECH-D-19-0128.1

9. Gorman R. M. Estimation of Directional Spectra from Wave Buoys for Model Validation. Procedia IUTAM, 2018, vol. 26, pp. 81–91. doi: 10.1016/j.piutam.2018.03.008

10. Kim T., Lin L., Wang H. Comparisons of Directional Wave Analysis Methods. Proc. of the Second Int. Symposium



on Ocean Wave Measurement and Analysis New Orleans, USA, 25–28 July, 1993. American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1994, pp. 554–568.

11. Gleb K. A., Gryazin D. G. Application of the Stochastic Control Method in the Study of the Algorithm for Calculating Wave Characteristics. *Vseross. nauchnaya konf. po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh* [Russian scientific conf. on control problems in technical systems]. 30 Oct. – 01 Nov., 2019, St Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2019, vol. 1, pp. 268–270. (In Russ.)

12. Pierson W. J., Moskowitz L. A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii. *J. of Geophysical Research*. 1964,

vol. 69, iss. 24, pp. 5181–5190. doi: 10.1029/JZ069i024p05181

13. Davidan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A. *Vetrovoe volnenie v mirovom okeane* [Wind Waves in the World's Oceans]. L. Gidrometeoizdat, 1985, 255 p. (In Russ.)

14. Gryazin D. G., Starosel'tsev L. P., Belova O. O., Gleb K. A. *Volnomernyi bui "Shtorm" s inertsiyal'nym mikromekhanicheskim izmeritel'nym modulem. Okea-nologiya* [Oceanology]. 2017, vol. 57, no. 4. pp. 667–674. doi: 10.7868/s0030157417040165 (In Russ.)

15. Dimitra I. M., Constantine D. M., Michalis K. C. A Simple Method for Obtaining Wave Directional Spreading. *J. of Applied Water Engineering and Research*. 2017, vol. 5, iss. 2, pp. 129–141. doi: 10.1080/23249676.2016.1172270

### Information about the author

**Konstantin A. Gleb**, Head of sector in Krylov State Research Centre, post graduate student in ITMO University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: ocean and sea waves and spectral characteristics. Address: Krylov State Research Centre, 44 Moskovskoe Ave., St Petersburg 196158, Russia  
E-mail: kostya\_gleb@mail.ru

---