

УДК 551.463.288

ОТРАЖЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. Н. БОЛЬШАКОВ, А. С. ЗАПЕВАЛОВ, В. Е. СМОЛОВ

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь**Получено 10.12.2006*

Проанализировано влияние отклонений распределения волновых смещений морской поверхности от распределения Гаусса на формирование акустического поля, отраженного от границы океан – атмосфера. Соответствующие волнографические измерения были выполнены на океанографической платформе Морского гидрофизического института НАН Украины. Построены зависимости, описывающие отклонения реального коэффициента отражения от модельного (рассчитанного для гауссовой поверхности). Наибольшее значение абсолютного отклонения зафиксировано при параметрах Рэлея $R \approx 2$. Относительная ошибка быстро растет с увеличением параметра Рэлея. Так, при $R = 1.6$ она достигает 15 %, а при $R \approx 2.5$ может превышать 100 %.

Проаналізовано вплив відхилень розподілу хвильових зсувів морської поверхні від розподілу Гаусса на формування акустичного поля, відбитого від межі океан – атмосфера. Відповідні хвилеграфічні вимірювання були виконані на океанографічній платформі Морського гідрофізичного інституту НАН України. Побудовані залежності, які описують відхилення реального коефіцієнта відбиття від модельного (розрахованого для гауссової поверхні). Найбільше значення абсолютного відхилення зафіксоване при параметрах Релея $R \approx 2$. Відносна похибка швидко зростає зі збільшенням параметра Релея. Так, при $R = 1.6$ вона сягає 15 %, а при $R \approx 2.5$ може перевищувати 100 %.

The paper deals with analyzing the effect of the deviation of the sea surface wave distribution from Gaussian on formation of the acoustic field reflected at from surface ocean – atmosphere. The corresponding wave recording measurements have been carried out at the oceanographic platform of the Marine Hydrophysical Institute of NAS of Ukraine. The dependencies, describing the deviations of the real reflection factor from the model one (calculated for the Gaussian surface), have been developed. The maximal value of absolute deviation was recorded at the Rayleigh parameters of $R \approx 2$. The relative error increases rapidly with the Rayleigh parameter. So, at $R = 1.6$ it is as much as 15 %, and may exceed 100 % at $R \approx 2.5$.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы при анализе взаимодействия акустических и электромагнитных волн с морской поверхностью большое внимание уделяется исследованию эффектов, обусловленных нелинейностью поверхностных волн, что приводит к отклонению распределений уклонов и возвышений морской поверхности от распределения Гаусса [1]. Физические механизмы, приводящие к указанному отклонению, различны. Для уклонов, дисперсия которых формируется преимущественно за счет коротких поверхностных волн, это модуляция амплитуд коротких волн вдоль профиля длинной волны [2, 3], а также генерация паразитной капиллярной ряби на гребнях длинных волн [4]. Для возвышений морской поверхности, плотность вероятностей которых определяют длинные волны, отклонения от распределения Гаусса связаны с асимметрией переднего и заднего склонов гребней доминантных волн, а также их заостренностью [5, 6].

При падении акустической волны на морскую поверхность под несколькими углами среднее поле, сформировавшееся в результате отражения от крупномасштабных неровностей, может быть

рассчитано в приближении Кирхгофа. В этом случае коэффициент отражения однозначно определяется одномерной плотностью вероятностей смещений морской поверхности и параметром Рэлея. Нелинейные эффекты в поле поверхностных волн приводят к отклонению статистических моментов распределения смещений поверхности от значений, соответствующих распределению Гаусса, и соответственно изменяют коэффициент отражения [7].

Целью настоящей работы является анализ отклонений распределения смещений морской поверхности от распределения Гаусса в разных метеорологических ситуациях, а также оценка влияния этих отклонений на отражение акустических волн от крупномасштабных неоднородностей морской поверхности.

1. КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ

Введем следующие обозначения: K – волновое число акустической волны; ξ – отклонение взволнованной поверхности от среднего уровня; ρ – радиус корреляции взволнованной поверхности; θ – угол падения акустической волны. Будем рассматривать случай, когда отражение происходит от

крупномасштабных неоднородностей морской поверхности, для которых выполняется условие

$$K\rho \gg 1. \quad (1)$$

Полагаем, что акустическое зондирование происходит под несколькими углами:

$$K\rho \cos^3 \theta \gg 1. \quad (2)$$

В этом случае коэффициент отражения в приближении Кирхгофа определяется характеристической функцией [7]

$$v = \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) \exp(-2iK\xi \cos \theta) d\xi, \quad (3)$$

где $P(\xi)$ – одномерная плотность вероятностей волновых смещений поверхности.

Распределение волновых смещений морской поверхности относится к классу квазигансовых. Экспериментальные исследования показывают, что плотность вероятностей $P(\xi)$ в этом случае можно описать с помощью аппроксимации, построенной на основе ряда Грама – Шарлье [8]:

$$P(\xi) = \frac{\exp\left(-\xi^2 / \left(2\overline{\xi^2}\right)\right)}{\sqrt{2\pi \overline{\xi^2}}} \left[1 + \frac{A}{6} H_3 + \frac{E}{24} H_4\right], \quad (4)$$

где $\overline{\xi^2}$, A и E – дисперсия, асимметрия и эксцесс распределения смещений поверхности соответственно; H_i – полиномы Чебышева – Эрмита i -го порядка. Подставляя ряд (4) в соотношение (3), получаем

$$v = \exp\left(-\frac{R^2}{2}\right) \left[1 + I\frac{A}{6}R^3 + \frac{E}{24}R^4\right], \quad (5)$$

где $R = 2K\sqrt{\overline{\xi^2}} \cos \theta$ – параметр Рэля. Из формул (3)–(5) следует, что точность оценки коэффициента отражения целиком зависит от точности определения статистических моментов волновых смещений морской поверхности.

2. АСИММЕТРИЯ И ЭКСЦЕСС СМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для дальнейшего анализа воспользуемся данными волнографических измерений, полученных с помощью струнных резистивных волнографов [9]. Измерения проводились на океанографической платформе Морского гидрофизического института НАН Украины, расположенной в Черном море

у Южного берега Крыма. Глубина моря в месте установки платформы составляет около 30 м, что соответствует условию “глубокой воды”, если принять во внимание характерные для Черного моря параметры доминантных ветровых волн и зыби.

Продолжительность одного сеанса волнографических измерений, по которому рассчитывались статистические характеристики поверхностных волн, составляла 10 мин. Синхронно измерялась средняя за указанный период скорость ветра, для чего использовался анемометр типа ГМ-36, установленный на высоте 3.4 м.

Отметим, что поскольку цель настоящей работы – анализ эффектов нелинейности поверхностных волн при взаимодействии акустического излучения с морской поверхностью в разных метеорологических ситуациях, то отбор по “чистоте” метеоусловий (устойчивости ветра по скорости и направлению, стадии развития волнения, присутствию зыби и т. д.) не проводился. Поэтому полученные данные можно рассматривать как репрезентативную выборку реальных волновых ситуаций, характерных для района измерений.

В качестве возможных факторов, влияющих на отклонения асимметрии и эксцесса от значений, соответствующих распределению Гаусса, рассмотрим скорость ветра W , средний уклон доминантной волны $\varepsilon = \sqrt{\overline{\xi^2}}/\lambda_m$, а также параметр, характеризующий стадию развития волнения $\tau = W/C_m$. Здесь λ_m и C_m – длина и фазовая скорость доминантных волн. Параметры доминантных составляющих волнового поля λ_m и C_m рассчитываются по дисперсионному уравнению для гравитационных волн на глубокой воде:

$$\omega^2 = gk, \quad (6)$$

где ω – циклическая частота; k – волновое число.

Для оценок асимметрии и эксцесса, полученных в разных гидрометеорологических ситуациях, характерен значительный разброс. Среднее значение асимметрии по всей серии измерений было 0.04 при среднеквадратическом отклонении 0.13. Для эксцесса эти оценки равны 0.07 и 0.25 соответственно. Из графиков, приведенных на рис. 1, видно, что оценки асимметрии A возвышения поверхности существенно зависят от параметров W , ε и τ . В то же время, для эксцесса E эти зависимости выражены значительно слабее.

Уровень статистической связи между статистическими моментами A , E и параметрами W , ε , τ определяют приведенные в таблице значения коэффициента корреляции между ними. Оценим надежность оценок коэффициента корреля-

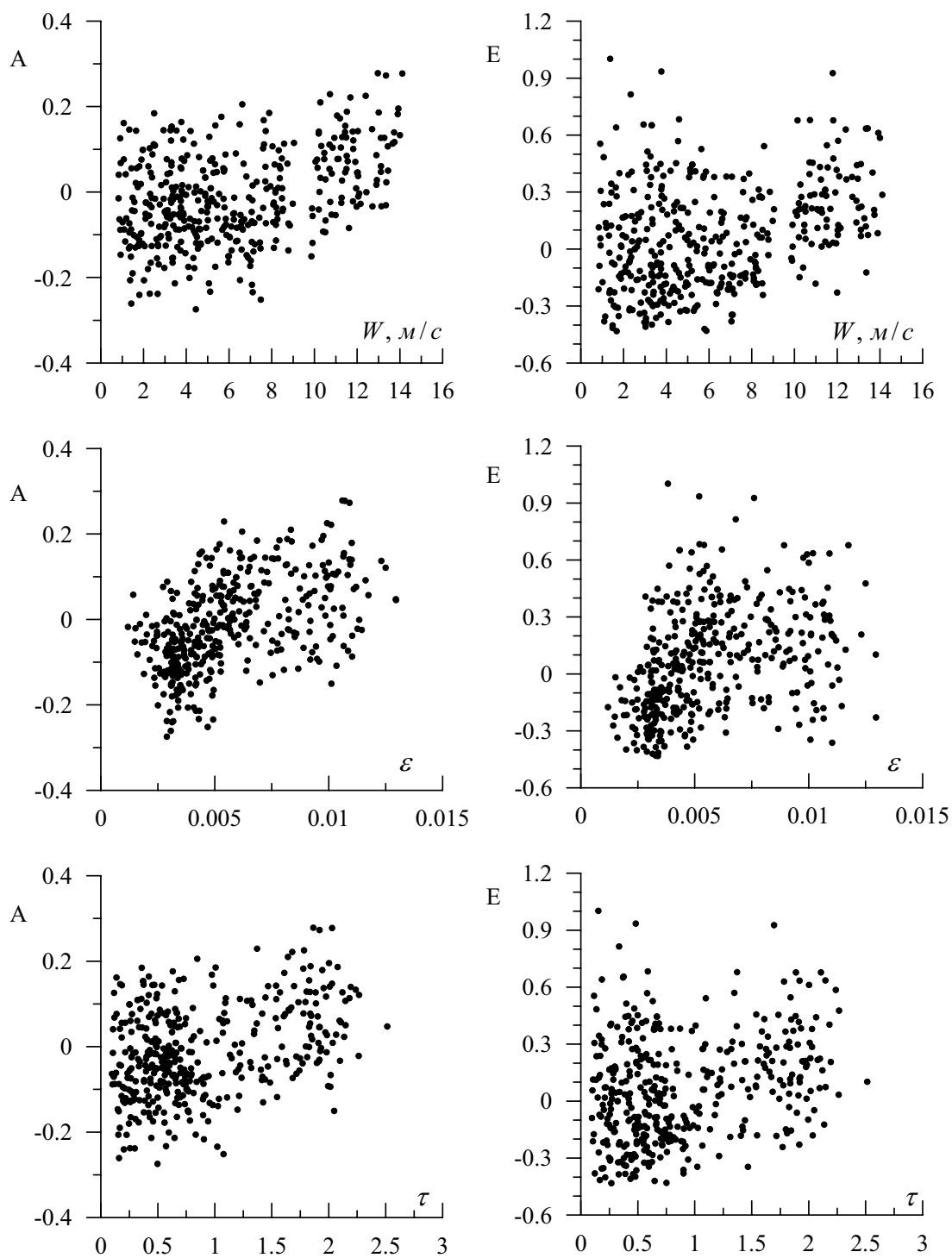


Рис. 1. Зависимости асимметрии A и эксцесса E от скорости ветра W , уклона доминантной волны ε , стадии развития волнения τ

Таблица. Коэффициенты корреляции асимметрии и эксцесса смещений морской поверхности с параметрами, определяющими состояние поля поверхностных волн

	W	ε	τ
A	0.54	0.55	0.61
E	0.22	0.25	0.19

ции. При достаточно большом числе измерений N (в нашем случае $N=599$) неизвестное достоверное значение коэффициента корреляции для R попадает в доверительный интервал полушириной $\Delta = \beta(1-r^2)/\sqrt{N}$ с вероятностью δ

$$\delta = P \left\{ r - \beta \frac{1-r^2}{\sqrt{N}} < R < r + \beta \frac{1-r^2}{\sqrt{N}} \right\} \approx 2\Phi_0(\beta), \quad (7)$$

где

$$\Phi_0(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Из выражения (7) следует, что полуширина доверительного интервала для нулевого уровня корреляции при достоверности 99.5 % равна $\Delta = 0.11$. Очевидно, что все оценки коэффициентов корреляции, приведенные в таблице, превышают эту величину.

3. ОТКЛОНЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОТ МОДЕЛЬНЫХ

В дальнейшем под модельными оценками коэффициента отражения будем подразумевать его значения, полученные для гауссовой поверхности (обозначим их как v_G). Реальными оценками коэффициента отражения (v_E) являются оценки, полученные для эмпирических значений моментов A и E . Модельная зависимость модуля коэффициента отражения от параметра Рэлея показана на рис. 2, а. Здесь же приведены максимальные и минимальные значения его реальных оценок ($\max[|v_E(R)|]$ и $\min[|v_E(R)|]$ соответственно).

Среднеквадратические отклонения реальных значений коэффициента отражения от модельных

$$\sigma(R) = \sqrt{[v_G(R) - |v_E(R)|]^2} \quad (8)$$

приведены на рис. 2, б. В формуле (8) черта сверху означает осреднение. Максимальные значения

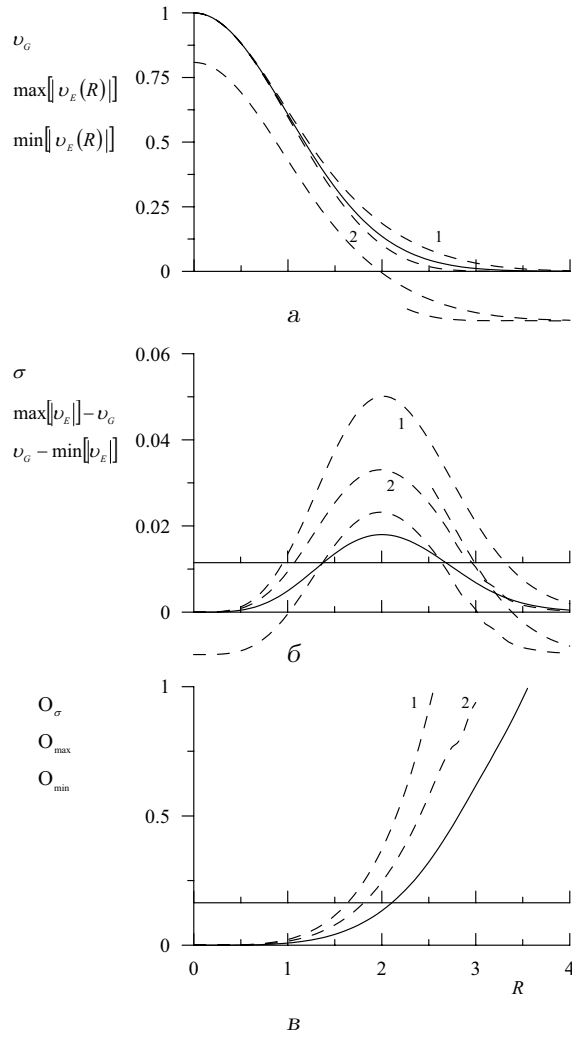


Рис. 2. Зависимости характеристик коэффициента отражения от параметра Рэлея

$\sigma(R)$ наблюдаются при $R \approx 2$. Из графика также следует, что отклонения в сторону больших значений $\max[|v_E(R)|] - v_G$ превышают отклонения в сторону меньших $v_G - \min[|v_E(R)|]$.

Поскольку коэффициент отражения является быстро спадающей функцией параметра Рэлея, то, кроме абсолютных отклонений, необходимо оценивать и относительные –

$$O_\sigma(R) = \frac{\sqrt{[v_G(R) - |v_E(R)|]^2}}{v_G(R)},$$

$$O_{\max}(R) = \frac{\max[|v_E(R)|] - v_G}{v_G(R)}, \quad (9)$$

$$O_{\min}(R) = \frac{v_G - \min[|v_E(R)|]}{v_G(R)}.$$

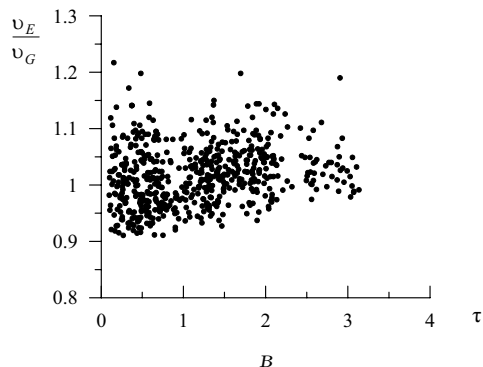
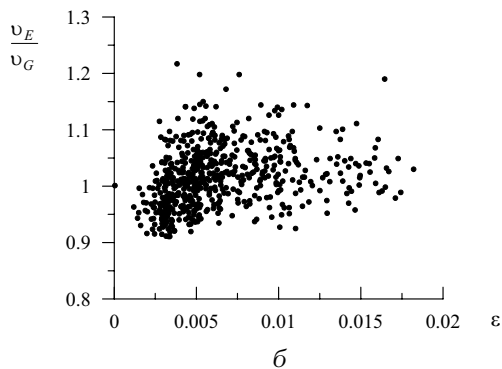
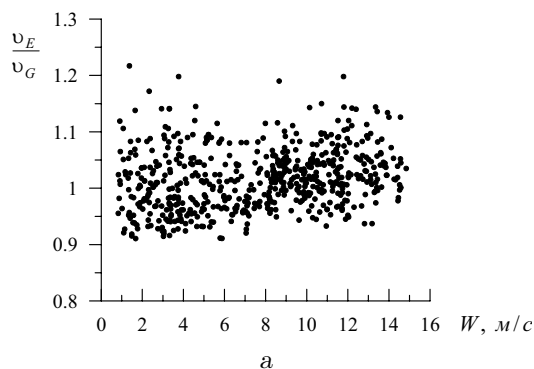


Рис. 3. Зависимости параметра v_E/v_G (при $R=1.5$) от скорости ветра W , уклона доминантной волны ε , стадии развития волнения τ

С ростом параметра R относительная ошибка $O_\sigma(R)$ растет. Из рис. 2, в видно, что уже при $R \approx 2.5$ она может достигать 100 %. Что же касается 5 %-го уровня, то он оказывается превышенным, если $R > 1.6$. При этом модельная оценка коэффициента отражения будет $v_G(R=1.6) = 0.28$. Максимальная относительная ошибка $O_{\max}(R)$ при том же значении параметра Рэлея может достигать 15 %.

Учитывая отмеченные зависимости асимметрии и эксцесса смещений поверхности от W , ε и τ , можно было ожидать, что от них будет зависеть

и относительное отклонение реальной величины коэффициента отражения от модельной v_E/v_G . Однако расчеты по экспериментальным оценкам статистических моментов A и E показывают, что относительные отклонения v_E/v_G слабо связаны с этими параметрами (рис. 3) – оценки соответствующих коэффициентов корреляции лежат в пределах $0.2 \div 0.3$. Приведенные графики построены для параметра Рэлея, равного 1.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ изменчивости коэффициента отражения акустических волн от крупномасштабных неоднородностей на морской поверхности в разных метеорологических ситуациях. На основе данных натурных измерений статистических моментов волновых смещений морской поверхности показано, что наибольшее абсолютное отклонение реального коэффициента отражения акустических волн v_E от модельного v_G , рассчитанного для гауссовой поверхности, наблюдается при параметрах Рэлея $R \approx 2$. Относительная ошибка отклонения реального коэффициента отражения от модельного быстро растет с ростом параметра Рэлея. При $R=1.6$ относительная ошибка может достигать 15 %, а при $R \approx 2.5$ – превышать 100 %.

Отношение реального коэффициента отражения и модельного v_E/v_G слабо связаны со скоростью ветра, средним уклоном доминантных волн и стадией развития волнения, определяющими характер поля морских поверхностных волн. Оценки коэффициентов корреляции между значениями v_E/v_G и указанными параметрами лежат в пределах $0.2 \div 0.3$.

1. Plant W. J., Dahl P. H., Keller W. C. Microwave and acoustic scattering from parasitic capillary waves // J. Geophys. Resch.– 1999.– **104**.– P. 25853–25866.
2. Longuet-Higgins M. S. On the skewness of sea-surface slopes // J. Phys. Oceanogr.– 1982.– **12**.– P. 1283–1291.
3. Запелалов А. С., Ратнер Ю. Б. Аналитическая модель плотности вероятностей уклонов морской поверхности // Мор. гидрофиз. ж.– 2003.– N 1.– С. 3–17.
4. Plant W. A new interpretation of sea surface slope probability functions // J. Geophys. Resch.– 2003.– **108**, N C9.– P. 3295–3298.
5. Huang N. E., Long S. R. An experimental study of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves // J. Fluid Mech.– 1980.– **101**, Pt 1.– P. 179–200.
6. Бабанин А. В., Полников В. Г. О негауссовости ветровых волн // Мор. гидрофиз. ж.– 1994.– N 3.– С. 79–82.

7. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Акустика океана // Океанология. Сер. Физика океана.– 1978.– 2.– С. 49–146.
8. Kinsman B. Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface.– New York: Prentice Hall, 1965.– 676 p.
9. Смолов В. Е., Запезалов А. С. Дифференциальный волнограф для исследования высокочастотных составляющих поля морских ветровых волн // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАНУ, 2001.– С. 57–61.