

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

УДК 519.248

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-5-99-111>

Статистический анализ локальных экстремумов взволнованной морской поверхности на основе данных математического моделирования

Н. С. Пыко[✉], Е. Д. Орандаренко, М. И. Богачев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
"ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] goststalker13@gmail.com

Аннотация

Введение. Обобщенное распределение экстремальных значений (Generalized Extreme Value – GEV) считается единственным возможным предельным распределением нормированных максимумов независимых и одинаково распределенных случайных величин. Традиционно выделяются 3 возможных типа распределения экстремальных значений, называемых также типами I, II и III. Отнесение случайного процесса или суперпозиции нескольких случайных процессов по виду распределения локальных максимумов к какому-либо типу, а также оценка параметров распределения может являться основанием для классификации или критерием оценки природных или техногенных процессов. При исследовании морской поверхности широко используются методы дистанционного радиолокационного зондирования, позволяющие за короткое время оценивать большие участки водной поверхности. Выделение экстремумов в изображении водной поверхности, построенном на основе отраженных сигналов, и дальнейшая оценка параметров их распределения позволяют сделать выводы о силе ветра, а также наличии зыби.

Цель работы. Исследование методом математического моделирования распределения локальных максимумов взволнованной морской поверхности при различной ветроволновой обстановке.

Материалы и методы. Для оценки состояния взволнованной морской поверхности использовалась оценка параметров обобщенного распределения экстремальных значений.

Результаты. Построена математическая модель взволнованной морской поверхности, включающая в себя ветровое волнение и волны зыби. Показано, что распределение локальных максимумов в отсутствие зыби аппроксимируется распределением Вейбулла, т. е. относится к III типу распределения GEV, параметры которого зависят от скорости ветра, при этом зависимость от глубины практически отсутствует. При наличии волн зыби распределение локальных экстремумов относится ко II типу распределения GEV, т. е. является распределением Фреше, а его параметры зависят от угла между волнами зыби и ветровыми волнами.

Заключение. На основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования параметров распределения локальных экстремумов для характеристик морского волнения, и в первую очередь – для прогнозирования аномальных ситуаций на море, связанных с влиянием волн зыби.

Ключевые слова: ветровое волнение, волны зыби, распределение экстремальных значений, локальные максимумы, дистанционное зондирование

Для цитирования: Пыко Н. С., Орандаренко Е. Д., Богачев М. И. Статистический анализ локальных экстремумов взволнованной морской поверхности на основе данных математического моделирования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 99–111. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-99-111

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: грант Российского научного фонда № 21-79-10375, <https://rscf.ru/project/21-79-10375/>

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; принята к публикации после рецензирования 24.09.2023; опубликована онлайн 29.11.2023



Statistical Analysis of Local Extrema in Rough Sea Surfaces Based on Computer Simulation

Nikita S. Pyko[✉], Elena D. Orandarenko, Mikhail I. Bogachev
Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

[✉] goststalker13@gmail.com

Abstract

Introduction. Generalized extreme value (GEV) distributions represent a universal description of the limiting distribution of the normalized local maxima statistics for independent and identically distributed data series. Extreme value distributions are commonly classified into three different types representing different functional forms and thus varying in shape, also known as types I, II, and III. Thus, attribution of some observational data series to a particular type of its local maxima distribution, as well as fitting of the distribution parameters, provides certain information about the laws governing the underlying natural or technogenic process. Radar-based remote sensing techniques represent a ubiquitous tool for analyzing large patterns of the sea surface and determining the parameters of the waves. In turn, understanding the laws governing the extreme values in the rough sea surface obtained from their radar images followed by evaluation of their distribution parameters, depending on the wind speed and direction, as well as the presence of surface currents and swells, can be useful for predicting wave height.

Aim. Analysis of the functional forms governing the local extreme value distributions in a rough sea surface for the given wind and swell parameters based on computer simulations.

Materials and methods. For the rough sea surface simulated by an additive harmonic synthesis procedure, the local extreme value distribution was fitted using the least-mean-squares technique. The fitted parameters were then used for their classification according to the three predetermined types.

Results. Computer simulations of a rough sea surface with combined wind and swell waves were performed. It is shown that the distribution of local maxima in the absence of swell waves could be well approximated by the Weibull (type III GEV) distribution, with the parameters explicitly depending on the wind speed. At the same time, no significant dependence on the sea depth was observed. On the contrary, in the presence of additional swell waves, the distribution of local extrema could be rather attributed to the Fréchet (type II GEV) distribution, with the parameters additionally depending on the angle between the wind and swell waves.

Conclusion. The laws governing the distributions of local wave extrema in rough seas are in a good agreement with the theoretical GEV approximations, with the distribution parameters being deductible from the key features of the waves. This indicates the predictability of wave height extrema from sea surface measurements, which can be performed based on remote radar observations.

Keywords: wind waves, swell waves, extreme value distribution, local maxima, remote sensing

For citation: Pyko N. S., Orandarenko E. D., Bogachev M. I. Statistical Analysis of Local Extrema in Rough Sea Surfaces Based on Computer Simulation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 99–111. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-99-111

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgment: Russian Science Foundation grant № 21-79-10375, <https://rscf.ru/project/21-79-10375/>

Submitted 12.05.2023; accepted 24.09.2023; published online 29.11.2023

Введение. Радиолокационные методы дистанционного зондирования представляют собой повсеместно распространенный инструмент для анализа морской поверхности и определения параметров волнения. Понимание статистических закономерностей формирования экстремальных значений волнения, полученных по радиолокационным изображениям мор-

ской поверхности, оценка параметров их распределения в зависимости от скорости и направления ветра, а также наличия поверхностных течений и зыби имеют практическое значение для прогнозирования высоты волн. Целью проделанной работы является исследование распределения локальных экстремумов морской поверхности при различных парамет-

рах морского волнения методом математического моделирования. Актуальность тематики проведенных исследований подтверждается многочисленными публикациями, посвященными моделированию морской поверхности и анализу экстремальных значений высоты волн (см., например, [1–5]).

Рассмотрена модель ветровых волн, полученная методом гармонического синтеза и основанная на применении двумерного спектра морского волнения. Параметрами модели являются глубина и скорость ветра. Оценены параметры распределения локальных максимумов в зависимости от параметров модели. Показано, что распределение локальных максимумов относится к типу III обобщенного распределения экстремальных значений и представляет собой распределение Вейбулла. Исследована зависимость параметров распределения – медианы, коэффициентов формы, сдвига и масштаба от глубины и силы ветра в модели на основе спектра Пирсона–Московица.

Описана модель морской поверхности, связанная с присутствием двух волновых процессов: волн зыби на фоне ветрового волнения. Показано, что параметры распределения локальных максимумов в этом случае зависят от величины угла между ветровыми волнами и волнами зыби, а само распределение относится к типу II обобщенного распределения экстремальных значений и представляет собой распределение Фреше.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки характера морского волнения, особенно в случае наличия дополнительных типов волнения, присутствующих на фоне ветровых волн.

Метод исследований. Плотность вероятности экстремальных значений описывается распределением GEV (Generalized Extreme Value). Обобщенное распределение экстремальных значений (GEV) представляет собой семейство непрерывных распределений вероятностей. Традиционно выделяются 3 возможных типа распределения экстремальных значений GEV, называемых также типами I, II и III. Эти распределения в технической литературе известны как распределения Гумбеля, Фреше и Вейбулла [6–8].

Согласно теореме об экстремальных значениях распределение GEV считается единственным возможным предельным распределением нормированных максимумов независимых и одинаково распределенных случайных величин. В [9] показано, что GEV также успешно описывает распределения локальных максимумов и для моделей рядов данных с немарковскими корреляционными свойствами, в том числе и для моделей с долговременной зависимостью. Исследования авторов настоящей статьи, представленные в [10], показали, что флуктуационная функция для моделей морского волнения в широком диапазоне масштабов имеет степенной вид, что является признаком наличия долговременной зависимости. Следовательно, применение обобщенного распределения экстремальных значений в отношении локальных максимумов, определяемых по моделям морской поверхности, а в последующих исследованиях и в отношении реальных данных дистанционного зондирования является правомерным.

Функция плотности вероятности обобщенного распределения экстремальных значений (GEV):

$$F(x) = \frac{1}{\beta} t(x)^{\varepsilon+1} e^{-t(x)}, \quad (1)$$

где β – параметр масштаба; $t(x) = \begin{cases} \frac{-1}{\left[1 + \varepsilon \left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)\right]^{\frac{1}{\varepsilon}}}, & \text{если } \varepsilon \neq 0; \\ e^{-\frac{(x-\mu)}{\beta}}, & \text{если } \varepsilon = 0; \end{cases}$ ε – параметр формы; μ – параметр местоположения.

Распределение Гумбеля, известное также как логарифмическое распределение Вейбулла, соответствует случаю равенства нулю параметра формы и, тем самым, является более привлекательным для использования, поскольку требует определения всего двух, а не трех, параметров.

Установлено, что распределения с экспоненциально убывающими "хвостами" плотности вероятности, например нормальное, относятся к распределению Гумбеля (тип I). Распределения, "хвосты" которых убывают полиномиально, относятся к распределению Фреше (тип II). Распределения, "хвосты" которых являются конечными, относятся к распределению

Вейбулла (тип III). Параметр формы для распределения Фреше является положительным, а для распределения Вейбулла – отрицательным.

Исследования были направлены на установление вида плотности вероятности локальных экстремумов, соответствующей как ветровому волнению, так и суперпозиции ветрового волнения и волн зыби, а также на оценивание влияния параметров модели морского волнения на параметры полученной плотности вероятности.

Описание объекта исследований. С позиций спектрального анализа структуру волнового поля при ветровом волнении можно выразить как суперпозицию достаточно большого числа элементарных составляющих, принимая за последние плоские синусоидальные волны различных амплитуд, фаз и направлений распространения, каждая из которых описывается выражением [11]

$$z(x, y, t) = \alpha \sin \left\{ k \left[x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \right] - \omega t + \varphi \right\}, \quad (2)$$

где x, y, t – текущие пространственно-временные координаты; α – амплитуда элементарной волны; k – волновое число; θ – угол между направлением распространения элементарной волны и направлением наблюдения; ω – частота элементарной волны; φ – случайная фаза.

Амплитуду элементарной волны можно выразить через двумерный энергетический спектр волнения $S(\omega, \theta)$ и интервалы частот $\Delta\omega$ и направлений $\Delta\theta$:

$$\alpha = \sqrt{2S(\omega, \theta) \Delta\omega \Delta\theta}. \quad (3)$$

Двумерный спектр морского волнения, в свою очередь, можно выразить как произведение частотного $S_\omega(\omega)$ и углового спектров $S_\theta(\omega, \theta)$:

$$S(\omega, \theta) = S_\omega(\omega) S_\theta(\omega, \theta), \quad (4)$$

причем

$$S_\omega(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) d\theta. \quad (5)$$

На основании (2) и (3) взволнованную морскую поверхность можно представить в виде

$$z(x, y, t) = \sum_{p=1}^{N_\omega} \sum_{q=1}^{N_\theta} \sqrt{2S(\omega_p, \theta_q) \Delta\omega \Delta\theta} \times \sin \left\{ k_p \left[x \cos(\theta_q) + y \sin(\theta_q) \right] - \omega_p t + \varphi_{p,q} \right\}, \quad (6)$$

где N_ω и N_θ – число задаваемых при моделировании значений частоты и угла соответственно.

Связь частоты волн и волнового числа определяется дисперсионным соотношением

$$\omega = \sqrt{gk \left(1 + \frac{\sigma}{\rho g} k^2 \right) \text{th}(kR)}, \quad (7)$$

где $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – гравитационная постоянная;

$\sigma = 74.34 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ – поверхностное натяжение на границе раздела сред воздух – морская вода; ρ – плотность воды; R – глубина моря.

В первой части исследований было рассмотрено влияние силы ветра и глубины акватории на распределение локальных максимумов при наличии только устоявшегося ветрового волнения. Чтобы устранить зависимость влияния угла между направлением визирования и направлением ветра, воспользуемся формулой (5), тогда (6) примет вид

$$z(x, t) = \sum_{p=1}^{N_\omega} \sqrt{2S(\omega_p) \Delta\omega} \sin(k_p x - \omega_p t + \varphi_p).$$

При моделировании предполагалось, что ветровое волнение устоявшееся и может быть описано спектром Пирсона–Московица [11]:

$$S(\omega) = 7.04 \frac{m_0}{\bar{\omega}} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^5 \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right],$$

где m_0 – нулевой момент спектра морского волнения; $\bar{\omega}$ – средняя частота морских волн; $\omega_m = g/U_{19.5}$; $U_{19.5}$ – скорость ветра на высоте 19.5 м.

Учитывая, что $\omega_m = 0.71\bar{\omega}$:

$$S(\omega) = 4.98 \frac{m_0}{\omega_m} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^5 \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right].$$

В соответствии с линейной моделью средние значения высот (\bar{h}) связаны с моментами спектра следующим выражением [11, 12]:

$$m_0 = \frac{\bar{h}^2}{2\pi}.$$

Значимая высота установившегося волнения ($h_{1/3}$) может быть определена по формуле [11]

$$h_{1/3} = 0.0205 U_{10}^2 \left\{ 1 - \exp \left[-1.3 \left(\frac{t}{0.526 U_{10}} \right)^{0.6} \right] \right\},$$

где U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м; t – продолжительность воздействия ветра. С учетом соотношения между средней и значимой высотами волн [11, 12] средняя высота волн будет равна:

$$\bar{h} = 0.0128 U_{10}^2 \left\{ 1 - \exp \left[-1.3 \left(\frac{t}{0.526 U_{10}} \right)^{0.6} \right] \right\}.$$

Как видно из представленных выражений, в расчетах используются скорости ветра на разных высотах. При моделировании было использовано следующее, связывающее их соотношение [13]:

$$U(h) = U_{10} \left[1 + C \ln \left(\frac{h}{10} \right) \right];$$

$$C = 0.0573 \sqrt{1 + 0.15 U_{10}};$$

$$h = 19.5 \text{ м.}$$

Во второй части исследования было необходимо учитывать разницу в направлении распространения ветровых волн и волн зыби. В связи с этим при моделировании были использованы двумерные спектры ветрового волнения и зыби (6). Частотный спектр зыби может быть описан выражением [12]

$$S(\omega) = \frac{6 m_0}{\omega_m} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^6 \exp \left[-1.2 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^5 \right].$$

Для определения средней высоты волн зыби были использованы табличные данные [11], показывающие соотношение высот волн зыби и исходного ветрового волнения в зависимости от времени, прошедшего с момента прекращения ветра. В табл. 1 приведены расстояние D , на которое распространяется зыбь за время t , и высота зыби h в конце этого расстояния в зависимости от начальной высоты волнения h_0 .

Есть множество вариантов представления углового спектра волнения, описанных, например, в [10, 11, 14, 15]. Однако большинство из них рассмотрены только для ветрового волнения. Для углового спектра зыби основной моделью является распределение \cos^{2s} [13]. Исходя из этого, при моделировании было использовано угловое распределение \cos^{2s} :

$$S_\theta(\omega, \theta) = \frac{\Gamma(s+1)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(s+0.5)} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right),$$

где Γ – гамма-функция; $s = 15 \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^\mu$ для

ветровых волн; $s = 50 \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^\mu$ для волн зыби;

$$\mu = \begin{cases} 0.1, & \omega < \omega_m; \\ -2, & \omega \geq \omega_m. \end{cases}$$

Суммарное волнение можно представить суммой ветровых волн z_w и волн зыби z_s [16]:

$$z = z_w + z_s. \quad (8)$$

Табл. 1. Параметры зыби при различных условиях
 Tab. 1. Rough sea parameters under different conditions

h_0 , м	t , ч									
	6		12		18		24		30	
	D , м. миля	h , м	D , м. миля	h , м	D , м. миля	h , м	D , м. миля	h , м	D , м. миля	h , м
10	110	8.0	220	6.4	350	5.2	475	4.4	600	4.0
9	100	7.2	200	5.8	310	4.9	430	4.1	560	3.4
8	90	6.4	180	5.2	275	4.6	380	3.8	495	3.3
7	80	5.6	160	4.6	240	4.2	335	3.5	420	3.2
6	65	4.8	135	4.1	205	3.7	290	3.2	370	2.8
5	50	4.0	110	3.5	170	3.1	240	2.9	300	2.5
4	40	3.2	90	2.8	140	2.6	190	2.3	240	1.9
3	30	2.3	70	2.0	110	1.7	150	1.5	180	1.3
2	20	1.5	50	1.3	75	0.8	100	0.7	–	–

Для упрощения моделирования в координатах дальность-азимут формула (6) была представлена в полярных координатах [13]:

$$z(r, \psi, t) = \sum_{p=1}^{N_\omega} \sum_{q=1}^{N_\theta} \sqrt{2S(\omega_p, \theta_q) \Delta\omega \Delta\theta} \times \sin \left\{ k \left[r \cos(\psi) \cos(\theta_q) + r \sin(\psi) \sin(\theta_q) \right] - \omega_p t + \phi_{p,q} \right\}, \quad (9)$$

где r, ψ, t – текущие пространственно-временные координаты.

Исследование распределений локальных максимумов в моделях морской поверхности при установившемся ветровом волнении. Статистический анализ характеристик распределения локальных максимумов был применен к моделям морской поверхности, построенным на основании двумерного спектра Пирсона–Московица. Были рассмотрены значения силы ветра (скорости ветра) 3; 6; 9; 12; 15 м/с и значения глубин 1; 2; 5; 10; 50; 1000 м.

На рис. 1, 2 представлены примеры распределения амплитуд максимумов при разных показателях силы ветра и глубины. Как видно из представленных примеров, эмпирическое распределение соответствует распределению GEV.

В табл. 2–4 представлены значения параметров распределения GEV для рассмотренных

моделей. Параметр формы ε для всех рассмотренных значений глубины и силы ветра принимает значения, близкие к -0.2 (среднее значение -0.2 ; СКО равно 0.02). Отрицательные значения параметра формы позволяют сделать вывод, что распределение амплитуд локальных максимумов является распределением GEV III типа, т. е. распределением Вейбулла.

Зависимости параметра местоположения и параметра масштаба от глубины и скорости ветра приведены на рис. 3.

Мерой центральной тенденции для данных, не подчиняющихся нормальному распределению, традиционно является медиана. На рис. 4 показаны зависимости медианы локальных максимумов от скорости ветра и от глубины соответственно.

На основании рис. 3, 4 можно сделать вывод, что параметры местоположения и масштаба, как и медиана распределения локальных максимумов, практически не зависят от глубины, но проявляют явно выраженную зависимость от скорости ветра.

Исследование распределений локальных максимумов при наличии зыби на фоне установившегося ветрового волнения. На этом этапе исследований были получены статистические характеристики локальных экстремумов моделей морской поверхности при наличии двух волновых процессов: развитого ветрового волнения и зыби.

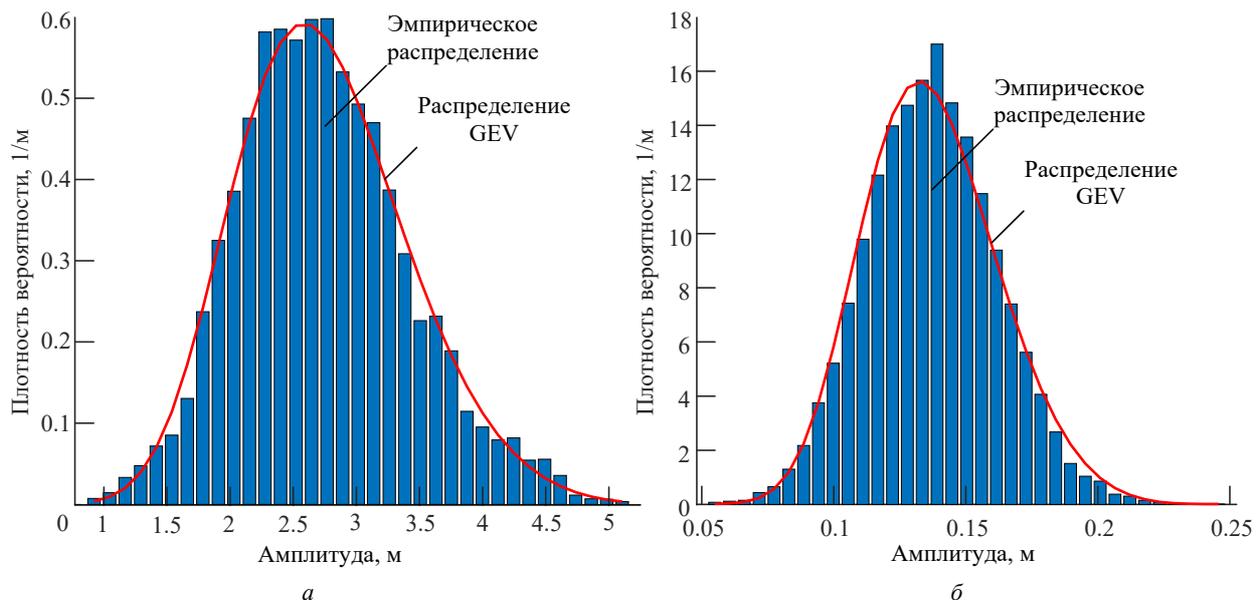


Рис. 1. Гистограммы амплитуд локальных максимумов при глубине 1000 м и скорости ветра: а – 15 м/с; б – 3 м/с

Fig. 1. Histograms of amplitudes of local maxima at wind speeds of 15 m/s (a) and 3 m/s (b) and a depth of 1000 m

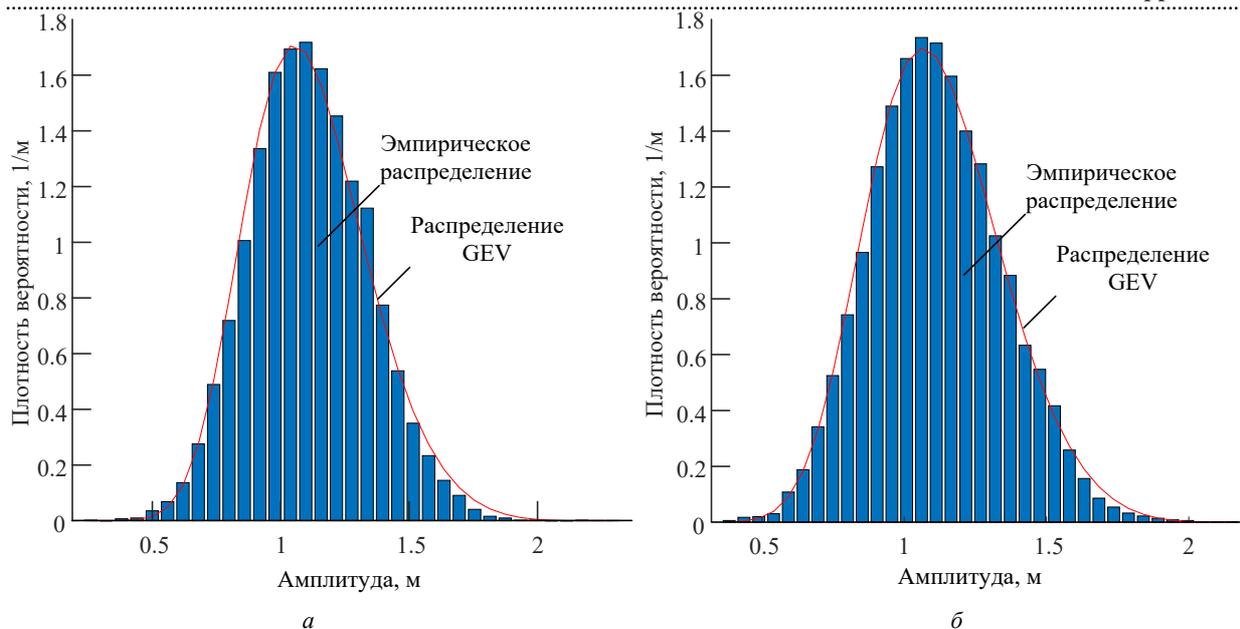


Рис. 2. Гистограммы амплитуд локальных максимумов при скорости ветра 9 м/с и глубине: а – 2 м; б – 50 м
 Fig. 2. Histograms of the amplitudes of local maxima at a wind speed of 9 m/s and a depth of 2 m (a) and 50 m (b)

Табл. 2. Значения параметра формы (ϵ) в зависимости от глубины и скорости ветра
 Tab. 2. Values of the shape parameter (ϵ) depending on the depth and wind speed

Глубина, м	Скорость ветра, м/с				
	3	6	9	12	15
1	-0.21	-0.23	-0.17	-0.20	-0.23
2	-0.19	-0.23	-0.17	-0.19	-0.21
5	-0.17	-0.21	-0.17	-0.24	-0.23
10	-0.20	-0.16	-0.23	-0.21	-0.21
50	-0.21	-0.19	-0.18	-0.21	-0.19
1000	-0.19	-0.16	-0.18	-0.18	-0.17

Табл. 3. Значения параметра местоположения (μ) в зависимости от глубины и скорости ветра
 Tab. 3. Values of the location parameter (μ) depending on the depth and wind speed

Глубина, м	Скорость ветра, м/с				
	3	6	9	12	15
1	0.024	0.094	0.22	0.40	0.67
2	0.025	0.098	0.22	0.39	0.63
5	0.024	0.096	0.23	0.39	0.62
10	0.024	0.101	0.22	0.42	0.64
50	0.023	0.097	0.22	0.40	0.63
1000	0.024	0.095	0.22	0.39	0.63

Табл. 4. Значения параметра масштаба (β) в зависимости от глубины и скорости ветра
 Tab. 4. Values of the scale parameter (β) depending on the depth and wind speed

Глубина, м	Скорость ветра, м/с				
	3	6	9	12	15
1	0.12	0.48	1.02	1.79	2.75
2	0.13	0.46	1.02	1.76	2.73
5	0.13	0.49	1.01	1.74	2.56
10	0.13	0.49	1.02	1.72	2.51
50	0.13	0.49	1.02	1.71	2.51
1000	0.13	0.48	1.03	1.68	2.47

Как было показано ранее, параметры локальных максимумов практически не зависят от глубины, поэтому для упрощения расчетов и повышения информативности результатов при

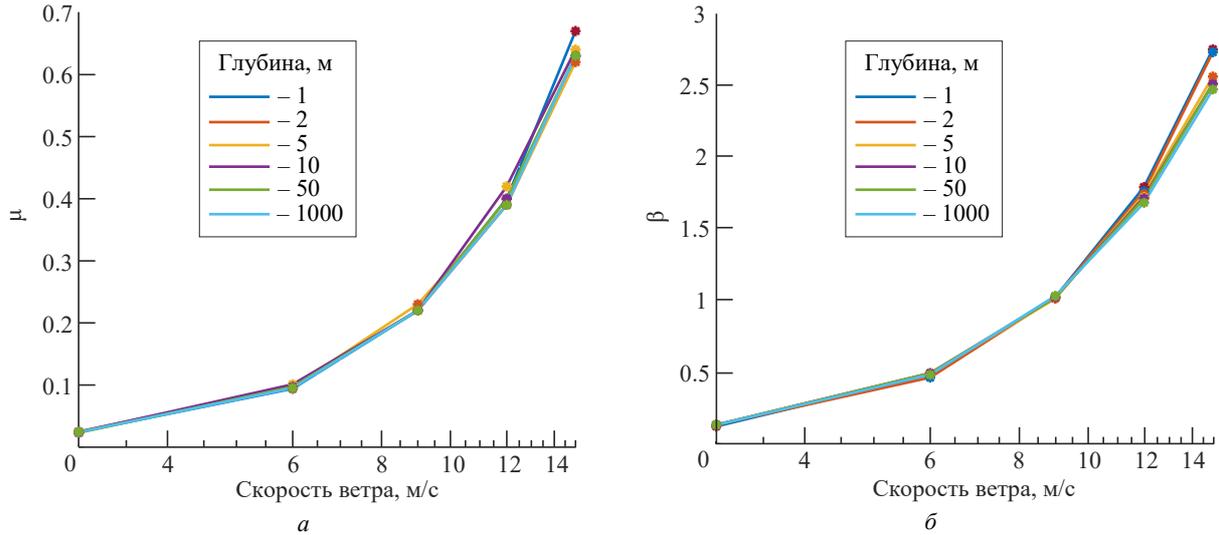


Рис. 3. Зависимость параметров местоположения (а) и масштаба (б) от глубины и скорости ветра
 Fig. 3. Dependence of location (a) and scale parameters (b) on the depth and wind speed

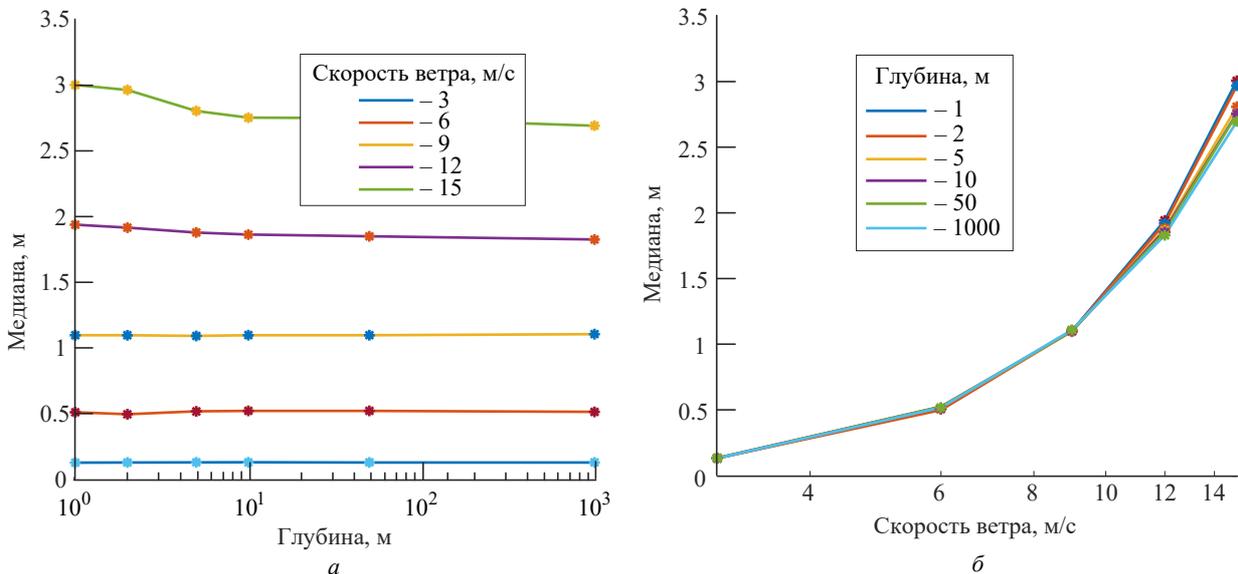


Рис. 4. Зависимость медианы локальных максимумов от скорости (а) и глубины (б) ветра
 Fig. 4. Dependence of the median of local maxima on the speed (a) and wind depth (b)

моделировании было применено дисперсионное соотношение для глубокой воды, что позволило, пренебрегая действием поверхностного натяжения, переписать дисперсионное соотношение (7) в виде

$$\omega = \sqrt{gk}. \quad (10)$$

Моделирование ветровых волн и волн зыби производилось по формуле (9) с учетом соотношения (10). Итоговый волновой профиль определялся в каждой точке согласно соотношению (8).

На рис. 5 приведены гистограммы локальных максимумов, построенные для различных углов между ветровыми волнами и волнами

зыби при полностью установившемся ветровом волнении при следующих значениях параметров модели морской поверхности:

$U_{10w} = 10$ м/с – скорость ветра на высоте 10 м, формирующего ветровое волнение;

$T_{hour0} = 12$ ч – время действия ветра, формирующего ветровое волнение;

$U_{10s} = 15$ м/с – скорость ветра на высоте 10 м, формирующего волны зыби;

$T_{Shour} = 12$ ч – время действия ветра, формирующего волны зыби;

$T_{hour} = 12$ ч – время, прошедшее после окончания действия ветра, формирующего волны зыби.

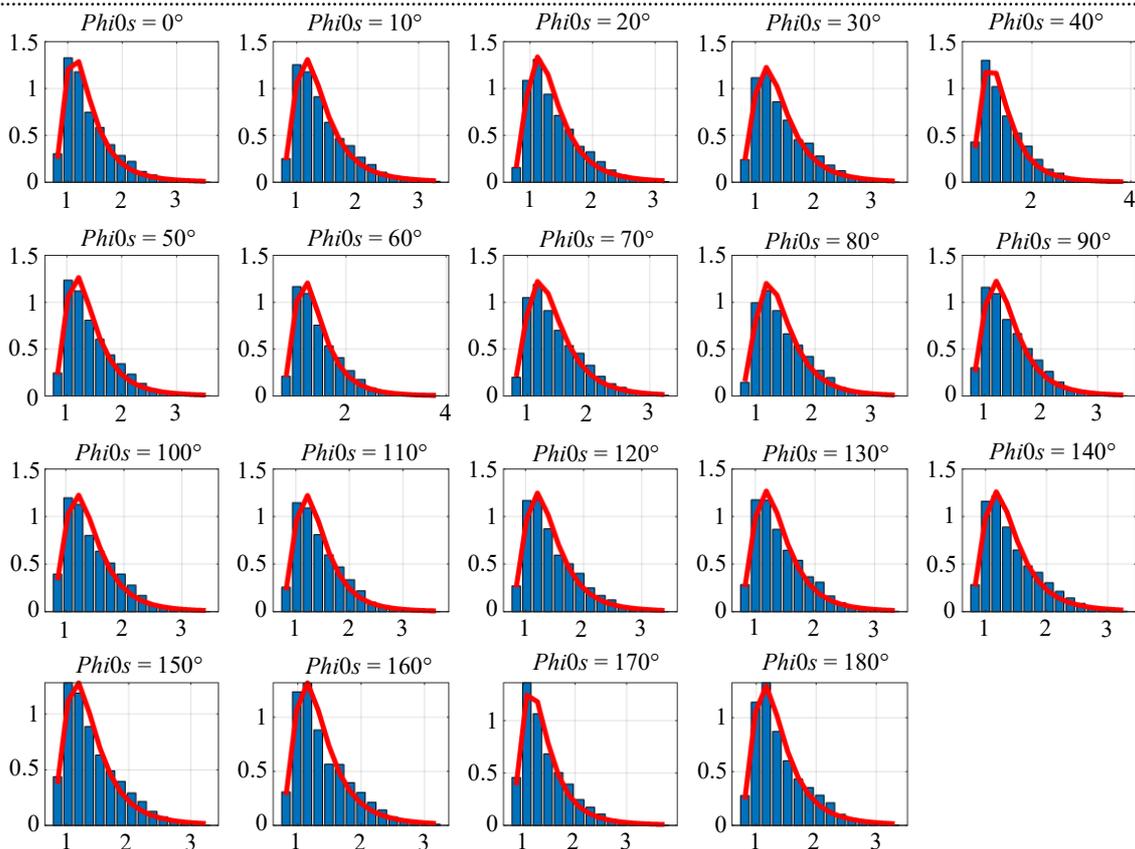


Рис. 5. Гистограммы локальных максимумов при различных значениях угла между ветровыми волнами и волнами зыби

Fig. 5. Histograms of local maxima for different values of the angle between wind waves and swell waves

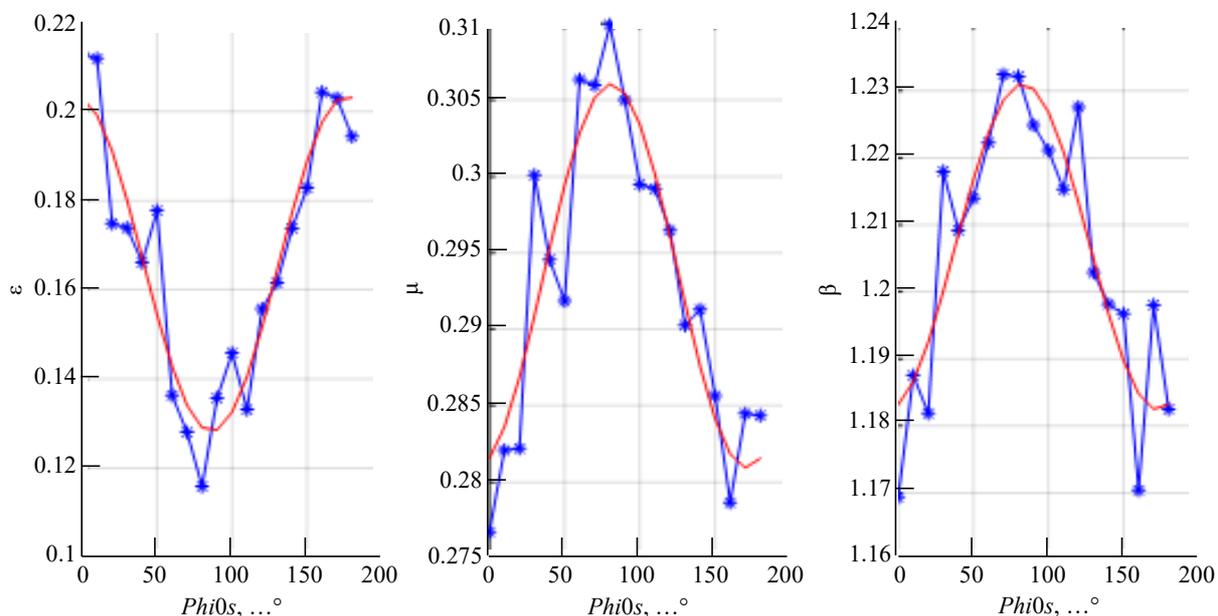


Рис. 6. Зависимость параметров распределения GEV от угла между ветровыми волнами и волнами зыби

Fig. 6. Dependence of GEV distribution parameters on the angle between wind waves and swell waves

На гистограммах на рис. 5 красным цветом наложены графики плотности вероятности, соответствующие распределению GEV.

Зависимости оценок параметров распреде-

ления GEV от величины угла $\phi i0s$ между ветровыми волнами и волнами зыби приведены на рис. 6. На рис. 6 слева направо представлены зависимости, полученные для параметра фор-

мы (Shape, ε в (1)), параметра местоположения (Location, μ в (1)) и параметра масштаба (Scale, β в (1)). На графиках маркерами показаны полученные выборочные оценки, сплошными линиями красного цвета показана гармоническая аппроксимация выявленных зависимостей. Поскольку для всех рассмотренных параметров модели морского волнения коэффициент формы принимает положительные значения, распределение локальных экстремумов при наличии волн зыби на фоне развитого ветрового волнения относится к II типу распределения GEV, т. е. является распределением Фреше.

Параметры местоположения и масштаба проявляют явную зависимость от угла между волнами зыби и ветровыми волнами, принимая наибольшие значения при величине угла, близкой к 90° .

Медианы локальных экстремумов, выявленных на изображениях морской поверхности, также проявляют выраженную зависимость от угла между ветровыми волнами и волнами зыби как при различных значениях времени, прошедшего после формирования зыби (рис. 7), так и при различных значениях времени действия ветра, формирующего зыбь (рис. 8). Сплошными линиями на рис. 7 и 8 показаны гармонические аппроксимации. Наибольшие значения медиан соответствуют величине угла

между ветровыми волнами и волнами зыби, близкой к 90° при всех значениях параметров модели морской поверхности, соответствующих установившемуся волнению.

Очевидно, что свойства медианы локальных экстремумов соответствуют свойствам параметра местоположения распределения GEV.

Заключение. Для модели ветровых волн на основе двумерного спектра Пирсона–Московица подробно исследовано распределение локальных максимумов. Определены параметры обобщенного распределения GEV при значениях глубины от 1 до 1000 м и скорости ветра от 3 до 15 м/с. Построены соответствующие графические зависимости.

Установлено, что распределение локальных максимумов в отсутствие аномальных волн аппроксимируется распределением Вейбулла и, тем самым, относится к типу III обобщенного распределения экстремальных значений. Параметры распределения зависят от скорости ветра. Зависимость от глубины практически отсутствует.

При использовании модели, отражающей наличие волн зыби на фоне развитого ветрового волнения, распределение локальных максимумов аппроксимируется распределением Фреше, параметры которого зависят от угла между ветровым волнением и волнами зыби, причем выявленные зависимости имеют гармо-

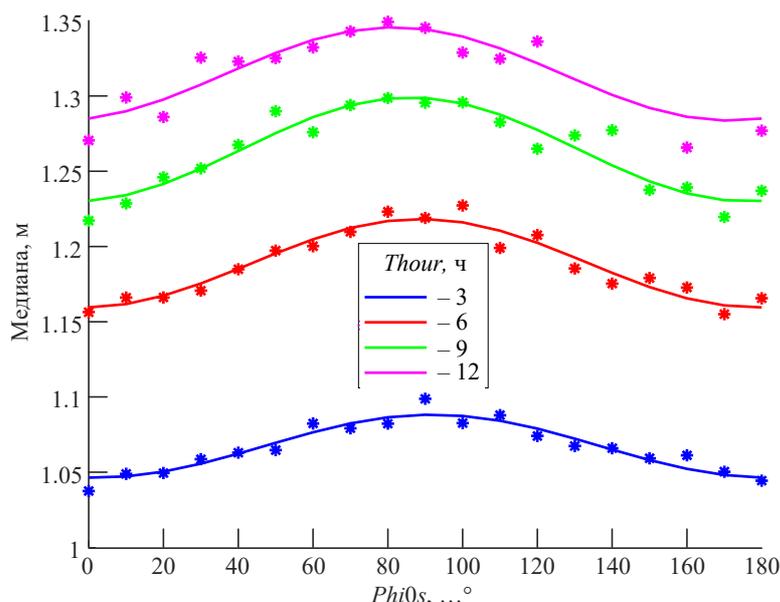


Рис. 7. Медианы локальных максимумов при различных значениях $Thour$ – времени, прошедшего после окончания действия ветра

Fig. 7. Medians of local maxima for different values of the time $Thour$ elapsed after the end of the wind action

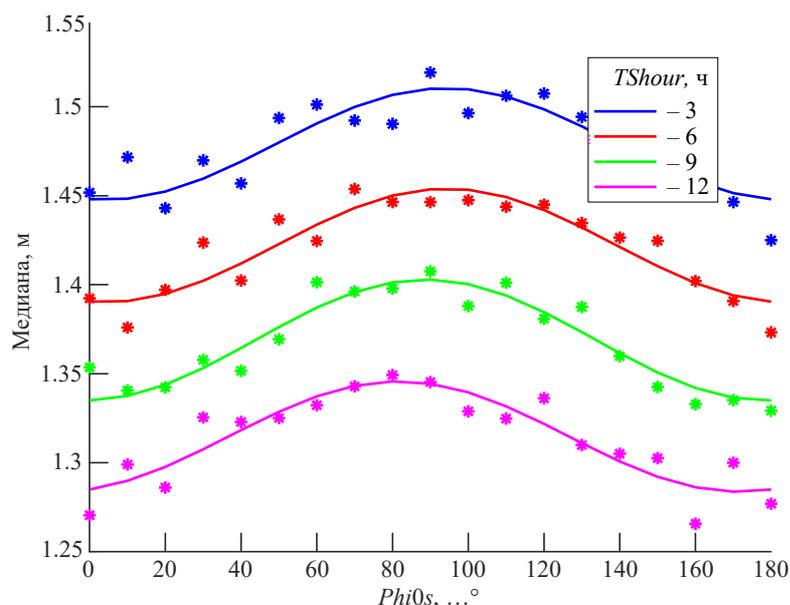


Рис. 8. Медианы локальных максимумов при различных значениях $TShour$ – времени действия ветра, формирующего волны зыби

Fig. 8. Medians of local maxima at different values of the time $TShour$ of action of the wind that forms swell waves

нический характер. Таким образом, добавление волн зыби меняет тип распределения экстремальных значений GEV, а угол между волнами разных типов определяет его параметры. Параметры распределения GEV при этом можно использовать для косвенного оценивания угла между ветровыми волнами и волнами зыби.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования параметров распределения локальных экстремумов для характеристики морского волнения, и в первую очередь – для прогнозирования аномальных ситуаций на море, связанных с влиянием волн зыби. Наиболее нежелательной для безопасного судоходства

ситуацией при этом является приближение угла между ветровыми волнами и волнами зыби к 90° , что приводит к существенному увеличению амплитуд суммарного волнения.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях в рамках прогнозирования аномальных явлений, в том числе появления волн-убийц. Знание параметров и функционального вида законов распределения локальных максимумов при отсутствии и наличии аномальных волн позволит впоследствии разработать алгоритм прогнозирования таких природных явлений, основанный на использовании оценок локальных максимумов, определяемых на изображении морской поверхности.

Авторский вклад

Пыко Никита Сергеевич – выполнение статистического анализа данных; визуализация и статистическая оценка значимости полученных результатов.

Орандаренко Елена Дмитриевна – разработка математической модели морского волнения.

Богачев Михаил Игоревич – разработка концепции исследований и интерпретация результатов.

Author's contribution

Nikita S. Pyko, implementation of the statistical data analysis; visualization and statistical evaluation of the significance of the obtained results.

Elena D. Orandarenko, development of the mathematical model of wave.

Mikhail I. Bogachev, development of the research concept and interpretation of the results.

Список литературы

1. WAFO-a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads / P. A. Brodtkorb, P. Johannesson,

G. Lindgren, I. Rychlik, J. Rydén, Eva Sjö // ISOPE Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. ISOPE,

2000. ISOPE-I-00-264. P. 1–8.

2. Baxevani A., Rychlik I., Wilson R. J. A new method for modelling the space variability of significant wave height // *Extremes*. 2005. Vol. 8. P. 267–294.

3. Baxevani A., Caires S., Rychlik I. Spatio-temporal statistical modelling of significant wave height // *Environmetrics: The official j. of the Intern. Environmetrics Society*. 2009. Vol. 20, № 1. P. 14–31. doi: 10.1002/env.908

4. Rychlik I., Rydén J., Anderson C. W. Estimation of Return Values for Significant Wave Height from Satellite Data // *Extremes*. 2011. Vol. 14. P. 167–186. doi: 10.1007/s10687-010-0117-3

5. Hildeman A., Bolin D., Rychlik I. Deformed SPDE models with an application to spatial modeling of significant wave height // *Spatial Statistics*. 2021. Vol. 42. P. 100449. doi: 10.1016/j.spasta.2020.100449

6. Stuart C. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Luxembourg: Springer Series in Statistics, 2013. 152 p. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0

7. Coles S. An introduction to statistical modeling of extreme values. London: Springer, 2001. Vol. 208. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0

8. Reiss R. D., Thomas M. Statistical analysis of extreme values. Basel: Birkhäuser, 1997. Vol. 2. 316 p. doi: 10.1007/978-3-0348-6336-0

9. Extreme value statistics in records with long-term persistence / J. F. Eichner, J. W. Kantelhardt, A. Bunde, Sh. Havlin // *Physical Review E*. 2006. Vol. 73, № 1. P. 016130. doi: 10.1103/PhysRevE.73.016130

10. Флуктуационный анализ моделей морской поверхности / В. Н. Михайлов, Н. С. Пыко, М. И. Богачев, В. М. Кутузов // *Вестн. НовГУ*. 2023. Т. 1, № 130. С. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145

11. Абузяров З. К. Морское волнение и его прогнозирование. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 166 с.

12. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.

13. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / под ред. Г. В. Шелкова; Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2005. 214 с.

14. Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves / D. Hauser, K. Kahma, H. E. Krogstad, S. Lehner, J. A. J. Monbaliu. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005. XV. 465 p.

15. Iida T. Decomposition and prediction of initial uniform bi-directional water waves using an array of wave-rider buoys // *Renewable Energy*. 2023. Vol. 217. P. 119137. doi: 10.1016/j.renene.2023.119137

16. Gengkun W., Chuanxi L., Yongquan L. Computational simulation and modeling of freak waves based on Longuet-Higgins model and its electromagnetic scattering calculation // *Hindawi Complexity*. 2020. Vol. 2020. Article ID 2727681. doi: 10.1155/2020/2727681

Информация об авторах

Пыко Никита Сергеевич – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (СПбГЭТУ, 2019), ассистент кафедры радиотехнических систем, младший научный сотрудник научно-образовательного центра "Цифровые телекоммуникационные системы" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 37 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: goststalker13@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6668-9512>

Орандаренко Елена Дмитриевна – специалист по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (СПбГЭТУ, 2018), ассистент кафедры радиотехнических систем, младший научный сотрудник лаборатории "Фундаментальные основы построения интеллектуальных систем" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: orandarienkoo@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-6569-2099>

Богачев Михаил Игоревич – доктор технических наук (2018), доцент (2011) кафедры радиотехнических систем, главный научный сотрудник научно-образовательного центра "Цифровые телекоммуникационные технологии" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 200 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: rogex@yandex.com
<http://orcid.org/0000-0002-0356-5651>

References

1. Brodtkorb A., Johannesson P., Lindgren G., Rychlik I., Rydén J., Sjö Eva. WAFO-a MATLAB Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads. ISOPE Intern. Ocean and Polar Engineering Conf. ISOPE, 2000, ISOPE-I-00-264, pp. 1–8.
2. Baxevani A., Rychlik I., Wilson R. J. A New Method for Modelling the Space Variability of Significant Wave Height. *Extremes*. 2005, vol. 8, pp. 267–294.
3. Baxevani A., Caires S., Rychlik I. Spatio-temporal Statistical Modelling of Significant Wave Height. *Environmetrics: The Official J. of the Intern. Environmetrics Society*. 2009, vol. 20, no. 1, pp. 14–31. doi: 10.1002/env.908
4. Rychlik I., Rydén J., Anderson C. W. Estimation of Return Values for Significant Wave Height from Satellite Data. *Extremes*. 2011, vol. 14, pp. 167–186. doi: 10.1007/s10687-010-0117-3
5. Hildeman A., Bolin D., Rychlik I. Deformed SPDE Models with an Application to Spatial Modeling of Significant Wave Height. *Spatial Statistics*. 2021, vol. 42, p. 100449. doi: 10.1016/j.spasta.2020.100449
6. Stuart C. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Luxembourg: Springer Series in Statistics, 2013, 152 p. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0
7. Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London, Springer, 2001, vol. 208. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0
8. Reiss R. D., Thomas M. Statistical Analysis of Extreme Values. Basel, Birkhäuser, 1997, vol. 2, 316 p. doi: 10.1007/978-3-0348-6336-0
9. Eichner J. F., Kantelhardt J. W., Bunde A., Havlin Sh. Extreme Value Statistics in Records with Long-Term Persistence. *Physical Review E*. 2006, vol. 73, no. 1, p. 016130. doi: 10.1103/PhysRevE.73.016130
10. Mikhailov V. N., Pyko N. S., Bogachev M. I., Kutuzov V. M. Fluctuation Analysis of Sea Surface Models. *Vestnik NovSU*. 2023, vol. 1, no. 130, pp. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145 (In Russ.)
11. Abuzyarov Z. K. Sea Waves and Forecasting. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1981, 166 p. (In Russ.)
12. Davidan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A. Wind Waves in the Oceans. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1985, 256 p. (In Russ.)
13. Reference Data on the Wind and Waves in Barentz, Okhotsk and Caspian Seas. Ed. by G. V. Shelkov. Russian Marine Registry Publishing. St Petersburg, 2005, 214 p. (In Russ.)
14. Hauser D., Kahma K., Krogstad H. E., Lehner S., Monbaliu J. A. J. Measuring and Analysing the Directional Spectra of Ocean Waves. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2005, XV, 465 p.
15. Iida T. Decomposition and Prediction of Initial Uniform Bi-Directional Water Waves Using an Array of Wave-Rider Buoys. *Renewable Energy*. 2023, vol. 217, p. 119137. doi: 10.1016/j.renene.2023.119137
16. Gengkun W., Chuanxi L., Yongquan L. Computational Simulation and Modeling of Freak Waves Based on Longuet-Higgins Model and Its Electromagnetic Scattering Calculation. *Hindawi Complexity*. 2020, vol. 2020, article ID 2727681. doi: 10.1155/2020/2727681

Information about the authors

Nikita S. Pyko – Master in information and communication technology (2019), assistant of the Department of Radio Engineering Systems, Junior Researcher at the Scientific and Educational Center "Digital Telecommunication Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 37 scientific publications. Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: goststalker13@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-6668-9512>

Elena D. Orandarenko – specialist in radio-electronic systems and complexes (2018), assistant of the Department of Radio Engineering Systems, Junior Researcher at the Laboratory of Fundamental Foundations for Building Intelligent Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: orandarienkoo@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0009-6569-2099>

Mikhail I. Bogachev – Dr Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor (2011) of the Department of Radio Engineering Systems, Chief Researcher of the Scientific and Educational Center "Digital Telecommunication Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: rogex@yandex.com
<http://orcid.org/0000-0002-0356-5651>