

## Влияние асимметрии и групповой структуры морских волн на генерацию инфразвука морской поверхностью

А. С. Запевалов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
✉ *sevzepter@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 07.12.2022;  
принята к публикации 16.01.2023.

### *Аннотация*

*Цель.* Анализ влияния эффектов нелинейности морских волн, проявляющихся в асимметрии распределения возвышений морской поверхности и возникновении групповой структуры, на генерацию инфразвукового излучения морской поверхностью – цель настоящей работы.

*Методы и результаты.* Анализ проводится на основе аналитической модели волнового профиля, позволяющей задавать асимметричный профиль волны (заостренный гребень и плоская впадина), а также изменять фактор групповитости и число волн в группе. Поле поверхностных волн представлено в виде суперпозиции свободных волн и гармоник. Для его исследования используется математический аппарат разложения анализируемой функции в ряд Фурье. Получены количественные оценки, характеризующие в разных ситуациях отношение амплитуд акустических волн, генерируемых основной волной и ее гармониками. Показано, что асимметрия оказывает более значительное влияние на уровень генерации инфразвука, чем групповая структура волн.

*Выводы.* Как асимметрия распределения возвышений морских волн, так и их групповая структура приводят к снижению уровня инфразвука, генерируемого морской поверхностью, а также к перераспределению энергии инфразвука по пространственным и временным масштабам.

**Ключевые слова:** морская поверхность, свободные волны, связанные волны, гидроакустика, инфразвук, групповая структура

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования».

**Для цитирования:** Запевалов А. С. Влияние асимметрии и групповой структуры морских волн на генерацию инфразвука морской поверхностью // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 177–188. EDN GMHTUM. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-177-188

## Impact of the Sea Waves' Skewness and Group Structure on the Infrasound Generation by the Sea Surface

A. S. Zapevalov

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
✉ *sevzepter@mail.ru*

### Abstract

*Purpose.* The study is aimed at analyzing the impact of the effects of the sea waves' nonlinearity manifested in the skewness of sea surface elevations and in arising of a group structure, upon the generation of infrasound radiation by the sea surface.

*Methods and Results.* The analysis is based on the analytical model of a wave profile which permits to set an asymmetric wave profile (a pointed crest and a flat trough), and also to vary the grouping factor and the number of waves in a group. The field of surface waves is represented as a superposition of free waves and harmonics. It was studied using the mathematical apparatus of decomposing the analyzed function into the Fourier series. Quantitative estimates characterizing (in different situations) the ratio between the amplitudes of the acoustic waves generated by the main wave and its harmonics were obtained. It was shown that skewness affected the level of infrasound generation to a greater extent than the group structure of waves.

*Conclusions.* Both the skewness of sea wave elevations and their group structure lead to a decrease in the level of infrasound generated by the sea surface, as well as to the redistribution of infrasound energy over the spatial and temporal scales.

**Keywords:** sea surface, free waves, bonded waves, hydroacoustics, infrasound, group structure

**Acknowledgments:** The investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. 2021-0004 "Fundamental studies of the oceanological processes which determine the state and evolution of the marine environment influenced by natural and anthropogenic factors, based on the observation and modeling methods".

**For citation:** Zapevalov, A.S., 2023. Impact of the Sea Waves' Skewness and Group Structure on the Infrasound Generation by the Sea Surface. *Physical Oceanography*, 30(2), pp. 160-170. doi:10.29039/1573-160X-2023-2-160-170

### Введение

В настоящее время большой научный и практический интерес представляют исследования, в которых изучается генерация инфразвука морской поверхностью [1–4]. В 1950 г. Лонге-Хиггинс построил модель генерации инфразвука морскими поверхностными волнами одинаковой частоты, распространяющимися во встречных направлениях [5]. Генерируемые в результате нелинейного взаимодействия волн незатухающие с глубиной инфразвуковые пульсации давления приводят к появлению микросеймов. Выявлено существование связи между метеорологическими условиями и возникновением микросеймов, которые играют важную роль в геофизических процессах [6–8].

Теория генерации инфразвука получила развитие в работах [9–11], где были построены модели, связывающие акустический и пространственный спектры поверхностных волн. Процесс генерации инфразвука описывается в терминах трехволнового взаимодействия двух поверхностных и одной акустической волны. Основная нелинейность связана с заданием граничных условий для гидродинамических уравнений, в то время как распространение

акустических волн описывается линейным волновым уравнением [12]. Морская поверхность представляется в виде суперпозиции гармонических волн, что в силу центральной предельной теоремы приводит к гауссову распределению возвышений [13, 14].

В данной постановке задачи не учитывается еще ряд нелинейных эффектов в морских волнах. Это слабая нелинейность, вызванная межволновым взаимодействием [15], следствием которой, в частности, являются отклонения распределений возвышений морской поверхности от распределения Гаусса [16]. Другим проявлением нелинейности поверхностных волн является их групповая структура [17, 18], которая эволюционирует в результате баланса дисперсии и нелинейности [19]. В настоящей работе анализируется, как указанные факторы влияют на уровень гидроакустического излучения, создаваемого морской поверхностью.

### Моделирование волнового профиля

Групповую структуру волн, как правило, описывают в виде произведения несущей волны  $\eta(x, t)$  и ее огибающей  $G(x, t)$ . Представим несущую волну и ее огибающую в форме, предложенной в работе [20]. В указанной работе несущая волна имеет асимметричный профиль, т. е. заостренный гребень и плоскую впадину:

$$\eta(x, t) = \exp \left[ -\mu_0 \cos^2 \left( \frac{k_0 x - \omega_0 t}{2} \right) \right], \quad (1)$$

где  $x$  и  $t$  – пространственная и временная координаты; параметр  $\mu_0$  определяет асимметрию несущей волны;  $k_0$  и  $\omega_0$  – волновое число и циклическая частота несущей волны. Предложенная модель имеет ограничение: она не позволяет рассматривать строго симметричную несущую волну. Чтобы проанализировать этот частный случай, необходимо вместо (1) задать гармоническую волну.

Доминантные морские волны, т. е. волны с частотой максимума в волновом спектре, относятся к классу гравитационных. В приближении глубокой воды, когда влиянием дна можно пренебречь, для гравитационных волн выполняется дисперсионное соотношение

$$\omega^2 = gk, \quad (2)$$

где  $g$  – гравитационное ускорение.

Огибающая группы волн задана в подобной (1) форме

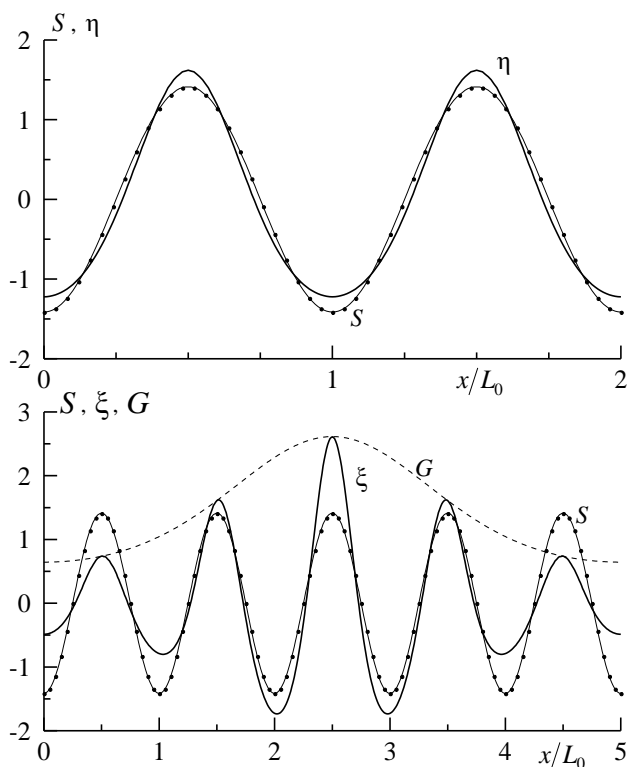
$$G(x, t) = \exp \left[ -\mu_1 \cos^2 \left( \frac{k_0 x - (\omega_0 / 2) t}{2\mu_2} \right) \right],$$

где безразмерные параметры  $\mu_1$  и  $\mu_2$  определяют форму огибающей группы волн и задают число волн в группе. Окончательно профиль модулированной по амплитуде асимметричной волны имеет вид

$$\xi(x,t) = AG(x,t) \left( \eta(x,t) - \overline{\eta(x,t)} \right),$$

где  $A$  – параметр, определяющий высоты волн; черта сверху означает осреднение.

Волновые профили, построенные для гармонической (обозначена индексом  $S$ ) и асимметричной волн, а также для амплитудно-модулированной волны, показаны на рис. 1. Для их сопоставления введена нормировка, в соответствии с которой дисперсии разных типов волн равны единице.



**Р и с. 1.** Профили поверхностных волн, построенные в зависимости от безразмерного расстояния  $x/L_0$

**Fig. 1.** Surface wave profiles constructed depending on the dimensionless distance  $x/L_0$

Распределение возвышений морской поверхности является квазиганссовым [21, 22]. При построении асимметричной волны значение параметра  $\mu_0$  было выбрано таким, чтобы коэффициент асимметрии

$$\lambda_3 = \overline{\xi^3} / \overline{\xi^2}^{3/2}$$

был равен 0,3. Указанное значение  $\lambda_3$  близко к верхней границе диапазона, в котором, согласно данным натурных измерений в разных районах Мирового океана, лежат значения коэффициента асимметрии возвышений поверхности [23–25].

### Эффект асимметрии волнового профиля

Если на морской поверхности две плоские волны одинаковой частоты  $f$  распространяются навстречу друг другу, то возникает стоячая волна, создающая пульсации давления с частотой  $2f$ , которые не затухают с глубиной [5]. Излучение морскими поверхностными волнами незатухающих пульсаций давления происходит, если для двух волн выполняется условие [10]

$$|\vec{k}_1 + \vec{k}_2| \leq (\omega_1 + \omega_2)/C, \quad (3)$$

где  $\vec{k}$  – волновой вектор;  $\omega = 2\pi f$ ; индексы 1 и 2 указывают на соответствие первой и второй волне;  $C$  – скорость звука. Поскольку фазовая скорость поверхностной волны и ее гармоник много меньше скорости звука, условие (3) выполняется, только если векторы  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  близки по модулю и почти противоположны по направлению. Проекция волнового вектора акустической волны на горизонтальную плоскость равна  $\vec{K} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$ . Если  $k_1 = k_2$  и угол между векторами  $180^\circ$ , то акустическая волна распространяется вертикально вниз; если равенство  $k_1 = k_2$  является приблизительным, то она распространяется под наклоном.

Частотный спектр гидроакустического излучения, создаваемого гравитационными волнами, описывается выражением из работы [26]

$$S_p(\omega_p) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{\rho g}{C} \right)^2 \omega_p^3 S_\xi^2(\omega_\xi) I,$$

где частоты акустической  $\omega_p$  и поверхностной  $\omega_\xi$  волн связаны соотношением  $\omega_\xi = \frac{1}{2}\omega_p$ ;  $\rho$  – плотность морской воды;  $S_\xi(\omega_\xi)$  – спектр поверхностных волн;  $I$  – интеграл, определяющий уровень стоячих волн. Интеграл  $I$  задан выражением

$$I = \int \Theta(\varphi) \Theta(\varphi + \pi) d\varphi,$$

где  $\Theta(\varphi)$  – функция углового распределения энергии волн, удовлетворяющая условию нормировки  $\int \Theta(\varphi) d\varphi = 1$ ;  $\varphi$  – азимутальный угол.

Если в волновом поле присутствуют две плоские синусоидальные волны с частотой  $f = \omega/(2\pi)$ , распространяющиеся строго навстречу друг другу и имеющие одинаковые амплитуды  $A$ , то они создают акустическую волну, амплитуда которой [4]

$$P(2f_0) = 8\pi^2 \rho A^2 f_0^2. \quad (4)$$

Для гравитационных волн выражение (4) с точностью до фазового множителя соответствует выражению (6) из работы [10].

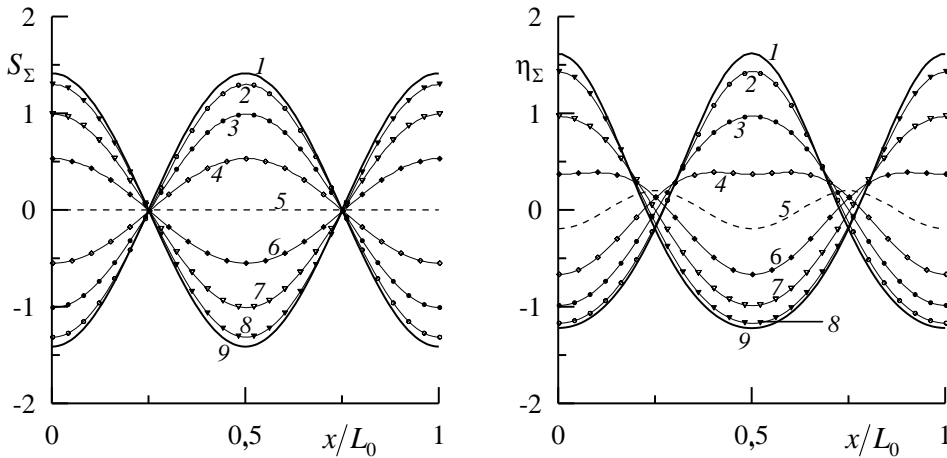
Чтобы оценить, к каким эффектам приводит асимметрия статистического распределения поверхностных волн, рассмотрим ситуацию, когда групповая

структура отсутствует,  $G(x,t) \equiv 1$ . Профили морской поверхности, созданные двумя распространяющимися навстречу друг другу вдоль оси  $x$  симметричными  $S_\Sigma$  и асимметричными  $\eta_\Sigma$  волнами, показаны на рис. 2. Они описываются выражениями

$$S_\Sigma(x,t) = A_S (\cos(\omega_0 t + k_0 x) + \cos(\omega_0 t - k_0 x)),$$

$$\eta_\Sigma(x,t) = A_\eta \left[ \exp \left[ -\mu_0 \cos^2 \left( \frac{\omega_0 t + k_0 x}{2} \right) \right] + \exp \left[ -\mu_0 \cos^2 \left( \frac{\omega_0 t - k_0 x}{2} \right) \right] - 2\overline{\eta(x,t)} \right],$$

где параметры  $A_S$  и  $A_\eta$  определяют амплитуды волн; черта сверху означает осреднение. Кривые 1–9 построены с равным шагом по времени  $\delta t$ , который соответствует изменению фазы несущей волны  $\omega_0 \delta t$  на  $\pi/8$ .



**Р и с. 2.** Изменения профиля суммы двух гармонических волн  $S_\Sigma(x,t)$  и суммы двух асимметричных волн  $\eta_\Sigma(x,t)$ . Кривые 1–9 соответствуют моментам времени, при которых фаза несущей волны меняется на  $\pi/8$

**F i g. 2.** Changes in the profile of a sum of two harmonic waves  $S_\Sigma(x,t)$  and a sum of two asymmetric waves  $\eta_\Sigma(x,t)$ . Curves 1–9 correspond to the time moments at which the carrier wave phase changes to  $\pi/8$

Разложим волновой профиль  $\eta(x,t=0)$  в ряд Фурье. Учитывая, что данная функция является четной, получаем

$$\eta(x,t=0) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nk_0 x),$$

где  $a_n$  – коэффициенты ряда Фурье;  $n$  – номер гармоники. Если амплитуду первой гармоники принять за единицу, то при  $\lambda_3 = 0,3$  амплитуды второй

и третьей пространственных гармоник равны  $a_2 = 0,14$  и  $a_3 = 0,01$  соответственно; при  $\lambda_3 = 0,15$  получаем  $a_2 = 0,07$  и  $a_3 = 0,003$ .

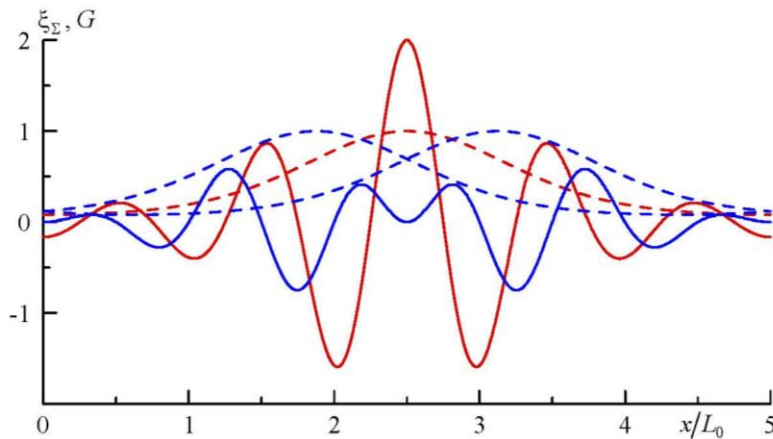
У свободных волн, подчиняющихся дисперсионному соотношению (2), частоты составляющих с волновыми числами  $k_0$ ,  $2k_0$  и  $3k_0$  соотносятся как  $1:\sqrt{2}:\sqrt{3}$ . Для гармоник несущей волны дисперсионное соотношение можно записать в виде

$$\omega_n/k_n = c_0,$$

где  $c_0$  – фазовая скорость несущей волны; частоты первых трех пространственных гармоник соотносятся как 1:2:3. Амплитуда акустической волны, как следует из (4), пропорциональна  $f^2$ . В результате получаем: при  $\lambda_3 = 0,3$  соотношения амплитуд акустических волн  $P(4f_0)/P(2f_0) = 0,56$ ,  $P(6f_0)/P(2f_0) = 0,012$ ; при  $\lambda_3 = 0,15$  соотношения амплитуд  $P(4f_0)/P(2f_0) = 0,28$ ,  $P(6f_0)/P(2f_0) = 0,003$ .

### Эффект групповой структуры

Фундаментальным свойством морских поверхностных волн является их групповая структура, которая выражается в чередовании больших и маленьких волн.



**Р и с. 3.** Волновые профили суммы двух амплитудно-модулированных волн –  $\xi_\Sigma$  (сплошные кривые) и  $G$  (штриховые). Красный цвет соответствует ситуации, когда огибающие совпадают, синий – когда огибающие смещены относительно друг друга

**F i g. 3.** Wave profiles of a sum of two amplitude-modulated waves –  $\xi_\Sigma$  (solid curves) and  $G$  (dashed curves). Red color corresponds to the situation when the envelopes coincide, and blue color – when the envelopes are shifted relative to each other

Групповая скорость волн, которая удовлетворяет дисперсионному соотношению (2), в два раза меньше фазовой скорости, с которой движется гребень волны. Различие фазовой и групповой скоростей приводит к трансформации

мации профиля волны, показанной на рис. 3. Если в момент времени  $t = 0$  максимумы несущей волны и ее огибающей совпадают, то спустя интервал времени  $\delta t = 2\pi/\omega_0$  максимум огибающей приходится на минимум несущей волны, а при  $\delta t = 4\pi/\omega_0$  максимумы несущей волны и ее огибающей вновь совпадают.

Основным параметром, характеризующим групповую структуру поверхностных волн, является фактор групповитости  $GF$ . Если известна форма огибающей, то фактор групповитости можно определить как [27]

$$GF = 1,41\sigma_G/\bar{G},$$

где  $\sigma_G$  – среднеквадратическое отклонение огибающей от ее среднего значения  $\bar{G}$ . Фактор групповитости определяет глубину амплитудной модуляции несущей волны. Для Черного моря значения фактора групповитости в основном лежат в пределах 0,6–0,9 при среднем значении 0,76 [28].

Еще одним параметром, характеризующим групповую структуру волн, является параметр  $N_G$ , определяющий число волн в группе. Его можно задать как

$$N_G = \bar{\omega}/\bar{\Omega},$$

где  $\bar{\omega}$  – средняя частота спектра волн;  $\bar{\Omega}$  – средняя частота спектра огибающей. Значения параметра  $N_G$  для Черного моря в основном лежат в диапазоне 4–8 [28].

Изменения профиля поверхности, происходящие при движении групп волн навстречу друг другу, показаны на рис. 3. Профили построены при  $GF = 0,76$  и  $N_G = 5$ . Рассмотрены две ситуации, когда огибающие распространяющихся навстречу двух групп волн совпадают и когда они смещены относительно друг друга.

Еще одним фактором, приводящим к нелинейному изменению волнового профиля, является различие фазовой  $C_p$  и групповой  $C_g$  скоростей гравитационных волн. На глубокой воде эти скорости, как следует из дисперсионного соотношения (2), равны

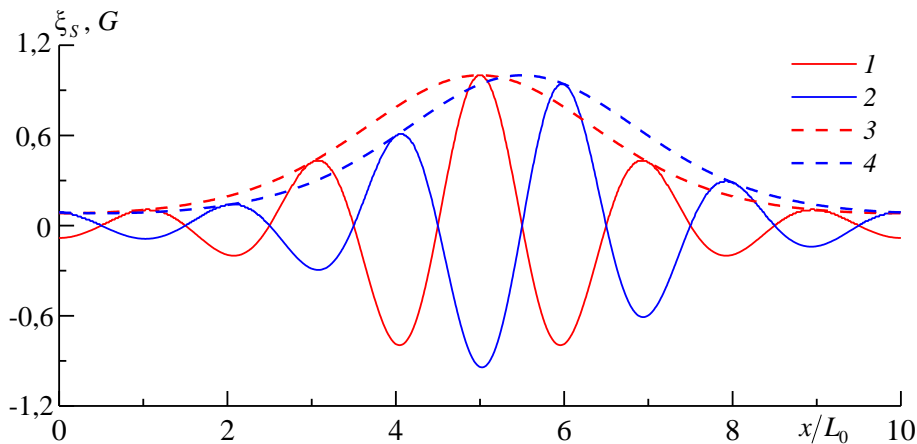
$$C_p = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k}}, \quad C_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{k}}.$$

Изменение волнового профиля показано на рис. 4.

Изменения волнового профиля приводят к изменению уровня второй и третьей гармоник несущей волны. Соответственно меняется соотношение амплитуд акустических волн. Чтобы оценить эти изменения, разложим волновой профиль в ряд Фурье и, оценив амплитуды гармоник поверхностных волн, на основе (4) рассчитаем отношение акустических волн, генерируемых несущей волной и ее второй и третьей гармониками. Отношения  $P(4f_0)/P(2f_0)$ ,  $P(6f_0)/P(2f_0)$ , рассчитанные для минимального, среднего

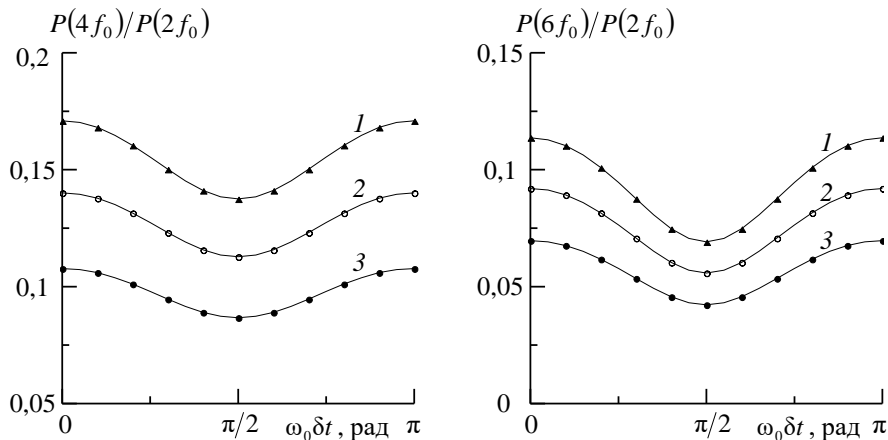


и максимальных значений фактора групповости, показаны на рис. 5. Расчеты проводились при  $N=5$ .



**Р и с. 4.** Изменение профиля амплитудно-модулированной гармонической волны  $\xi_s$ . Кривые 1 и 2 –  $\xi_s$ , построенные со сдвигом во времени  $\delta t = \pi/\omega_0$ ; кривые 3 и 4 –  $G$ , построенные с тем же сдвигом  $\delta t$

**F i g. 4.** Change in the profile of an amplitude-modulated harmonic wave  $\xi_s$ . Curves 1 and 2 –  $\xi_s$  are constructed with a time shift  $\delta t = \pi/\omega_0$ ; curves 3 and 4 –  $G$  are constructed with the same shift  $\delta t$



**Р и с. 5.** Соотношения между амплитудами акустических волн  $P(4f_0)/P(2f_0)$ ,  $P(6f_0)/P(2f_0)$ , генерируемых основной волной и ее гармониками. Кривые 1–3 соответствуют фактору групповости, равному 0, 6, 0,76 и 0,9

**F i g. 5.** Relations between the amplitudes of acoustic waves  $P(4f_0)/P(2f_0)$  and  $P(6f_0)/P(2f_0)$  generated by the main wave and its harmonics. Curves 1–3 correspond to  $G = 0, 6, 0,76$  and  $0,9$

Для амплитудно-модулированной волны уровень гидроакустического излучения, генерируемого ее второй гармоникой, оказался заметно ниже, чем для

асимметричной волны. С увеличением числа волн соотношения  $P(4f_0)/P(2f_0)$ ,  $P(6f_0)/P(2f_0)$  уменьшаются.

Следует подчеркнуть, что полученные здесь оценки являются предварительными. В частности, они не учитывают межгрупповую изменчивость, а также изменения частоты несущей волны внутри группы. Это связано с недостаточной изученностью пространственно-временных характеристик поверхностных волн.

### Заключение

Проведен анализ влияния нелинейных эффектов в поле ветровых волн и зыби на генерацию акустического излучения морской поверхностью. Рассмотрены эффекты, вызванные отклонениями от модели, представляющей поле морских поверхностных волн в виде суперпозиции линейных составляющих. Для анализа использовалась упрощенная модель, в рамках которой предполагалось, что амплитуда гидроакустической волны пропорциональна амплитудам поверхностных волн.

Асимметрия волнового профиля (заостренный гребень и плоская подошва) приводит к появлению гармоник акустической волны на частотах выше частоты несущей волны. При значении коэффициента асимметрии распределения возвышений морской поверхности  $\lambda_3 = 0,3$  соотношения амплитуд акустических волн  $P(4f_0)/P(2f_0) = 0,56$ ,  $P(6f_0)/P(2f_0) = 0,012$ ; при  $\lambda_3 = 0,15$  соотношения амплитуд  $P(4f_0)/P(2f_0) = 0,28$ ,  $P(6f_0)/P(2f_0) = 0,003$ .

Групповая структура оказывает менее заметное влияние на генерацию инфразвука, чем асимметрия несущей волны. Максимальные значения соотношений амплитуд акустических волн, генерируемых второй гармоникой и несущей волной, не превышают уровня 0,17 при факторе групповитости  $GF = 0,9$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wind, waves, and acoustic background levels at Station ALOHA / F. K. Duennebieber [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2012. Vol. 117, iss. C3. C03017. doi:10.1029/2011JC007267
2. Ardhuin F., Herbers T. H. C. Noise generation in the solid Earth, oceans and atmosphere, from nonlinear interacting surface gravity waves in finite depth // Journal of Fluid Mechanics. 2013. Vol. 716. P. 316–348. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.548>
3. Запезалов А. С., Показеев К. В. Моделирование спектра инфразвукового гидроакустического излучения, генерируемого морской поверхностью в штормовых условиях // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 5. С. 550–555. doi:10.7868/S0320791916050208
4. Салин Б. М., Салин М. Б. Расчет характеристик инфразвука, основанный на измерении текущих значений двумерного поля ветрового волнения // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 6. С. 808–815. doi:10.1134/S0320791919060145
5. Longuet-Higgins M. S. A theory of the origin of microseisms // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1950. Vol. 243, iss. 857. P. 1–35. doi:10.1098/rsta.1950.0012
6. Потапов В. А., Табулевич В. Н., Черных Е. Н. Влияние штормовых микросейсмических колебаний на сейсмичность в районе Курильских островов Тихого океана и на озере Байкал // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 8. С. 1411–1419.

7. Ocean wave sources of seismic noise / F. Ardhuin [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C9. C09004. doi:10.1029/2011jc006952
8. Стоячие океанские волны, микросейсмы и инфразвук / В. Н. Табулевич [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2001. Т. 37, № 2. С. 235–244.
9. *Hasselmann K.* A statistical analysis of the generation of microseisms // *Review of Geophysics*. 1963. Vol. 1, iss. 2. P. 177–210. doi:10.1029/RG001i002p00177
10. *Бреховских Л. М.* О генерации звуковых волн в жидкости поверхностными волнами // *Акустический журнал*. 1966. Т. 12, № 3. С. 376–379.
11. *Бреховских Л. М.* Звуковые волны под водой, обусловленные поверхностными волнами в океане // *Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана*. 1966. Т. 2, № 9. С. 970–980.
12. *Наугольных К. А., Рыбак С. А.* О генерации звука при взаимодействии поверхностных волн // *Акустический журнал*. 2003. Т. 49, № 1. С. 100–103.
13. Wave–wave interactions and deep ocean acoustics / Z. Guralnik [et al.] // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. Vol. 134, iss. 4. P. 3161–73. doi:10.1121/1.4818782
14. *Wilson J. D.* Modeling Microseism Generation by Inhomogeneous Ocean Surface Waves in Hurricane Bonnie Using the Non-Linear Wave Equation // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 10. 1624. <https://doi.org/10.3390/rs10101624>
15. *Phillips O. M.* On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 2. Local properties of a random wave field // *Journal of Fluid Mechanics*. 1961. Vol. 11, iss. 1. P. 143–155. doi:10.1017/S0022112061000913
16. *Longuet-Higgins M. S.* The effect of non-linearities on statistical distribution in the theory of sea waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1963. Vol. 17, iss. 3. P. 459–480. doi:10.1017/S0022112063001452
17. *Fedele F., Tayfun M. A.* On nonlinear wave groups and crest statistics // *Journal of Fluid Mechanics*. 2009. Vol. 620. P. 221–239. doi:10.1017/S0022112008004424
18. *Gramstad O., Trulsen K.* Influence of crest and group length on the occurrence of freak waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 582. P. 463–472. doi:10.1017/s0022112007006507.
19. Юэн Г., Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. М. : Мир, 1987. 179 с.
20. *Zapevalov A. S.* Analytical Representation of a Group Structure Sea Surface Waves // *Processes in GeoMedia*. Vol. III. Cham : Springer Geology, 2021. P. 139–145. doi:10.1007/978-3-030-69040-3\_14
21. *Бабанин А. В., Полников В. Г.* О негауссовости ветровых волн // *Морской гидрофизический журнал*. 1994. № 3. С. 79–82.
22. *Запелалов А. С., Большаков А. Н., Смолов В. Е.* Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама-Шарлье // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 3. С. 432–439.
23. *Jha A. K., Winterstein S. R.* Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data // *Proceedings of the 19th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*. ASME, 2000. Paper No. OMAE 00-6125.
24. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M.* Steepness and asymmetry of the largest waves in storm sea states // *Ocean Engineering*. 2004. Vol. 31, iss. 8–9. P. 1147–1167. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2003.10.014>
25. *Запелалов А. С., Гармашов А. В.* Асимметрия и эксцесс поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 4. С. 447–459. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-447-459
26. *Farrell W. E., Munk W.* What do deep sea pressure fluctuations tell about short surface waves? // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, iss. 19. L19605. doi:10.1029/2008GL035008

27. *List J. H.* Wave groupiness variations in the nearshore // *Coastal Engineering*. 1991. Vol. 15, iss. 5–6. P. 475–496. doi:10.1016/0378-3839(91)90024-B
28. *Преснухин А. В.* Групповая структура ветровых волн в Каспийском море // *Литодинамика донной контактной зоны океана : материалы Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора В. В. Лонгинова (14–17 сентября 2009, г. Москва)*. М. : ГЕОС, 2009. С. 31–33.

*Об авторе:*

**Запевалов Александр Сергеевич**, главный научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **Scopus Author ID: 7004433476**, **Web of Science ResearcherID: V-7880-2017**, sevzepter@mail.ru