

УДК 551.466.3

© А. В. Слюняев^{1-3*}, А. В. Кокорина¹, А. И. Зайцев^{1,4}, Е. Г. Диденкулова¹⁻³, А. А. Москвитин^{1,4}, О. И. Диденкулов¹, Е. Н. Пелиновский¹⁻³, 2023

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12.

³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Приморский край, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

⁴Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. А.М. Горького, д. 25.

*slunyaev@ipfran.ru

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЫСОТ ВОЛН ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ У ОСТРОВА САХАЛИН

Статья поступила в редакцию 09.03.2023, после доработки 05.06.2023, принята в печать 24.07.2023

Аннотация

Данные длительных измерений поверхностного волнения донными датчиками у о-ва Сахалин использованы для построения инструментальных распределений вероятностей превышения высот волн. Зарегистрированы волны с высотой, превышающей значительную высоту более чем в 3 раза. Обсуждаются особенности результатов наблюдений, выполненных в периоды покрытия морской поверхности льдом и открытой воды. Для создания выборок статистически однородных данных выполнена селекция с учетом естественных физических безразмерных параметров задачи, контролирующих эффекты конечной глубины и нелинейности (крутизна, отношение амплитуд волн к глубине, параметр Урселла). Обсуждается проявление этих и производных от них параметров в теоретических распределениях вероятностей высот волн. Оценены эффекты нелинейности и глубины точки измерения на вероятностные распределения с фокусом на аномально высокие волны. В частности показано, что для места регистрации рост отношения амплитуд волн к глубине приводит к уменьшению вероятности аномально высоких волн. Это поведение согласуется с теоретическим распределением Глуховского. Волны, характеризуемые сравнительно большим параметром безразмерной глубины, демонстрируют более высокую вероятность волн с существенным превышением значительной высоты и лучше описываются распределением Рэлея.

Ключевые слова: поверхностные морские волны, распределение вероятностей высот волн, аномально высокие волны, нелинейные волны, параметр Урселла, эффект конечной глубины

© А. В. Слюняев^{1-3*}, А. В. Кокорина¹, А. И. Зайцев^{1,4}, Е. Г. Диденкулова¹⁻³, А. А. Москвитин^{1,4}, О. И. Диденкулов¹, Е. Н. Пелиновский¹⁻³, 2023

¹Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 603950, Nizhny Novgorod, Box-120, Ulyanova Street, 46, Russia

²National Research University — Higher School of Economics, 603155 Nizhny Novgorod, Str. Bolshaya Pecherskaya, 25/12, Russia

³V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch RAS, 690041, Vladivostok, Baltijskaya Street, 43, Russia

⁴Special Design Bureau for Marine Research Automation of RAS Far Eastern Branch, 693023, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation, Str. A.M. Gor'kogo, 25, Russia

*slunyaev@ipfran.ru

Ссылка для цитирования: Слюняев А.В., Кокорина А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., Москвитин А.А., Диденкулов О.И., Пелиновский Е.Н. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 3. С. 18–29. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-2

For citation: Slunyaev A.V., Kokorina A.V., Zaytsev A.I., Didenkulova E.G., Moskvitin A.A., Didenkulov O.I., Pelinovsky E.N. The Dependence of Wave Height Probability Distributions on Physical Parameters from Measurements near Sakhalin Island. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 3, 18–29. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-2

THE DEPENDENCE OF WAVE HEIGHT PROBABILITY DISTRIBUTIONS ON PHYSICAL PARAMETERS FROM MEASUREMENTS NEAR SAKHALIN ISLAND

Received 09.03.2023, Revised 05.06.2023, Accepted 24.07.2023

Abstract

The data of long-term surface waves measurements with bottom sensors near Sakhalin Island were used to build instrumental probability distributions for exceedance of wave heights. Waves with heights exceeding the significant wave height by more than three times were recorded. Specific features of the observations conducted during the periods of open and ice-covered sea surfaces are discussed. The subsets of statistically homogeneous data are arranged through selection considering the natural physical dimensionless parameters of the task, that control the effects of finite depth and nonlinearity (namely, the wave steepness, the wave amplitude to water depth ratio, the Ursell parameter). The manifestation of these and composite parameters in theoretical probability distributions of wave heights is discussed. The effects of nonlinearity and the measurement point depth on probability distributions are estimated with a focus on abnormally high waves. In particular, it is shown that for the place of registration an increase in the wave amplitude to water depth ratio parameter leads to a decrease in the probability of abnormally high waves. This behavior is consistent with the Glukhovsky theoretical distribution. The waves characterized by relatively large dimensionless depth parameter exhibit a higher probability of substantial exceedance of the significant height and are better described by the Rayleigh distribution.

Keywords: sea surface waves, wave height probability distribution, rogue waves, nonlinear waves, Ursell parameter, finite depth effect

1. Введение

Измерения поверхностных волн датчиками донного давления проводятся на базе Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских измерений Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН) у о-ва Сахалин в прибрежной зоне Охотского моря с 2009 г. Эти данные используются для оценки вероятностных свойств волн с фокусом на редкие события экстремальных волн (т. н. аномальные волны или «волны-убийцы»). Измерения проводились серией кампаний с установкой одного или нескольких датчиков на срок несколько месяцев, включая зимние периоды покрытия поверхности льдом. Высота волны H (вертикальное расстояние от нижней точки ложбины до верхней точки гребня) является наиболее часто используемой характеристикой морских волн. В банке накопленных данных измерений у о-ва Сахалин уже содержится несколько тысяч регистраций аномально высоких волн, удовлетворяющих формальному критерию превышения значительной высоты волнения H_s в 2 раза и более, $AI = H/H_s > 2$. Эти результаты можно найти в публикациях [1–4]. В предположениях линейности волн и узости спектра вероятность превышения высоты задается распределением Рэля [5]:

$$P_R(H) = \exp \left[-2 \left(\frac{H}{H_s} \right)^2 \right], \quad (1)$$

представляющим собой зависимость от нормированной высоты H/H_s . На практике значительная высота определяется через среднеквадратичное смещение поверхности σ , $H_s = 4\sigma$, или как среднее от трети наиболее высоких волн в выборке, $H_s = H_{1/3}$. Распределение (1) обычно используется в качестве первого приближения для описания морских волн. В частности, оно позволяет оценить вероятность возникновения аномально высоких волн: $P_R(H = 2H_s) = 3,35 \cdot 10^{-4}$. По уже сделанным оценкам действительная вероятность возникновения «волн-убийц» примерно соответствует этому значению: в среднем 2–3 аномальные волны в сутки [2]. Более точная оценка вероятности редких экстремальных событий $H > 2H_s$, поиск условий, способствующих повышению вероятности таких событий, являются актуальными проблемами современной океанографии.

Разбиение длинных записей волн на короткие интервалы по 10–30 мин является стандартным способом повышения статистической однородности данных. Предполагается, что такие интервалы, с одной стороны, соответствуют периодам примерной стационарности условий, характеризующихся постоянным значением H_s , а с другой — достаточны для обеспечения не слишком больших погрешностей вероятностных оценок, связанных с конечностью выборки. В таких интервалах записей содержится от нескольких десятков до пары сотен индивидуальных волн. В предположении универсальности распределений вероятностей волн по параметру превышения значительной высоты волн H/H_s данные для разных коротких интервалов записей могут объединяться для построения вероятностных распределений морского волнения. Соответственно, результатом такой обработки станет единственное распределение $P(H/H_s)$.

При учете конечной ширины спектра, нелинейности волн и т. д. в теоретических распределения вероятности возникают поправки, нарушающие универсальность распределения Рэля. Недоучет этого обстоятельства ведет к построению обобщенной функции распределения вероятностей на основе разнородных данных, что должно приводить к ошибочным оценкам. В частности, такой подход может маскировать редкие, возникающие при определенных условиях аномальные функции распределения в массиве однотипных функций распределения, соответствующих значительно более частым условиям. В литературе можно найти как свидетельства разнородности распределений вероятностей на основе разных банков натуральных данных, так и прямое обсуждение зависимости распределений от локаций, времен года и т. п. [6–9]. Очевидно, что для повышения адекватности строимых на основе натуральных данных вероятностных распределений (особенно в области редких событий), определения их зависимости от конкретных характеристик волнения следует использовать дополнительную сортировку данных по статистически однородным условиям.

Распределение вероятностей превышения высоты, построенное в [4] по данным измерений волн у Сахалина в 2012–2015 гг., воспроизведено на рис. 1, а. В [4] было установлено, что за экстремальные значения высот на рис. 1, а ответственны события аномально высоких волн, наблюдавшиеся в ледовый период. Последний легко выделялся по характерному виду записей с почти нулевым фоновым волнением. К нему относились не только периоды, когда акватория была покрыта сплошным льдом, но и зимнее время между таковыми. После разделения массива данных на условия открытой воды и ледовые в первом случае данные исключительно хорошо описываются распределением Глуховского (рис. 1, б), в то время как второй класс условий демонстрирует значительные отклонения от этого распределения (рис. 1, в) и содержит «волны-убийцы» с наибольшими превышениями значительной высоты. Таким образом, общее распределение вероятностей на рис. 1, а содержит как минимум два класса событий, характеризующихся существенно различными вероятностными свойствами, о чем нельзя сделать вывод лишь на основании рис. 1, а.

Для океанографии стандартными являются диаграммы T_z-H_s , отражающие вероятность волновых условий с данной значительной высотой H_s и данным периодом T_z , определенным для волновой последовательности по пересечениям нулевого (невозмущенного) уровня. Такая диаграмма для части данных измерений у Сахалина нами приведена в работе [4]. Ее вариант, дополненный новыми данными, показан на рис. 2. Все зарегистрированные значительные высоты не превышают половины глубины точки измерения.

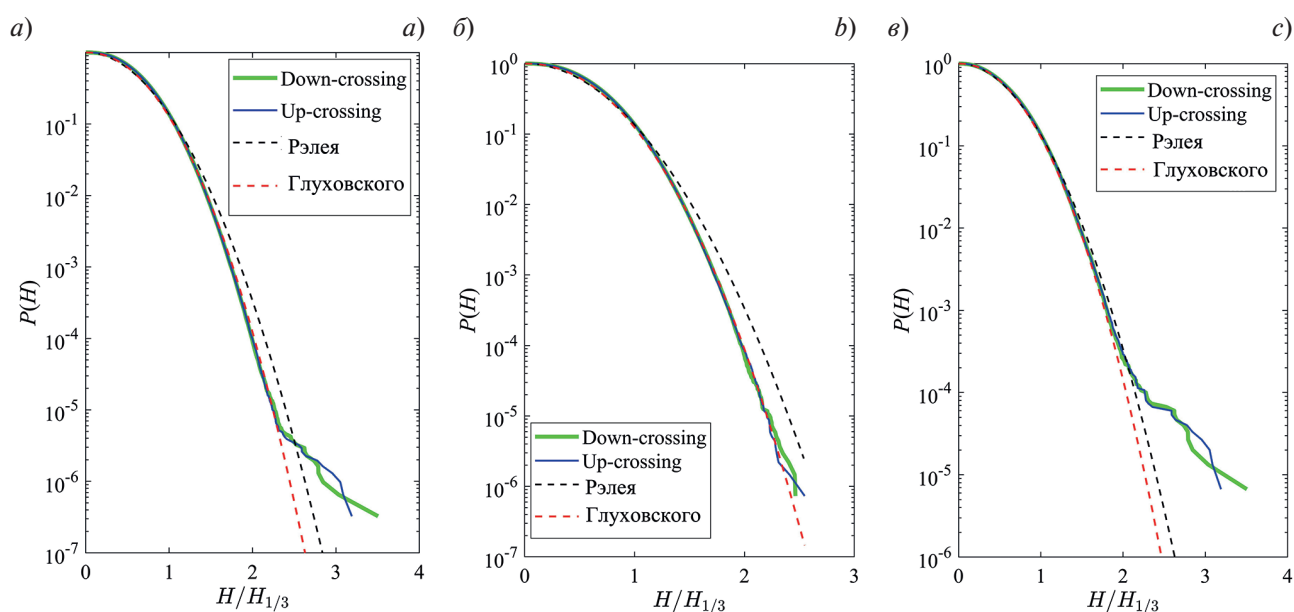


Рис. 1. Распределение вероятностей превышения высот волн по натурным данным за сезоны 2012–2014 гг.: все данные (а), данные только периодов безо льда (б) и ледовый период сезона 2014–2015 гг. (в). Разными цветами построены распределения по пересечению нулевого уровня вниз (Down-crossing) и вверх (Up-crossing). Другие линии соответствуют распределениям Рэля и Глуховского, см. в [4]

Fig. 1. Distribution of wave height exceedance probabilities according to the field data for 2012–2014 seasons: all data (a), ice-free period data only (b), and 2014–2015 season ice period data (c). The distributions for down-crossing and up-crossing wave heights are shown in different colors. Other lines correspond to the Rayleigh and Glukhovskiy distributions, see [4]

с ростом kh возрастает инкремент неустойчивости и область неустойчивых волновых чисел. Поскольку было показано теоретически и экспериментально (например, [11]), что условия модуляционно устойчивых и неустойчивых волновых систем характеризуются разными распределениями вероятностей редких событий, то учет параметра kh при построении статистических ансамблей представляется важным. Этот параметр может быть использован и в качестве характеристики длины (периода) волн на конечной глубине, потому вместо периода T_z для описания волновых условий будем использовать величину kh , которую можно понимать как безразмерную характеристику длины волны.

Безразмерный параметр нелинейности волн на мелкой воде вводят в виде отношения амплитуды волны к глубине, что для значительной амплитуды волн $H_s/2$ можно записать в виде $a = H_s/h/2$ [12]. В пределе глубокой воды естественный размер задачи h становится неприменимым; хорошо известно, что на глубокой воде безразмерной характеристикой интенсивности волн является крутизна, которую можно записать в виде $\varepsilon = kH_s/4 = k\sigma$. Тогда мелководный параметр нелинейности можно представить в виде отношения крутизны и безразмерной глубины: $a = (kH_s)/(kh)/2 = 2\varepsilon/(kh)$. В частности, условия обрушения волн на мелководье и на большой глубине формулируются в терминах пороговых величин параметров, которые можно записать в форме $A/h \approx 0,25$ и $kA \approx 0,4$ соответственно, где A — амплитуда волны.

В [13] обсуждался параметр нелинейности μ для произвольной глубины в форме

$$\mu = k \frac{H_s}{2} F(kh), \quad F = \frac{(4 \tanh kh + \tanh 2kh)(1 - \tanh^2 kh)}{2 \tanh kh(2 \tanh kh - \tanh 2kh)} + \tanh kh. \quad (3)$$

Как видно, он также зависит от глубины через комбинацию kh . В пределе глубокой воды этот параметр становится удвоенной крутизной $\mu \rightarrow 2\varepsilon$, а в пределе мелкой воды пропорционален параметру Урселла, $\mu \rightarrow 2Ur$, $Ur = 3/8 kH_s (kh)^{-3}$, который, в свою очередь, составлен из крутизны и безразмерной глубины. Параметр Урселла контролирует баланс между эффектами нелинейности и дисперсии, действующими на волну [5]. Так что при малых значениях Ur волны на малой глубине синусоидальны, а при Ur порядка единицы волны становятся кноидальными и имеют вид уединенных горбов (солитонов). В [14] на основе прямого численного моделирования слабонелинейного уравнения Кортевега—де Вриза делался вывод о возможности возрастания вероятности возникновения аномально высоких волн в случае больших величин параметра Ur , когда доля солитоноподобных волн была высока.

Таким образом, мера нелинейности волн может отражаться одним из перечисленных выше параметров, которые связаны между собой через параметр глубины kh . Для последующего исследования в настоящей работе будут использованы три из них в следующих определениях:

$$\varepsilon = k\sigma, \quad a = 2\frac{\sigma}{h}, \quad Ur = \frac{3}{2} \frac{k\sigma}{(kh)^3}. \quad (4)$$

В нашей работе [4] было показано, что большинство данных по результатам измерений у о-ва Сахалин в 2012–2015 гг. очень хорошо описывается распределением Глуховского, см. рис. 1, б. Теоретическое распределение Глуховского [5]

$$P_G(H) = \exp \left[-\frac{\pi}{4 \left(1 + \frac{n}{\sqrt{2\pi}} \right)} \left(\frac{H}{\bar{H}} \right)^{\frac{2}{1-n}} \right], \quad n = \frac{\bar{H}}{h} \quad (5)$$

использует параметр нелинейности $n = \frac{\bar{H}}{h}$, введенный как отношение средней высоты волн $\bar{H} = \langle H \rangle$ к глубине. Очевидно, что параметр распределения n стремится к нулю в пределе большой глубины (при конечном H_s и растущем h) или в пределе волн малой амплитуды $a \ll 1$, тогда распределение Глуховского (5) переходит в распределение Рэля (1) со связью $\bar{H} = \sqrt{2\pi} H_s / 4$. В прибойной зоне n приближается к значению 0,5, а отношение \bar{H} к H_s увеличивается примерно на 20% [5]. В общем случае можно приблизительно

переписать нормированную высоту с использованием значительной высоты H_s : $\frac{H}{\bar{H}} \approx \frac{4}{\sqrt{2\pi}} \frac{H}{H_s}$. Тогда получается связь параметра n с параметром нелинейности для волн на мелкой воде $n \approx \frac{\sqrt{2\pi}}{4} \frac{H_s}{h} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} a$. Таким образом, для не слишком больших a распределение Глуховского (5) можно записать в виде функции

от величины H/H_s , зависящей также от параметра нелинейности мелководных волн a : $P_G(H) = P_G(H/H_s; a)$. Распределение Глуховского учитывает эффект глубины, связанный с действием нелинейности, оцениваемой параметром a . В рамках этого распределения в интервалах малых высот, $H < 3H_s/4$, и больших высот, $H > 3H_s/4$, вероятность оказывается выше и ниже распределения Рэлея, соответственно (см. в [15]).

Другой пример модификации распределения Рэлея для высот волн обсуждался в [16]:

$$P_{G-Ch}(H) \approx \exp\left(-\frac{H^2}{8\sigma^2}\right) \left[1 + (\lambda_4 - 3)B\left(\frac{H}{\sigma}\right)\right], \quad \lambda_4 = \frac{\langle \eta^4 \rangle}{\sigma^4}, \quad B(\xi) = \frac{1}{384} \xi^2 (\xi^2 - 16) \quad (6)$$

(ряд Грама–Шарлье, для слабо негауссового распределения, см. в [5]). Здесь λ_4 соответствует четвертому статистическому моменту (эксцессу) для смещения поверхности η . Из анализа зависимости (6) следует, что рост четвертого момента $\lambda_4 > 3$ приводит к увеличению вероятности волн с большой высотой $H > 4\sigma$ в сравнении с распределением Рэлея. Оценка четвертого момента для условий глубокой воды была дана в той же работе [16]:

$$\lambda_4 = 3 + 24\varepsilon^2 + \frac{\pi}{\sqrt{3}} BFI^2, \quad BFI = \sqrt{2} \frac{\varepsilon}{\Delta k/k} \quad (7)$$

с использованием параметра относительной ширины спектра волновых чисел $\Delta k/k$. В [17] было показано, что соотношение (7) может существенно нарушаться в случае нестационарности волнения. Другие предлагавшиеся оценки параметра эксцесса обсуждались в нашем недавнем обзоре [9]. Последним слагаемым в формуле для λ_4 можно пренебрегать в случае широкого спектра $\Delta k/k \gg \varepsilon$, и тогда отклонение λ_4 от 3 определяется малым параметром — квадратом крутизны волн. В специфических случаях относительно узкого спектра параметр модуляционной неустойчивости BFI может быть немалым, что приводит к существенно-му повышению вероятности высоких волн.

Таким образом, подобно распределению Глуховского, распределение (6) может быть записано в виде зависимости от нормированной высоты и параметра нелинейности для глубокой воды: $P_{G-Ch}(H) = P_{G-Ch}(H/H_s; \varepsilon)$. Если учет нелинейности в распределении для мелкой воды (5) приводит к понижению вероятности высоких волн в сравнении с распределением Рэлея, то для распределения (6) эффект нелинейности обратный.

3. Вариативность распределений высот волн по натурным данным в зависимости от ключевых физических параметров

Исходные данные измерений донными датчиками представлены в виде последовательностей записей давления с частотами регистрации 1 Гц и 8 Гц. Задача реконструкции взволнованной поверхности по измерениям вариаций давления на дне неоднозначна (в частности, традиционно волны предполагаются однонаправленными) и нетривиальна. Наиболее часто для этого используют гидростатическую теорию для мелкой воды или линейную теорию для диспергирующих волн. Нелинейность дополнительно усложняет задачу. В настоящей работе смещение поверхности воды $\eta(t)$ определялось из гидростатического соотношения $p(t) = p_{am} + \rho g(h_0 + \eta(t))$, где $p(t)$ — измеренное давление, p_{am} — атмосферное давление, h_0 — глубина установки датчика, ρ — плотность воды. Гидростатическое приближение неточно при нарушении условий мелкой воды $kh < 1$, потому аккуратнее будет сказать, что описываемая здесь обработка выполнена для возбуждаемых поверхностными волнами вариаций донного давления в нормированной форме. Из-за наличия приливов среднее смещение для разных 20-минутных записей отличается, что было учтено в виде корректировки локальной глубины: $h = (\bar{p} - p_{am}) / (\rho g)$, где усреднение давления соответствует данному 20-минутному интервалу записи. Атмосферное давление предполагалось постоянным, соответствующим значению на момент установки донной станции. Соответствующая вариация глубины составила до 10%.

Для расчета характеристик волн (среднеквадратичного смещения σ , высот H , периодов T) из записей $\eta(t)$ посредством спектральной фильтрации были вычтены осцилляции с периодами более 10 мин. Каждая 20-минутная последовательность характеризовалась собственными величинами значительной высоты $H_{1/3}$, среднеквадратичного смещения поверхности σ , среднего периода волн T_z . Предполагая выполнение дисперсионного соотношения (2), для каждого интервала определялось волновое число k , соответствующее частоте $\omega = 2\pi/T_z$ и эффективной глубине h .

В настоящей работе использованы данные измерений за 2012–2015, 2020 и 2022 годы на глубине 10–13 м. Записи с очень слабым волнением, $\sigma < 5$ см, не использовались в обработке, что привело к существенному уменьшению размера статистического ансамбля. Всего в анализе использовано ~27 тыс. 20-минутных записей, что соответствует временному ряду продолжительностью примерно в 1 год.

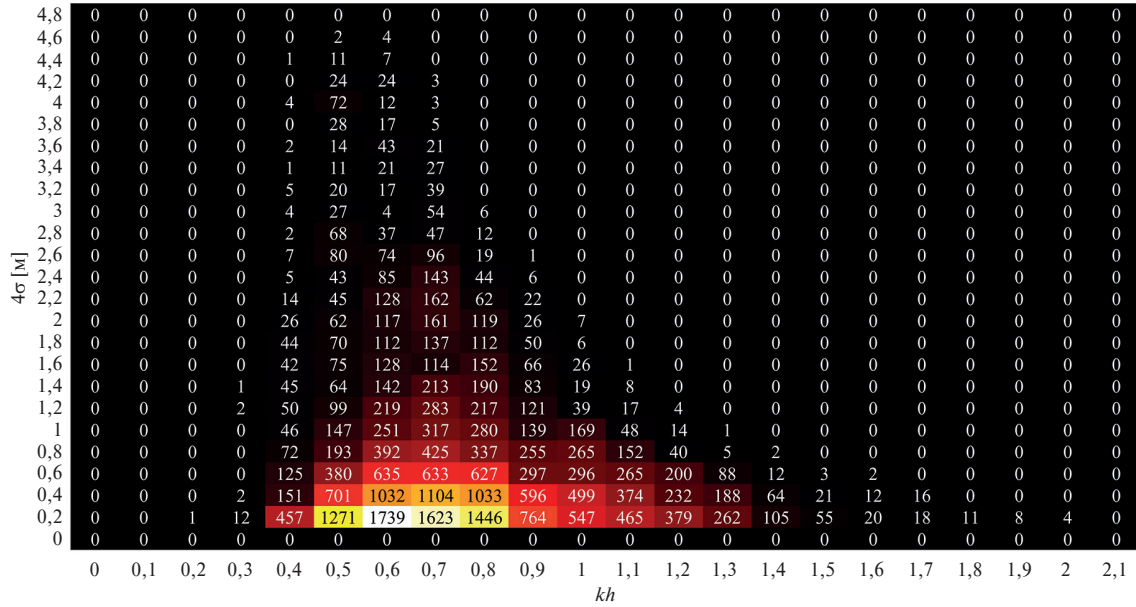


Рис. 3. Диаграмма распределения количества 20-минутных записей по значительным высотам H_s и безразмерным глубинам kh

Fig. 3. Distribution diagram of 20-minute records number over significant heights H_s and dimensionless depths kh

На рис. 3 построена диаграмма, аналогичная приведенной на рис. 2, но по горизонтальной координате отложены величины безразмерной глубины kh . Как следует из рисунка, вариации периодов волн и локальной глубины приводят к большому разбросу значений безразмерной глубины для разных 20-минутных записей: от условий очень мелкой воды $kh = 0,3$ до относительно глубокой воды $kh = 2$.

Распределения 20-минутных записей по параметру глубины kh и одному из трех параметров нелинейности (4) построены на рис. 4. Все распределения имеют качественно схожий вид и демонстрируют события

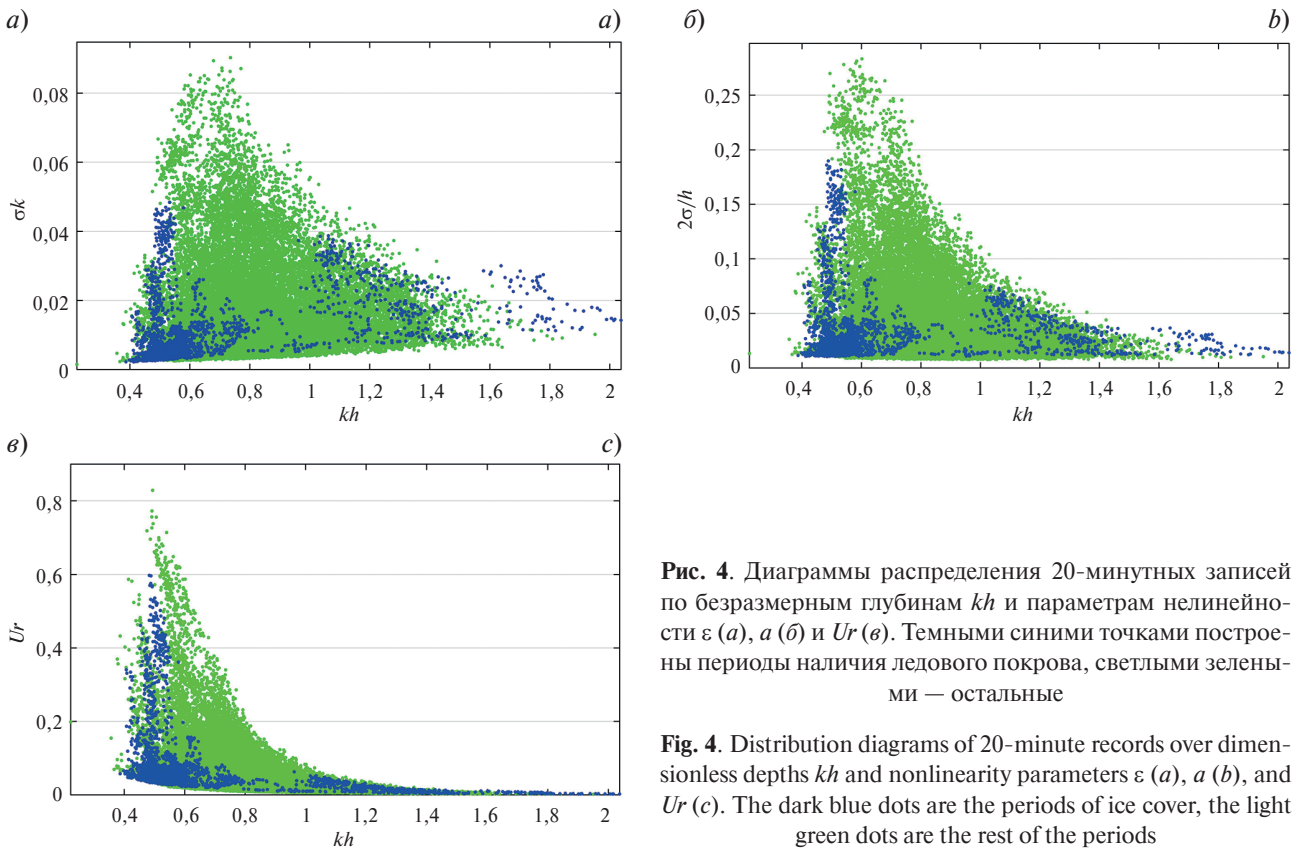


Рис. 4. Диаграммы распределения 20-минутных записей по безразмерным глубинам kh и параметрам нелинейности ε (a), a (b) и Ur (в). Темными синими точками построены периоды наличия ледового покрова, светлыми зелеными — остальные

Fig. 4. Distribution diagrams of 20-minute records over dimensionless depths kh and nonlinearity parameters ε (a), Ur (c). The dark blue dots are the periods of ice cover, the light green dots are the rest of the periods

с большой нелинейностью при выполнении условий довольно мелкой воды, хотя положение максимума нелинейности несколько отличается для рис. 4, *a–в*: $kh \approx 0,7$, $kh \approx 0,6$, и $kh \approx 0,5$ соответственно. Здесь нужно учитывать и то, что этому интервалу безразмерных глубин соответствует большая часть данных.

Из рис. 4, *a* следует вывод о меньших крутизнах волн в ледовых условиях (темные синие точки) в сравнении с волнами на открытой поверхности (светлые зеленые точки), хотя это может быть следствием значительно меньшего количества данных, соответствующих ледовым условиям. На всех панелях на рис. 4 данные в присутствии льда кластеризуются в интервале самых малых kh (длинные волны), при этом нелинейные параметры a и Ur могут быть не малыми. Бросается в глаза значительно меньшее число данных (особенно со значительной нелинейностью), соответствующих ледовым периодам, в интервале средних глубин $kh = 0,6 \dots 1$, что пока не получило физической интерпретации.

Массив данных, отсортированных по безразмерной глубине, а также по одному из трех параметров нелинейности был использован для построения распределений вероятностей превышений высот волн в нескольких интервалах значений соответствующего параметра. Тем самым исследуется зависимость распределения вероятностей от одного из четырех параметров: kh , ε , a и Ur . Эти распределения приведены на рис. 5; там же приведены соответствующие интервалы величин для каждой кривой. Красными штриховыми линиями построены референсные распределения Рэлея.

Распределение количества 20-минутных записей по значениям рассматриваемых параметров очень неоднородно. При разбиении общего массива данных на несколько подгрупп, содержащих примерно одинаковое число волн, различий для парциальных распределений вероятностей почти не наблюдалось. Число волн, соответствующих значительному отклонению безразмерного параметра от среднего, мало и дает очень слабую поправку к распределению вероятности. Потому общий массив данных был разделен на подмножества разного размера, лучше отражающие различные интервалы безразмерных параметров. Значение минимальной вероятности по данным в каждой подгруппе равно $1/N$, где N — общее число волн. Как можно видеть из рис. 5, число волн в рассматриваемых подмножествах может отличаться на порядок, но в каждой из подгрупп не менее 10^5 индивидуальных волн, что для распределения Рэлея соответствовало бы 30 событиям «волн-убийц».

Распределения на рис. 5, *a* отображают зависимость распределения вероятностей от безразмерного параметра kh . Распределения для $kh < 1,4$ располагаются близко. Резкий рост вероятности самых больших (по отношению к $H_{1/3}$) волн для интервала безразмерных глубин $kh \leq 0,7$ связан, вероятно, с ледовыми случаями аномально высоких волн, характеризующимися относительно длинными волнами. Качественно распределение для $kh \leq 0,7$ выглядит похожим на рис. 1, *a*, где «тяжелый хвост» экстремальных волн связан с событиями в ледовый период (см. рис. 1, *б* и *в*). Отметим распределение для наиболее глубоководных записей $kh \geq 1,4$, которое заметно ближе к распределению Рэлея, чем остальные кривые, в том числе в диапазоне не слишком редких событий $P < 0,01$.

Распределения на рис. 5, *б–г* демонстрируют качественно схожий между собой эффект систематического уменьшения вероятности волн с большим превышением значительной высоты при увеличении параметра нелинейности. Для разных интервалов относительно небольшой крутизны волн $\varepsilon < 0,4$ (рис. 5, *б*) такое поведение касается только самого «хвоста» распределения, но для $k\sigma \geq 0,04$ понижается вероятность даже относительно невысоких волн, $H > 1,2 H_{1/3}$. По данным на рис. 5 распределение вероятности изменяется наиболее согласованно и наиболее чувствительно при изменении параметра мелководной нелинейности a (рис. 5, *в*). В этом случае вероятность событий в области $H \approx 2 H_{1/3}$ в зависимости от a изменяется на порядок.

Зависимость распределения от параметра Ur , иллюстрированная на рис. 5, *г*, выражена не так четко, но распределения для $Ur > 0,2$ и $Ur < 0,2$ разделяются вполне четко. Из рассмотренных на рис. 5 результатов можно сделать вывод, что натурные данные демонстрируют наиболее сильную зависимость распределения вероятностей от параметра a при почти отсутствующей зависимости от безразмерного параметра глубины kh (для данного набора данных, обеспечивающего данный интервал значений).

4. Заключение

В настоящей работе проанализированы данные долговременных измерений волн у побережья о-ва Сахалин в акватории Охотского моря донными станциями регистрации вариаций давления. Эти записи составляют часть большего по размеру банка данных измерений с 2009 года, которые планируется исследовать в дальнейшем. На данном этапе для восстановления поверхности использовано гидростатическое приближение; альтернативно можно считать исследование примененным к исходным записям давления.

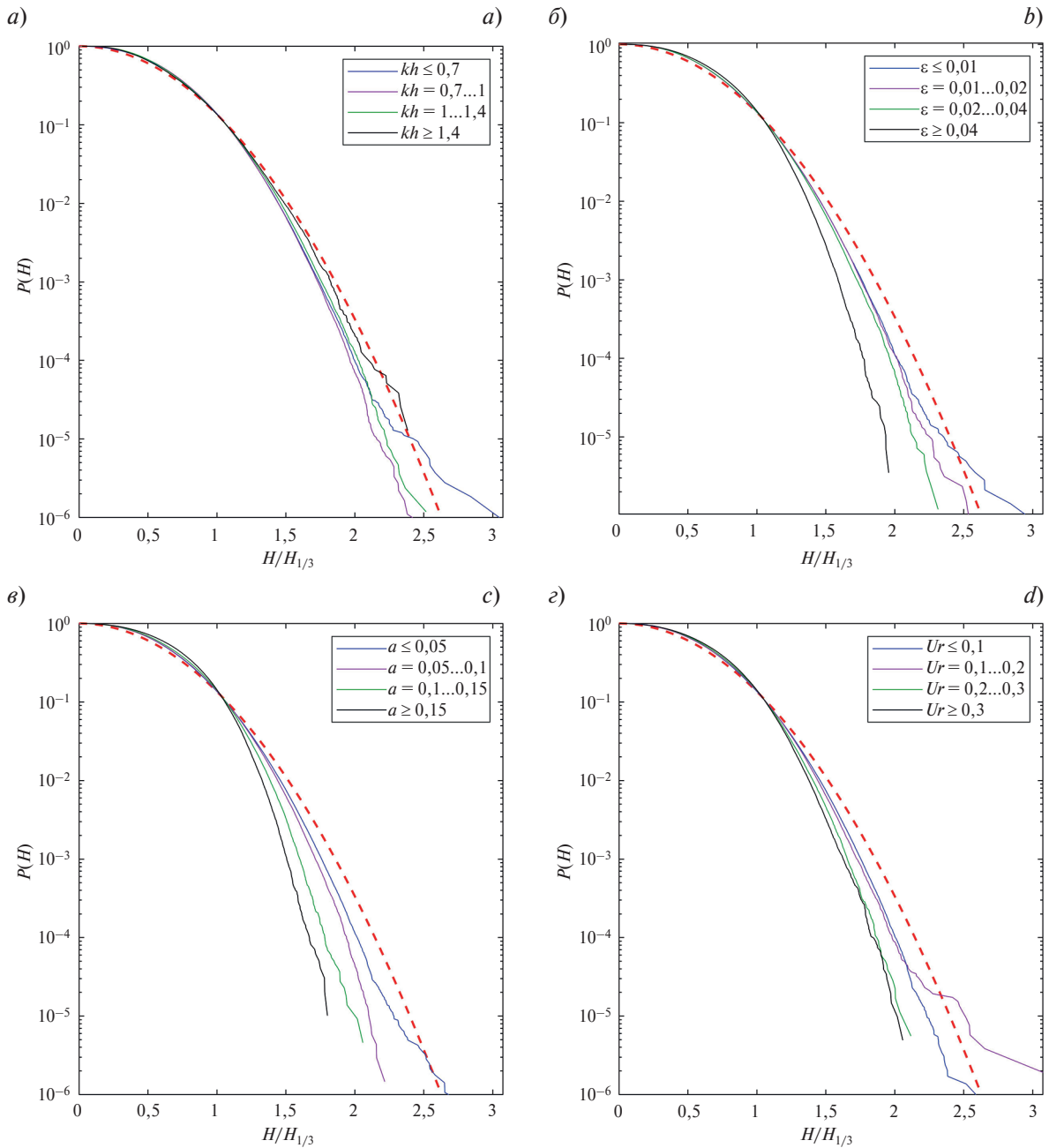


Рис. 5. Распределения вероятностей превышения высоты волн по выборкам в диапазонах параметров: глубины kh (а), крутизны волн ε (б), мелководной нелинейности a (в), числа Урселла Ur (г). Диапазоны соответствующих параметров указаны в кодировках линий

Fig. 5. Probability distributions of wave height exceedance by samples in the ranges of parameters: depth kh (a), wave steepness ε (b), shallow-water nonlinearity a (c), Ursell number Ur (d). The ranges of the corresponding parameters are indicated in the line codes

Главной задачей исследования явилось их разделение по подгруппам, которые должны соответствовать физически эквивалентным условиям распространения волн. Это позволит сформировать представительные подмножества статистически однородных волн, дифференцировать различные физические процессы, участвующие в формировании волн большой высоты. Для сортировки данных использованы естественные безразмерные параметры задачи: нормированная глубина места измерения и три параметра нелинейности, соответствующие крутизне (параметр нелинейности на глубокой воде), отношению амплитуды волны к глубине (параметр нелинейности на мелкой воде) и числу Урселла (отношение эффектов мелководной нелинейности к дисперсии). Несмотря на разный физический смысл, все перечисленные нелинейные параметры связаны между собой посредством безразмерной глубины.

Построены экспериментальные распределения вероятностей для подгрупп записей, соответствующих разным интервалам безразмерных параметров. Все зависимости демонстрируют в разной степени отличие от распределения Рэлея, которое заключается в том, что экспериментальная зависимость лежит выше теоретической кривой в интервале небольших высот и ниже распределения Рэлея в области больших значений высот волн. События самых больших превышений значительной высоты, наблюдавшиеся в ледовый период, сильно выбиваются из общего распределения и характеризуются значительно большей вероятностью. Выявлена существенная зависимость функции распределения вероятностей высот волн от нелинейности. Она наиболее сильно и четко проявляется при изменении параметра мелководной нелинейности — отношения среднеквадратичного смещения к глубине. Этот вывод качественно согласуется с теоретическим распределением Глуховского, для которого отличие от распределения Рэлея контролируется именно таким параметром, и отличие от распределения Рэлея выглядит качественно схожим с наблюдениями образом. С усилением нелинейности вероятность волн, превышающих значительную высоту в 2 раза и более, снижается.

Хотя доминирующая часть записей соответствует значению $kh \approx 0,6...0,7$, из-за вариации периодов приходящих волн и приливных эффектов по данным измерений на фиксированной глубине получается исследовать волны в широком диапазоне безразмерных глубин $kh = 0,3...2$. Для них наблюдается зависимость вероятностного распределения от глубины. Для выборки $kh \geq 1,4$ натурные данные следуют распределению Рэлея значительно лучше, демонстрируя повышение вероятности высоких волн в сравнении с данными $kh < 1,4$.

Записи, соответствующие условно ледовым периодам и содержащие волны с наибольшим превышением значительной высоты, располагаются на плоскостях безразмерных параметров отлично от остальных данных. Волны в таких записях обладают заметной крутизной $k\sigma > 0,03$ в довольно широком интервале безразмерных глубин $kh = 0,5...1,2$. Значительной нелинейностью в терминах отношения среднеквадратичного смещения поверхности к глубине и параметра Урселла обладает только их часть, содержащая сравнительно длинные волны.

Финансирование

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-17-00153.

Funding

The research is supported by the Russian Science Foundation under the grant № 22-17-00153.

Литература

1. Зайцев А.И., Малащенко А.Е., Пелиновский Е.Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4, № 4. С. 35–42.
2. Кузнецов К.И., Зайцев А.И., Костенко И.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Наблюдения волн-убийц в прибрежной зоне о. Сахалин // *Экологические системы и приборы*. 2014. № 2. С. 33–39.
3. Didenkulova E., Zaitsev A. In situ wave measurements in the Sea of Okhotsk // *Proc. The Fourteenth International MED-COAST Congress on Coastal and Marine Science, Engineering, Management and Conservation*. 2019. Vol. 2. pp. 755–762.
4. Кокорина А.В., Слюняев А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., Москвитин А.А., Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н. Анализ данных долговременных измерений волн у острова Сахалин // *Экологические системы и приборы*. 2022. № 12. С. 45–54. doi:10.25791/esip.12.2022.1339
5. Massel S.R. *Ocean surface waves: Their physics and prediction*. World Scientific Publ., Singapore. 1996. 491 p.
6. Baschek B., Imai J. Rogue wave observations off the US West Coast // *Oceanography*. 2011. Vol. 24. P. 158–165. doi:10.5670/oceanog.2011.35
7. Cattrell A.D., Srokosz M., Moat B.I., Marsh R. Can rogue waves be predicted using characteristic wave parameters? // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. Vol. 123. P. 5624–5636. doi:10.1029/2018JC013958
8. Cattrell A.D., Srokosz M., Moat B.I., Marsh R. Seasonal intensification and trends of rogue wave events on the US western seaboard // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 4461. doi:10.1038/s41598-019-41099-z
9. Слюняев А.В., Пелиновский Д.Е., Пелиновский Е.Н. Морские волны-убийцы: наблюдения, физика и математика // *Успехи физических наук*. 2023. Т. 193, № 2. С. 155–181. doi:10.3367/UFN.2021.08.039038
10. McLean J.W. Instabilities of finite-amplitude gravity waves on water of finite depth // *Journal of Fluid Mechanics*. 1982. Vol. 114. P. 331–341. doi:10.1017/S0022112082000184

11. Onorato M., Proment D., El G., Randoux S., Suret P. On the origin of heavy-tail statistics in equations of the Nonlinear Schrödinger type // *Physics Letters A*. 2016. Vol. 380. P. 3173–3177. doi:10.1016/j.physleta.2016.07.048
12. Пелиновский Е.Н., Родин А.А., Шургалова Е.Г. О Критериях перехода опрокидывающегося бора в волнообразный // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. С. 598–601. doi:10.7868/S0002351515050090
13. Toffoli A., Onorato M., Babanin A.V., Bitner-Gregersen E., Osborne A.R., Monbaliu J. Second-order theory and setup in surface gravity waves: a comparison with experimental data // *Journal of Physical Oceanography*. 2007. Vol. 37. P. 2726–2739. doi:10.1175/2007JPO3634.1
14. Pelinovsky E., Sergeeva A. Numerical modeling of the KdV random wave field // *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2006. Vol. 25. P. 425–434. doi:10.1016/j.euromechflu.2005.11.001
15. Slunyaev A.V., Sergeeva A.V., Didenkulova I. Rogue events in spatiotemporal numerical simulations of unidirectional waves in basins of different depth // *Natural Hazards*. 2016. Vol. 84. P. 549–565. doi:10.1007/s11069-016-2430-x
16. Mori N., Janssen P.A.E.M. On kurtosis and occurrence probability of freak waves // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 36. P. 1471–1483. doi:10.1175/JPO2922.1
17. Слюняев А.В., Сергеева А.В. Стохастическое моделирование однонаправленных интенсивных волн на глубокой воде в приложении к аномальным морским волнам // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2011. Т. 94. С. 850–858.

References

1. Zaytsev A.I., Malashenko A. Ye., Pelinovskiy E.N. Abnormally large waves near the southern coast of Sakhalin Island. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2011, 4(4), 35–42 (in Russian).
2. Kuznetsov K.I., Zaytsev A.I., Kostenko I.S., Kurkin A.A., Pelinovskiy E.N. Observations of the freak waves in the coastal zone of the Sakhalin Island. *Ecological Systems and Devices*. 2014, 2, 33–39.
3. Didenkulova E., Zaitsev A. In situ wave measurements in the Sea of Okhotsk. *Proc. The Fourteenth International MED-COAST Congress on Coastal and Marine Science, Engineering, Management and Conservation*. 2019, 2, 755–762.
4. Kokorina A.V., Slunyaev A.V., Zaytsev A.I., Didenkulova E.G., Moskvitin A.A., Didenkulova I.I., Pelinovskiy E.N. Analysis of the data of long-term wave measurements near Sakhalin Island. *Ecological Systems and Devices*. 2022, 12, 45–54. doi:10.25791/esip.12.2022.1339
5. Massel S.R. Ocean surface waves: Their physics and prediction. *World Scientific Publ., Singapore*. 1996. 491 p.
6. Baschek B., Imai J. Rogue wave observations off the US West Coast. *Oceanography*. 2011, 24, 158–165. doi:10.5670/oceanog.2011.35
7. Cattrell A.D., Srokosz M., Moat B.I., Marsh R. Can rogue waves be predicted using characteristic wave parameters? *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018, 123, 5624–5636. doi:10.1029/2018JC013958
8. Cattrell A.D., Srokosz M., Moat B.I., Marsh R. Seasonal intensification and trends of rogue wave events on the US western seaboard. *Scientific Reports*. 2019, 9, 4461. doi:10.1038/s41598-019-41099-z
9. Slunyaev A.V., Pelinovsky D.E., Pelinovsky E.N. Rogue waves in the sea: observations, physics and mathematics. *Physics — Uspekhi*. 2023, 66(2), 148–172. doi:10.3367/UFNe.2021.08.039038
10. McLean J.W. Instabilities of finite-amplitude gravity waves on water of finite depth. *Journal of Fluid Mechanics*. 1982, 114, 331–341. doi:10.1017/S0022112082000184
11. Onorato M., Proment D., El G., Randoux S., Suret P. On the origin of heavy-tail statistics in equations of the Nonlinear Schrödinger type. *Physics Letters A*. 2016, 380, 3173–3177. doi:10.1016/j.physleta.2016.07.048
12. Pelinovsky E.N., Shurgalina E.G., Rodin A.A. Criteria for the transition from a breaking bore to an undular bore. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015, 51, 530–533. doi:10.1134/S0001433815050096
13. Toffoli A., Onorato M., Babanin A.V., Bitner-Gregersen E., Osborne A.R., Monbaliu J. Second-order theory and setup in surface gravity waves: a comparison with experimental data. *Journal of Physical Oceanography*. 2007, 37, 2726–2739. doi:10.1175/2007JPO3634.1
14. Pelinovsky E., Sergeeva A. Numerical modeling of the KdV random wave field. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2006, 25, 425–434. doi:10.1016/j.euromechflu.2005.11.001
15. Slunyaev A.V., Sergeeva A.V., Didenkulova I. Rogue events in spatiotemporal numerical simulations of unidirectional waves in basins of different depth. *Natural Hazards*. 2016, 84, 549–565. doi:10.1007/s11069-016-2430-x
16. Mori N., Janssen P.A.E.M. On kurtosis and occurrence probability of freak waves. *Journal of Physical Oceanography*. 2006, 36, 1471–1483. doi:10.1175/JPO2922.1
17. Slunyaev A.V., Sergeeva A.V. Stochastic simulation of unidirectional intense waves in deep water applied to rogue waves. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 2011, 94, 779–786. doi:10.1134/S0021364011220103

Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин
The dependence of wave height probability distributions on physical parameters from measurements near Sakhalin Island

Об авторах

СЛЮНЯЕВ Алексей Викторович, РИНЦ Author ID: 40953, ORCID ID: 0000-0001-7782-2991,
Scopus Author ID: 11138998900, WoS Researcher ID: A-3272–2014, slunyaev@ipfran.ru

КОКОРИНА Анна Витальевна, РИНЦ Author ID: 161766, ORCID ID: 0000-0001-5196-537X,
Scopus Author ID: 26424742400, WoS Researcher ID: T-3545–2018, a.sergeeva@ipfran.ru

ЗАЙЦЕВ Андрей Иванович, РИНЦ Author ID: 133746, ORCID ID: 0000-0002-1383-363X,
Scopus Author ID: 36866694500, WoS Researcher ID: A-1772–2014, aizaytsev@mail.ru

ДИДЕНКУЛОВА Екатерина Геннадьевна, РИНЦ Author ID: 643684, ORCID ID: 0000-0003-2962-5584,
Scopus Author ID: 36915865200, WoS Researcher ID: A-3297–2014, eshurgalina@ipfran.ru

МОСКВИТИН Александр Анатольевич, a.moskvitin@skbsami.ru

ДИДЕНКУЛОВ Олег Игоревич, didenkulov@gmail.com

ПЕЛИНОВСКИЙ Ефим Наумович, РИНЦ Author ID: 103314, ORCID ID: 0000-0002-5092-0302,
Scopus Author ID: 7004951110, WoS Researcher ID: I-3670–2013, pelinovsky@ipfran.ru