

## Вероятностные характеристики интенсивных короткопериодных внутренних волн в Японском море

М. В. Кокоулина, О. Е. Куркина, Е. А. Рувинская, А. А. Куркин\*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
Нижний Новгород, Россия  
\*E-mail: aakurkin@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.04.2020 г., после доработки – 30.06.2020 г.

*Цель.* Работа посвящена исследованию региональных особенностей поля внутренних волн в Японском море (залив Петра Великого) на основе натурных данных – определению статистических характеристик внутреннего волнения, которые могут быть использованы для прогнозирования возможности генерации волн экстремальных амплитуд.

*Методы и результаты.* В качестве исходных данных для анализа использовались записи изменчивости температуры воды в заливе Петра Великого, полученные за период 11–20 октября 2011 г. (глубина в точке замеров 42 м). Частота дискретизации записи составляет 1 с и позволяет анализировать форму короткопериодных внутренних волн. Используются также данные о вертикальном распределении солености вблизи точки измерений. Закон спада спектра плотности мощности исследуемой записи хорошо описывается моделью Гаррета – Манка для исследуемой зоны Японского моря. Рассчитанные временные ряды плотности использованы для получения основных статистических характеристик, в том числе статистических моментов. Наряду с моментными характеристиками были определены параметры волн, такие как высоты волн, периоды, крутизна и амплитуда волнового склона. Построены и проанализированы распределения ординат волн, высот волн, периодов и других характеристик волнения. С помощью пуассоновской статистики дан прогноз ожидаемых высот волн.

*Выводы.* Показано, что исследуемые вероятностные характеристики внутренних волн хорошо описываются логнормальным распределением. На основании распределений повторяемости высот внутренних волн оценены вероятности появления интенсивных возмущений. Показано, что в течение 10 дней гарантированно появляется короткопериодная волна высотой не менее 7 м при глубине моря в точке наблюдений 42 м.

**Ключевые слова:** интенсивные внутренние волны, натурные наблюдения, вероятностные характеристики экстремальных волн, шельф, Японское море.

**Благодарности:** представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2020-0007) и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2485.2020.5, а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1225.2019.5).

**Для цитирования:** Вероятностные характеристики интенсивных короткопериодных внутренних волн в Японском море / М. В. Кокоулина [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 545–558. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-545-558

# Probabilistic Characteristics of Intensive Short-Period Internal Waves in the Sea of Japan

M. V. Kokoulina, O. E. Kurkina, E. A. Rouvinskaya, A. A. Kurkin\*

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

*\*e-mail: aakurkin@gmail.com*

*Purpose:* The paper is aimed at studying the regional features of the internal waves' field in the Sea of Japan (the Peter the Great Bay) based on the field data, namely, determination of the internal waves' statistical characteristics which can be used to predict possibility of generating the waves of extreme amplitudes.

*Methods and Results:* The records of water temperature variability in the Peter the Great Bay (the depth at the point of measurements is 42 m) obtained for October 11 – October 20, 2011 were used as the initial data. Sampling frequency of the records was 1 s that permitted to analyze the shape of the short-period internal waves. Also the data on the salinity vertical distribution near the measurement point were used. The law of the power density spectrum decay (as applied to the studied record) is well described by the Garrett – Munk model for the Sea of Japan zone under investigation. The calculated temporal series of density were applied for obtaining the basic statistical characteristics including the statistical moments. Besides, empirical distribution for such parameters as the wave heights, periods and steepness, and the wave slope amplitude was approximated by the log-normal distribution law and analyzed. The expected wave heights were forecasted using the Poisson statistics.

*Conclusions:* It is shown that the probabilistic characteristics of the internal waves are described well by the log-normal distribution. Based on repeatability of the internal waves' heights, probability of appearance of intensive disturbances is estimated. It is shown that within 10 days, occurrence of a short-period wave with the height not less than 7 m is guaranteed at the observation point at the 42 m depth.

**Keywords:** intensive internal waves, *in situ* data, probabilistic characteristics of extreme waves, shelf, Sea of Japan.

**Acknowledgments:** the represented results were obtained within the framework of the state task in the scientific activity field (theme No. FSWE-2020-0007) and at the support both of the President of RF grant on state support of the RF leading scientific schools SS-2485.2020.5 and the grant of the President of Russian Federation to young scientists and postgraduates (PG-1225.2019.5).

**For citation:** Kokoulina, M.V., Kurkina, O.E., Rouvinskaya, E.A. and Kurkin, A.A., 2020. Probabilistic Characteristics of Intensive Short-Period Internal Waves in the Sea of Japan. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(5), pp. 501-513. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-501-513

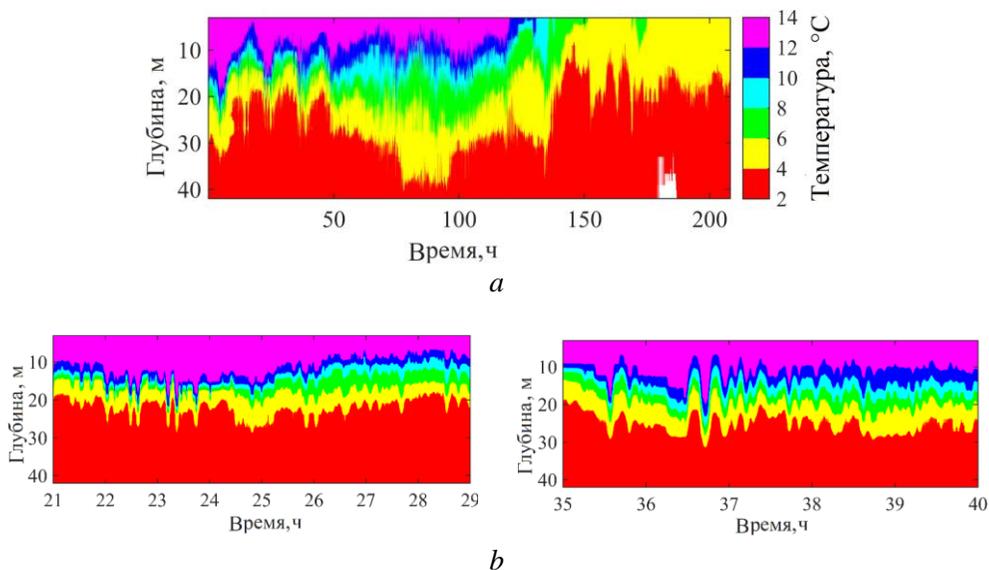
## Введение

Шельфовая зона морей характеризуется наиболее существенной изменчивостью гидрофизических полей, связанной в том числе с воздействием интенсивных внутренних волн, трансформирующихся и разрушающихся над континентальным склоном [1]. Большая часть наблюдений солитонов внутренних волн также приходится на прибрежные области (см., напр., атлас наблюдений внутренних волн [2]: [https://lmmad.nntu.ru/ru/igwatlas\\_map/](https://lmmad.nntu.ru/ru/igwatlas_map/)).

Основным механизмом генерации короткопериодных интенсивных внутренних волн является взаимодействие приливных течений с неровностями дна [3]. Короткопериодные внутренние волны – это волны с периодами от нескольких минут до нескольких десятков минут и с пространственными масштабами от нескольких сотен метров до нескольких километров. Такие волны способствуют изменчивости гидрологических характеристик и могут оказывать влияние на безопасность и экономическую эффективность работ

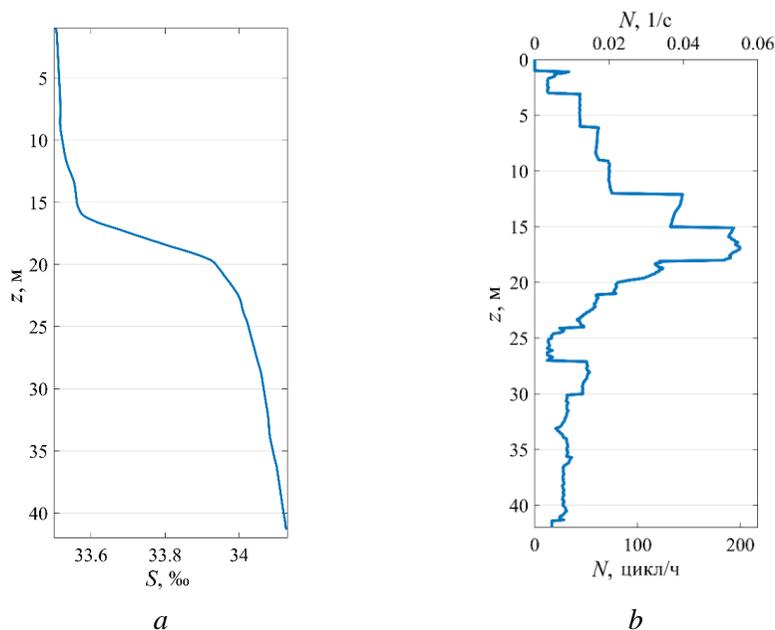


20 октября (10:45) 2011 г. (частота дискретизации данных 1 с) (рис. 2) и вертикальный профиль солёности (рис. 3, *a*) на основе измерения зондом *RBR* 12 октября в 17:40 примерно в 500 м от термогирлянды.



**Р и с. 2.** Запись вертикального профиля температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от времени (*a*) и ее увеличенные фрагменты (*b*)

**F i g. 2.** Record of the temperature vertical profile ( $^{\circ}\text{C}$ ) depending on time (*a*) and its enlarged fragments (*b*)



**Р и с. 3.** Вертикальный профиль солёности (*a*) и частоты Вьяйсяля – Брента (*b*) 12 октября 2011 г. в 17:40 (через 23 ч 10 мин от начала записи)

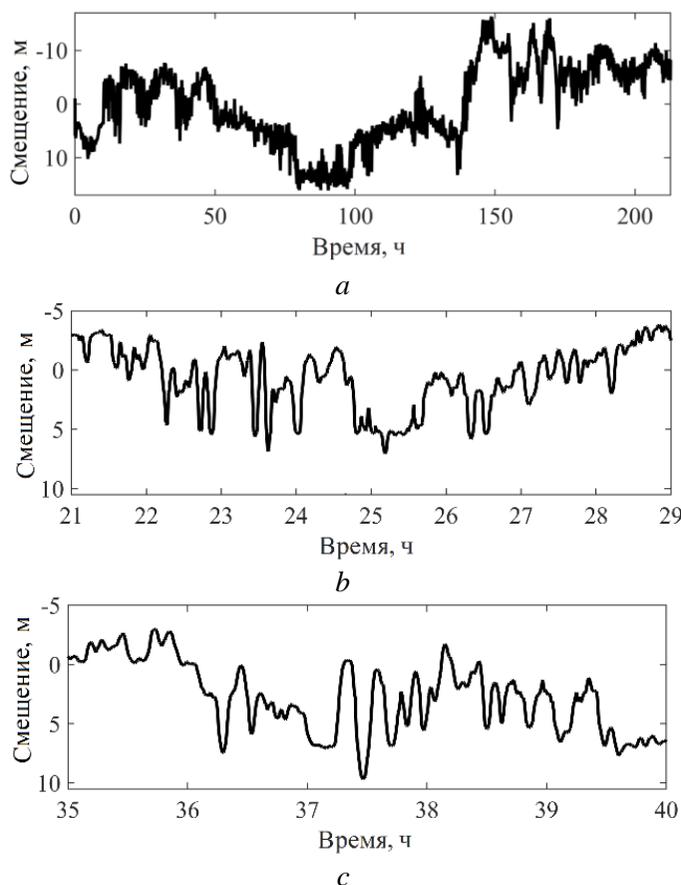
**F i g. 3.** Vertical profile of salinity (*a*) and Brunt – Väisälä frequency (*b*) on October 12, 2011 at 17:40 (in 23 hrs and 10 min from the recording start)

На рис. 2, *a* представлена запись наблюдавшихся пакетов внутренних волн в поле температуры морской воды. Здесь показан волновой цуг, в котором отчетливо различаются полусуточные и более длинные приливные возмущения. Все изотермы выглядят «изрезанными» из-за генерирующихся коротковолновых возмущений с вертикальной амплитудой порядка 1–10 м, структура и состав которых хорошо видны на увеличенных фрагментах записи на рис. 2, *b*. Амплитуда несущих длинных волн при этом достигает 5–15 м на глубине 42 м в данной точке измерений, что свидетельствует об их нелинейности. Волновое поле смещений изотерм содержит преимущественно возмущения первой вертикальной моды, модовая функция имеет максимум на глубине 17 м, коэффициенты квадратичной и кубической нелинейностей в рамках слабонелинейной теории внутренних волн отрицательны, а предельная амплитуда солитона уравнения Гарднера составляет примерно –5,7 м (более подробно о задаче Штурма – Лиувилля для длинных линейных внутренних волн и определении коэффициентов нелинейности можно прочитать, напр., в [13]).

На представленной записи (рис. 2, *a*) ясно различаются три различных волновых режима. Первый из них начинается через несколько часов от начала записи и продолжается приблизительно в течение 50 ч. Этот режим характеризуется сильной температурной стратификацией (изменения температуры имеют диапазон 2–14°C) и наличием узкого ярко выраженного сезонного термоклина в слое 10–20 м от поверхности, положение которого испытывает значительные колебания с полусуточным периодом. Эти колебания имеют типичную структуру с укрупненными волновыми фронтами в форме солиборов. Следующий далее участок записи продолжительностью 50–120 ч характеризуется плавным распределением температуры по глубине с прогревом нижних слоев; длинноволновые колебания изотерм здесь имеют существенно более продолжительный период. Наконец, третий, завершающий участок записи (130–210 ч) характеризуется общим охлаждением моря, так что температура на поверхности не превышает 8°C и, соответственно, стратификация плотности морской воды более слабая, поэтому здесь возможны (и наблюдаются) волны с наибольшими амплитудами. На всех трех участках записи, несмотря на их различия, явно прослеживаются цуги интенсивных короткопериодных внутренних волн со значительными амплитудами. Многие из этих возмущений имеют типичную форму уединенных внутренних волн, преимущественно отрицательной полярности (в форме впадин), что согласуется со знаком параметра квадратичной нелинейности. Однако отдельные участки записи, в том числе показанные на рис. 2, *b*, содержат локализованные осциллирующие волновые пакеты, по форме похожие на внутренние бризеры [14–18], амплитуда которых может достигать 5–10 м.

### **Спектральный и статистический анализ записей**

Для статистического анализа волновых возмущений в поле смещений изотерм была выделена наиболее длинная изотерма  $T = 4^\circ\text{C}$ , она приведена на рис. 4. Исходная запись была сглажена путем спектральной фильтрации шумов с периодом менее 1 мин. Видно, что размах колебаний кривой за время наблюдений составляет около 34 м при общей глубине моря 42 м.



**Р и с. 4.** Изотерма 4°C (a) и ее увеличенные фрагменты (b, c)  
**Fig. 4.** Isotherm 4°C (a) and zoom of its fragments (b, c)

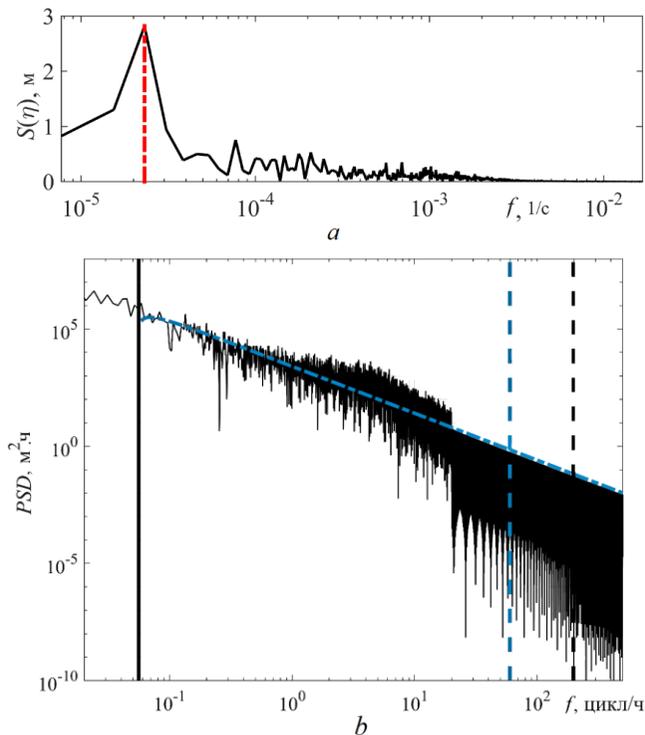
Спектр колебаний температуры, полученный при измерениях с заякоренного буя, будет иметь, за исключением, возможно, инерционной и приливных частот, непрерывный характер во всем диапазоне частот [1]. Уровень спектральной плотности падает по степенному закону с показателем степени от  $-1$  до  $-4$ , а чаще от  $-2$  до  $-3$ . Амплитудный спектр (рис. 5, a) фрагмента изотермы (за интервал времени 14–50 ч от начала записи, где отчетливо видны укрупняющиеся фронты волн полусуточного прилива) быстро спадает с увеличением частоты, и наблюдается значительный пик на частоте, соответствующей полусуточному периоду.

В связи с тем что спектры температурных колебаний в различных акваториях Мирового океана подобны, Гарретт и Манк обобщили их в виде следующей аппроксимации для спектральной плотности вертикальных смещений (см., напр., [1]):

$$S(f, z) = \frac{C_M f_{in} \sqrt{f^2 - f_{in}^2}}{N(z) f^3}, \quad (1)$$

где  $C_M = 204 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}^{-1}$  – эмпирическая константа; все частоты ( $f$ ,  $f_{in}$  и  $N$ ) имеют размерность цикл/ч;  $f_{in} = 2 \Omega_E \sin \varphi$  – инерционная частота ( $\Omega_E$  – частота вращения Земли, соответствующая периоду 24 ч,  $\varphi$  – географическая широта точки наблюдений);  $N(z) = \sqrt{\frac{g}{\rho_0(z)} \frac{d\rho_0(z)}{dz}}$  – частота Вайсяля – Брента на го-

ризонте  $z$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho_0(z)$  – вертикальный профиль плотности морской воды, координата  $z$  направлена вниз,  $z = 0$  соответствует поверхности моря. Плотность  $\rho_0(z)$  была рассчитана по профилям температуры и солености на основании международного уравнения состояния морской воды *TEOS-10* (<http://www.teos-10.org/>). Вертикальный профиль частоты Вайсяля – Брента показан на рис. 3, *b*. Максимальные значения  $N(z)$  достигаются на глубинах 15–18 м и составляют более 0,05 1/с, что соответствует возможным минимальным периодам высокочастотных внутренних волн менее одной минуты.

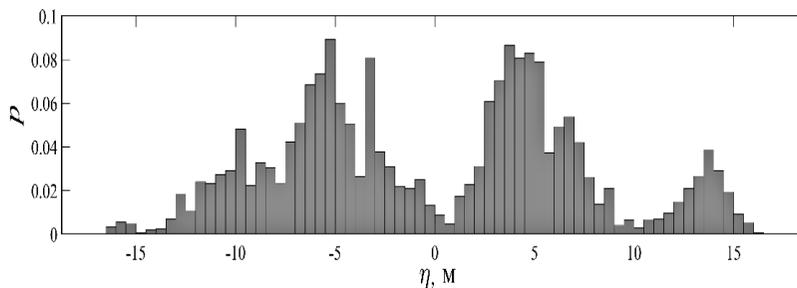


**Р и с. 5.** Амплитудный спектр вертикального смещения изотермы  $4^\circ\text{C}$  на временном отрезке 14–50 ч (красная вертикальная линия – частота, соответствующая полусуточному периоду) – *a*; спектральная плотность того же волнового поля (синим штрихпунктиром дан спектр Гаррета – Манка (1) для  $z = 25,5$  м, сплошная вертикальная линия соответствует инерционной частоте  $f_{in}$ , синяя вертикальная штриховая – периоду 1 мин, черная вертикальная штриховая – максимальному значению частоты Вайсяля – Брента) – *b*

**F i g. 5.** Amplitude spectrum of the  $4^\circ\text{C}$  isotherm vertical displacement within the time interval 14–50 hrs (red vertical line denotes frequency corresponding to the semi-diurnal period) – *a*; spectral density of the same wave field (blue dash-dot line shows the Garrett – Munk spectrum (1) for  $z = 25.5$  m, solid vertical line corresponds to the inertial frequency  $f_{in}$ , blue vertical dash line – to the period 1 min, black vertical dash line – to the maximum value of the Brunt – Väisälä frequency) – *b*

На рис. 5, *b* представлена аппроксимация спектра колебания температуры модельным спектром Гарретта – Манка (1). Для расчетов по формуле (1) мы взяли средний уровень изотермы  $4^{\circ}\text{C}$   $z = 25,5$  м и  $N(z) = 0,004$  1/с.

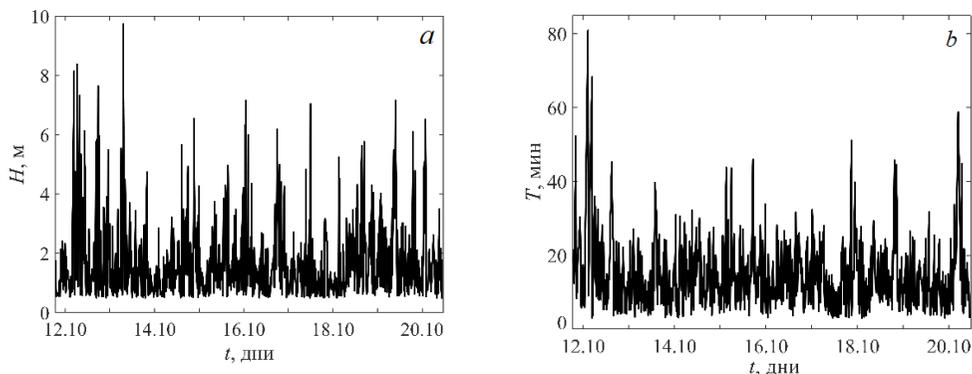
Распределение повторяемости ординат смещения изотермы, показанной на рис. 4, приведено на рис. 6. Оно позволяет получить общую картину диапазона изменчивости значений этой величины. Видно, что распределение является мультимодальным (отчетливо выделяются 3 максимума положительных/отрицательных значений ординат смещений изотермы:  $\sim -6$ ,  $\sim 4$ ,  $\sim 13,5$  м), это можно интерпретировать таким образом, что данные наблюдений представляют собой суперпозицию нескольких процессов с отличающимися статистическими характеристиками.



**Рис. 6.** Эмпирическое распределение ординат смещений изотермы  
**Fig. 6.** Empirical distribution of the ordinates of the isotherm displacements

Из сглаженной записи смещений изотермы  $4^{\circ}\text{C}$ , рассматриваемой как запись нерегулярного волнения, было выделено 1046 волн. Высота волны  $H$  оценивается как средняя величина между высотами ее переднего и заднего склона, период  $T$  каждой волны определяется как временной интервал между соседними минимумами залегания изолинии. Волны высотой менее 0,5 м не учитывались.

Проанализируем значения высот волн и соответствующие им периоды. На рис. 7 показано распределение этих величин внутри исходной записи.

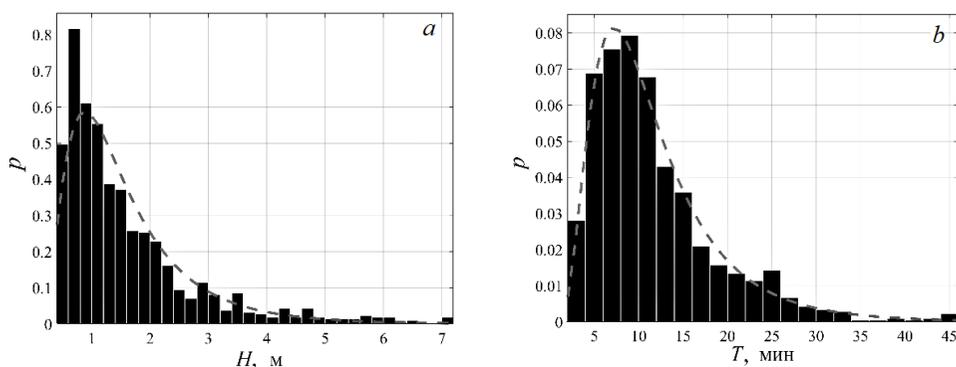


**Рис. 7.** Зависимость от времени высоты (*a*) и периодов (*b*) волн  
**Fig. 7.** Time-dependence of the wave heights (*a*) and periods (*b*)

Распределения повторяемости высот  $H$  и периодов  $T$  волн в записи смещения изотермы  $4^{\circ}\text{C}$  показаны на рис. 8. Отметим, что высоты всех рассматриваемых волн лежат в диапазоне 0,5–10 м, периоды – в интервале 2–60 мин. Средняя высота волны составляет 1,6 м, среднеквадратическое отклонение высоты 1,12 м; средний период равен 12 мин, среднеквадратическое отклонение 7,4 мин. Оба распределения хорошо аппроксимируются теоретическим логнормальным законом распределения с плотностью вероятности

$$g(a) = \frac{1}{a\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(\ln a/\mu)^2 / 2\sigma^2\right], \quad (2)$$

где  $a$  – анализируемая величина с параметрами  $\mu = 0,27$  м,  $\sigma = 0,63$  для высот волн  $H$  и  $\mu = 2,3$  мин,  $\sigma = 0,58$  для периодов  $T$ .



**Рис. 8.** Распределения высоты (а) и периодов (b) волн и их аппроксимации (штриховая) логнормальным законом распределения (2)

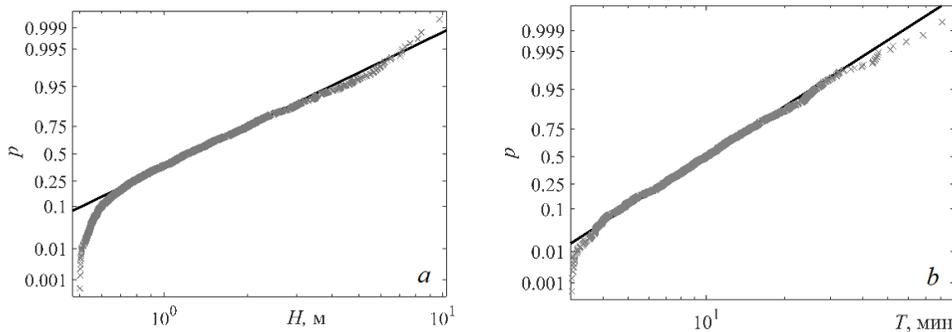
**Fig. 8.** Distributions of the wave heights (a) and periods (b) and their approximations (dash line) by the log-normal distribution law (2)

Критерий Пирсона также подтверждает, что распределения высот и периодов волн подчиняются логарифмически нормальному закону,  $\chi^2$  для высот и периодов равно 10,93 и 21,52 соответственно при критическом значении 68,7.

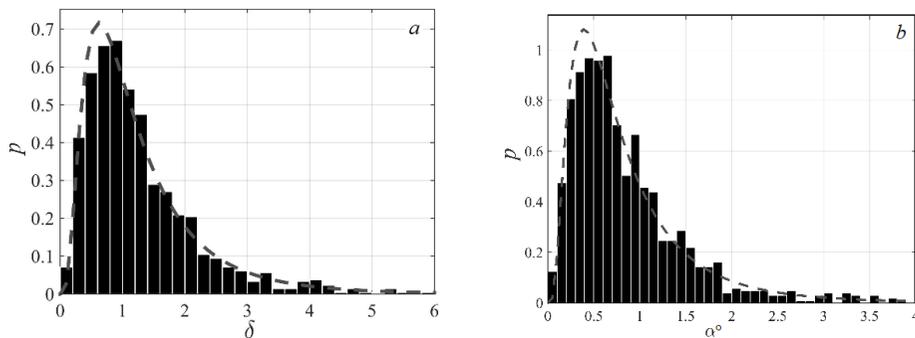
На рис. 9, демонстрирующем экспериментальные данные о высотах волн в координатах логнормального распределения (в этих координатах логнормальная кривая становится прямой линией, вертикальная ось – нелинейная), показано, что наибольшие отклонения наблюдаются в области малых высот и периодов волн.

В классическом смысле крутизна волны – это отношение высоты волны к ее длине, а амплитуда угла волнового склона (локальная крутизна) есть максимальное значение угла в точках профиля волны. Однако поскольку мы анализируем запись по времени (знаем период волны, а не длину), то для нахождения этих характеристик необходимо ввести безразмерные переменные, определяющие оси абсцисс и ординат:  $t^* = t/T^*$ ,  $z^* = z/H^*$ , где  $t$  и  $z$  – значения времени записи и ординат изотермы соответственно,  $T^*$  и  $H^*$  – модальные значения для логнормальных кривых, выравнивающих распределения высот и периодов волн. Диапазон изменения полученной крутизны волны

$\delta = HT^*/(H^*T)$  и амплитуды угла волнового склона  $\alpha$  для изотермы 4°C показаны на рис. 10. Отметим, что крутизна волн имеет небольшие значения, которые лежат в интервале 0–10, а амплитуда угла волнового склона – в интервале 0–4,5°. Оба распределения также хорошо аппроксимируются теоретическим логнормальным законом распределения (2) с параметрами  $\mu = 1,29$ ,  $\sigma = = 1,07$  для крутизны волн  $\delta$  и  $\mu = 0,86^\circ$ ,  $\sigma = 0,51$  для амплитуды волнового склона  $\alpha$ .



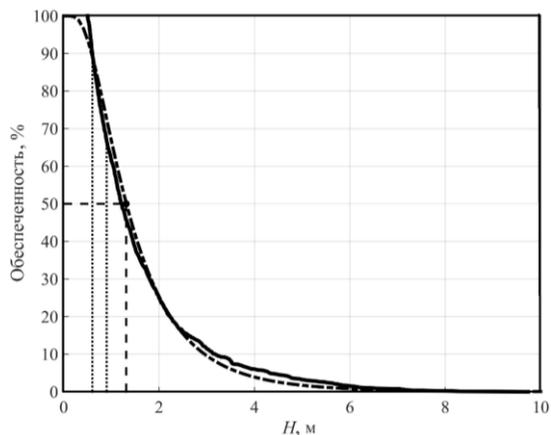
**Р и с. 9.** Сравнение распределений высоты (а) и периодов (b) волн с логнормальным распределением (сплошная линия), крестики – реальные данные  
**F i g. 9.** Comparison of distributions of the wave heights (a) and periods (b) with the log-normal ones (solid line), crosses denote real data



**Р и с. 10.** Распределения крутизны волн (а) и амплитуды угла волнового склона (b) и их аппроксимации (штриховая) логнормальным законом распределения (2)  
**F i g. 10.** Distributions of wave steepness (a) and wave slope angle amplitude (b), and their approximations (dash line) by the log-normal distribution law (2)

Кривая обеспеченности высот волн, полученная в соответствии с законом логнормального распределения (2), показана на рис. 11. Модальный уровень составляет 0,6–0,9 м, медианный уровень – 1,31 м, значительная высота волн равна 2,8 м. Ниже приведено соответствие высоты волн и уровней обеспеченности для поля смещения изотермы 4°C:

$H$ , м	1	3	5	10
Обеспеченность, %	65,5	10	1,5	0,06



**Р и с. 11.** Обеспеченность высот волн смещения изотермы 4°C. Сплошная линия – эмпирическая кривая, штрихпунктир – теоретическая функция вероятности превышения уровня, соответствующая логнормальному закону (2), штриховая – значение медианы, пунктирные линии – диапазон модального уровня

**F i g. 11.** Exceedance probability for the wave heights for the displacement of the 4°C isotherm. Solid line is the empirical curve, dash-dot line represents the theoretical function of the level excess probability corresponding to the log-normal law (2), dash line denotes the median value, and the dotted lines – the modal level range

В качестве оценки опасности, связанной с уровнем высоты волны  $h$ , используем величину, равную вероятности превышения этого уровня:

$$R(h) = 1 - P_0(>h) = 1 - \exp[-\varphi(h)t]$$

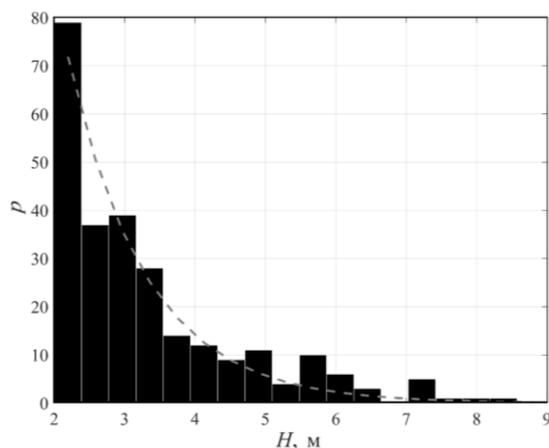
в соответствии с описанием пуассоновской последовательности событий. Функция  $\varphi(h)$  в показателе экспоненты носит название функции повторяемости высот волн:

$$\varphi(h) = \frac{N(\text{высота} \geq h)}{T},$$

которая по определению равна средней частоте событий с высотой волны в данном месте, равной или превышающей пороговое значение  $h$ . Эта функция является монотонно убывающей и при достаточно больших  $h$  хорошо аппроксимируется экспонентой (рис. 12):

$$\varphi(h) = f_h \exp\left[-h/H^*\right]. \quad (3)$$

Функция повторяемости высот внутренних волн зависит от двух эмпирических параметров, которые требуется подобрать из натурных данных:  $f_h$  имеет физический смысл частоты больших волн, параметр  $H^*$  – так называемая характеристическая высота, имеет размерность амплитуды рассматриваемого волнового поля. Оба параметра являются региональными, зависят от характеристик шельфа, особенностей гидрологии. В нашем случае  $f_h = 58,1$  1/день,  $H^* = 1,1$  м.



**Р и с. 12.** Распределение высот волн и его аппроксимация (штриховая) экспоненциальным законом распределения (3)

**F i g. 12.** Distribution of wave heights and its approximation (dash line) by the exponential distribution law (3)

Ожидаемая высота за период времени, например, равный 10 дням, вычисляется по формуле

$$h_{10 \text{ дней}} = H^* \ln(10 \text{ дней} \cdot f_h, 1/\text{день}) .$$

Оценки ожидаемых высот внутренних волн за периоды 10, 30, 60 и 90 дней приведены в таблице. Разумеется, долгосрочный прогноз характеристик волн, сделанный на основании 9-дневной записи, следует рассматривать как предварительный, который в дальнейшем нуждается в проверке на основании более длинных записей.

**Ожидаемые высоты внутренних волн (м), превышаемые хотя бы один раз за указанный период времени**  
**Expected heights of the internal waves (m) which were at least once exceeded during the specified time period**

Период времени, дни / Time period, days	Ожидаемая высота $h$ , м (95%-ный доверительный интервал, м) / Expected height $h$ , m (95%-confidence interval)
10	7,04 (5,12; 8,91)
30	8,25 (6,1; 10,36)
60	9,02 (6,72; 11,28)
90	9,47 (7,08; 11,81)
Максимальная высота волны (из наблюдений), м / Maximum wave height (based on observations), m	9,73

**Заключение**

В ходе исследований обработан временной ряд профилей температуры длиной около 210 ч, полученный в шельфовой зоне Японского моря по дан-

ным инструментальных наблюдений за 9 дней в октябре 2011 г. В записи было идентифицировано более 1000 короткопериодных внутренних волн с высотами 1–10 м при общей глубине в точке измерений 42 м. Показано, что вероятностные характеристики внутренних волн хорошо описываются логнормальным распределением. На основании распределения повторяемости высот внутренних волн выполнена оценка вероятности появления интенсивных возмущений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morozov E. G.* Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling // Cham : Springer International Publishing, 2018. 304 p. doi:10.1007/978-3-319-73159-9
2. База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане / А. С. Епифанова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 395–403. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-395-403
3. *Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K.* Baroclinic Tides: Theoretical Modeling and Observational Evidence. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. P. 335–347. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535932>
4. Handbook of offshore engineering: in two volumes / [ed. by] S. Chakrabarti. London : Elsevier, 2005.
5. *Osborne A.* Nonlinear Ocean Waves and the Inverse Scattering Transform. Amsterdam : Academic Press, 2010. 944 p. (International Geophysics ; Vol. 97).
6. Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses / Z. J. Song [et al.] // Applied Ocean Research. 2011. Vol. 33, iss. 2. P. 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2011.01.003>
7. *Stöber U., Moum J. N.* On the potential for automated realtime detection of nonlinear internal waves from seafloor pressure measurements // Applied Ocean Research. 2011. Vol. 33, iss. 4. P. 275–285. doi:10.1016/j.apor.2011.07.007
8. *Свергун Е. И., Зимин А. В.* Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 13–19. doi:10.7868/S2073667317020022
9. *Зимин А. В., Свергун Е. И.* Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей: оценка повторяемости экстремальных высот и динамических эффектов в придонном слое // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 66–72. doi:10.7868/S2073667318040081
10. Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря / И. О. Ярошук [и др.] // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1 (15). С. 37–44.
11. Об интенсивных внутренних волнах в прибрежной зоне залива Петра Великого (Японское море) / И. О. Ярошук [и др.] // Метеорология и гидрология. 2016. № 9. С. 55–62.
12. *Samchenko A. N., Yaroshchuk I. O., Kosheleva A. V.* Internal gravity waves in the coastal zone of the Sea of Japan according to the natural observations // Regional Studies in Marine Science. 2018. Vol. 18. P. 156–160. <https://doi.org/10.1016/j.risma.2018.02.004>
13. Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin / O. Kurkina [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2017. Vol. 185. P. 44–54. doi:10.1016/j.ecss.2016.12.003
14. Breather generation in fully nonlinear models of a stratified fluid / K. G. Lamb [et al.] // Physical Review. 2007. Vol. E 75. 046306. doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.046306>
15. Перенос частиц при распространении бризеров внутренних гравитационных волн / Е. А. Рувинская [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 3. С. 53–61.

16. Transformation of internal breathers in the idealized shelf sea conditions / E. Rouvinskaya [et al.] // Continental Shelf Research. 2015. V. 110. P. 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.017>
17. Internal breathers' loads on marine facilities / E. Rouvinskaya [et al.] // 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017. Mugla, Turkey : MEDCOAST, 2017. Vol. 2. P. 1191–1202
18. Particle transport by internal breathers / E. A. Rouvinskaya [et al.] // 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017. Mugla, Turkey : MEDCOAST, 2017. Vol. 2. P. 1179–1190.

*Об авторах:*

**Кокоулина Мария Владимировна**, инженер, научно-исследовательская лаборатория моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), **ORCID ID: 0000-0001-5890-3649**, **ResearcherID: AAD-7131-2019**, [kokoulinamaria97@gmail.com](mailto:kokoulinamaria97@gmail.com)

**Куркина Оксана Евгеньевна**, ведущий научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0002-4030-2906**, **ResearcherID: G-9577-2011**, [Oksana.Kurkina@mail.ru](mailto:Oksana.Kurkina@mail.ru)

**Рувинская Екатерина Александровна**, научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3858-1731**, **ResearcherID: A-2868-2014**, [e.rouvinskaya@gmail.com](mailto:e.rouvinskaya@gmail.com)

**Куркин Андрей Александрович**, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Прикладная математика», научный руководитель научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0003-3828-6406**, **ResearcherID: A-1972-2014**, [aakurkin@gmail.com](mailto:aakurkin@gmail.com)