АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 5, с. 687–694

АКУСТИКА ОКЕАНА, ГИДРОАКУСТИКА

УДК 551.463.26

К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2007 г. А. С. Запевалов

Морской гидрофизический институт НАН Украины
99038 Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: sevzepter@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.06 г.

Анализируется влияние на коэффициент рассеяния высокочастотного звука наблюдаемых в натурных условиях отклонений поля поверхностных волн от модели изотропной гауссовой поверхности. Анализ проводится на основе данных натурных измерений уклонов морской поверхности, проведенных на Черном море с помощью двумерного лазерного уклономера. Показано, что влияние анизотропии поля поверхностных волн на величину коэффициента рассеяния мало при малых углах обучения и быстро усиливается с их ростом. Наблюдаемые отклонения статистических моментов уклонов морской поверхности от величин, соответствующих распределению Гаусса приводят к изменениям значений коэффициента рассеяния в пределах ±20%.

PACS: 43.30.+m, 92.10.Vz, 43.28.Dm

ВВЕДЕНИЕ

Основные положения теория рассеяния акустических волн на морской поверхности были сформулированы еще в начале 70-х годов [1–3]. Однако, несмотря на довольно большое количество работ, выполненных в последующий период, задача далека от окончательного решения. Причина в том, что необходимо учитывать большое число факторов, а также в том, что существующие в настоящее время модели морской поверхности нуждаются в уточнении.

Как правило, при анализе рассеяния высокочастотных звуковых волн на морской поверхности граница раздела представляется в виде случайной движущейся изотропной гауссовой поверхности [4, 5]. В то же время натурные исследования, направленные на изучение статистических характеристик уклонов морской поверхности, показывают, что существуют заметные отклонения статистических моментов уклонов от значений, соответствующих распределению Гаусса [6, 7]. Также существуют заметные отклонения поля высокочастотных ветровых волн от модели изотропной поверхности. Наиболее узконаправленным угловое распределение энергии ветровых волн является на масштабах длин доминантных волн, соответственно на этих масштабах анизотропия уклонов морской поверхности максимальна [8]. С уменьшением длин ветровых волн их пространственный спектр стремится к изотропному, но, как следует из результатов наших измерений двумерным лазерным уклономером, изотропия не наблюдается даже на масштабах, приближающихся к капиллярным волнам [9].

Целью настоящей работы является анализ влияния на коэффициент рассеяния высокочастотного звука наблюдаемых в натурных условиях отклонений поля поверхностных волн от модели изотропной гауссовой поверхности.

КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ

Введем обозначения $K = 2\pi/\Lambda$ – волновое число акустической волны; θ – угол падения акустической волны; ξ и $\overline{\xi^2}$ – возвышение поверхности и его дисперсия; ξ_x и ξ_y уклоны поверхности в ортогональных направлениях. В принятом обозначении характеризующий вертикальный масштаб неровностей рассеивающей поверхности параметр Релея имеет вид

$$R = 2K\sqrt{\overline{\xi^2}}\cos\theta. \tag{1}$$

Будем рассматривать случай рассеяния волн, соответствующих большим числам Релея ($R \gg 1$). В этом случае в дальней зоне интенсивность рассеянной волны I связана с интенсивностью рассеиваемой волны I_0 выражением [10],

$$I = I_0\frac{S}{L^2}G(\theta, \varphi), \tag{2}$$

где S – площадь облучаемой площадки; L – расстояние от центра площадки до точки приема; $G(\theta, \varphi)$ – коэффициент рассеяния. Здесь и далее индекс 0 соответствует падающей волне,

$$G(\theta, \varphi) = \left[\frac{1 + \cos\theta\cos\theta_0 - \sin\theta\sin\theta_0\cos(\varphi - \varphi_0)}{(\cos\theta + \cos\theta_0)^2}\right] P_{\xi_x\xi_y}\left(\frac{\sin\theta_0\cos\varphi_0 - \sin\theta\cos\varphi}{\cos\theta + \cos\theta_0}, \frac{\sin\theta_0\sin\varphi_0 - \sin\theta\sin\varphi}{\cos\theta + \cos\theta_0}\right) \quad (3)$$

φ – азимутальный угол; $P_{\xi_x\xi_y}$ – двумерная плотность вероятностей уклонов поверхности.

Если сориентировать оси координат вдоль и поперек направления ветра, то корреляция между компонентами уклонов ξ_x и ξ_y обращается в нуль и двумерную плотность вероятностей можно представить в виде

$$P_{\xi_x\xi_y} = P_{\xi_x} P_{\xi_y}, \quad (4)$$

где P_{ξ_y} и P_{ξ_x} – одномерные плотности вероятностей компонентов уклонов.

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Введем обозначения: ξ_u – уклон морской поверхности вдоль направления ветра; ξ_c – уклон в поперечном направлении; $\overline{\xi_u^2}$ и $\overline{\xi_c^2}$ – дисперсии компонентов уклонов, указанных нижними индексами. В случае, если плотности вероятностей P_{ξ_u} и P_{ξ_c} соответствуют распределению Гаусса и если волновое поле является изотропным $\overline{\xi_u^2} = \overline{\xi_c^2} = \overline{\xi_{is}^2}$, то коэффициент отражения равен

$$G_{NI}(\theta, \varphi) = \frac{F^2}{2\pi\overline{\xi_{is}^2}} \times \exp\left[-\frac{\sin^2\theta + \sin^2\theta_0 - 2\sin\theta\sin\theta_0\cos(\varphi - \varphi_0)}{2\overline{\xi_{is}^2}(\cos\theta + \cos\theta_0)^2}\right], \quad (5)$$

где

$$F = \frac{1 + \cos\theta\cos\theta_0 - \sin\theta\sin\theta_0(\varphi - \varphi_0)}{(\cos\theta + \cos\theta_0)^2}. \quad (6)$$

Проанализируем, как наблюдаемые в натурных условиях реальные отклонения от распределения Гаусса распределений уклонов морской поверхности и их анизотропия видоизменяют коэффициент рассеяния $G(\theta, \varphi)$. Анализ начнем с исследования эффекта влияния анизотропии углового распределения волновой энергии. В качестве параметра, характеризующего анизотропию, можно использовать введенный Лонге-Хиггинсом [11] показатель трехмерности волнового поля

$$\gamma = \sqrt{\overline{\xi_c^2}/\overline{\xi_u^2}}. \quad (7)$$

Для волн с длинным гребнем параметр γ приближается к нулю, для волн с короткими гребнями он приближается к единице.

На практике применяются и другие, подобные показателю трехмерности характеристики, описывающие анизотропию уклонов. В работах [12, 13] использовался параметр $\gamma' = \overline{\xi_u^2}/\overline{\xi_c^2}$, связанный с γ простым алгебраическим соотношением. Данные, приведенные в указанных работах, свидетельствуют о том, что зависимость параметра γ' от скорости ветра отсутствует. Среднее значение параметра γ' равно 1.42 , что соответствует $\gamma = 0.84$.

Для дальнейшего анализа воспользуемся данными измерений статистических характеристик уклонов морской поверхности, полученными с помощью двумерного лазерного уклономера. Измерения проводились на океанографической платформе Морского гидрофизического института НАН Украины. Аппаратура, методики измерений и зависимости статистических характеристики уклонов от метеоусловий подробно описаны в работах [6, 7, 8].

Проведенные в натурных условиях исследования показывают, что параметр γ слабо зависит от скорости ветра (см. рис. 1). Обращает на себя внимание большой разброс эмпирических оценок показателя трехмерности. Оценки параметра γ меняются в пределах от 0.64 до 0.98, при среднем значении 0.81. Коэффициент корреляции между параметрами γ и W, рассчитанный для диапазона скоростей ветра от 0.5 м/с до 14.3 м/с по данным 276 сеансам измерений, равен 0.2. Положительный знак корреляции указывает на то, что с ростом скорости ветра значение параметра γ в среднем растет, т.е. значения дисперсии продольной и поперечной компонент уклонов сближаются.

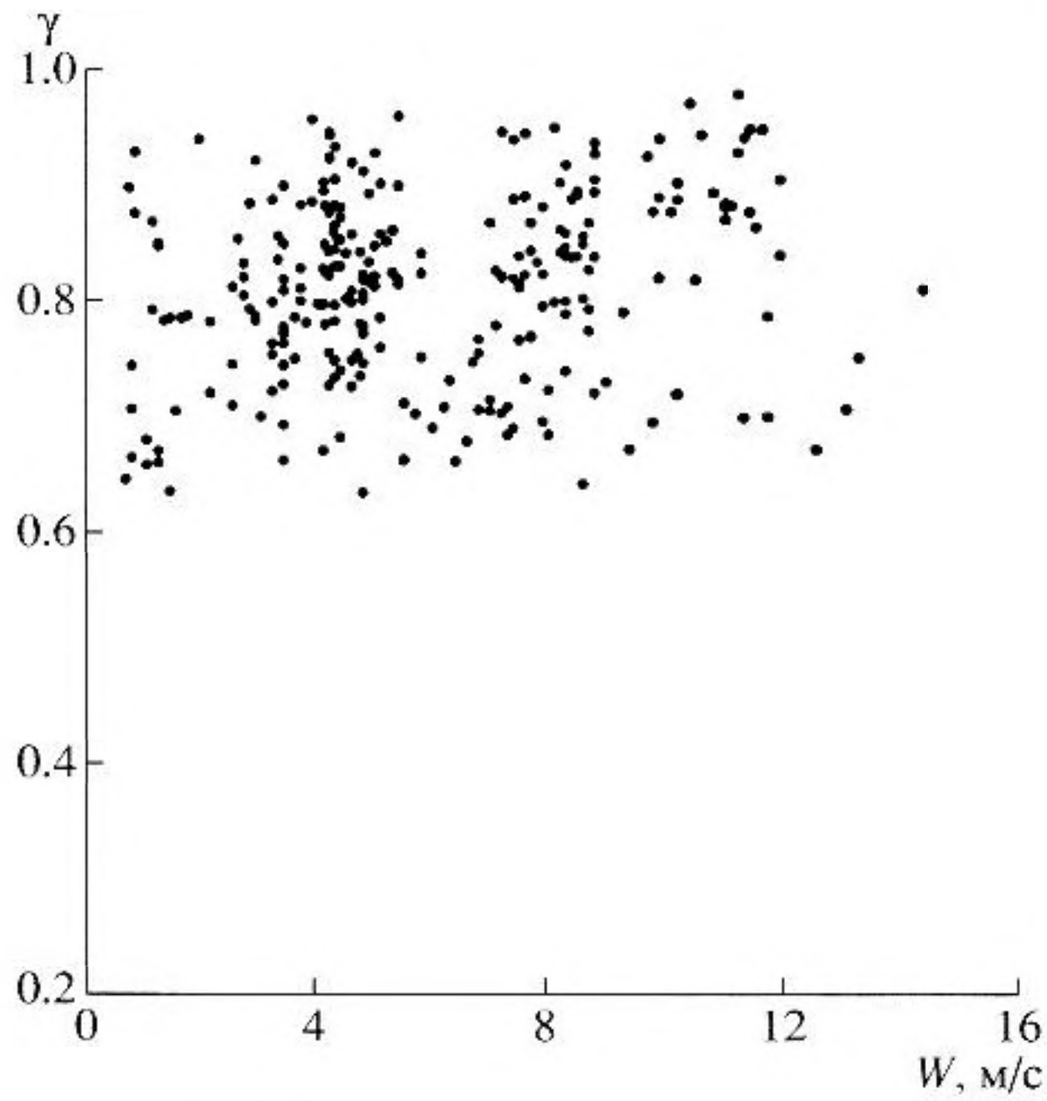

Рис. 1. Зависимость показателя трехмерности волнового поля γ от скорости ветра W.

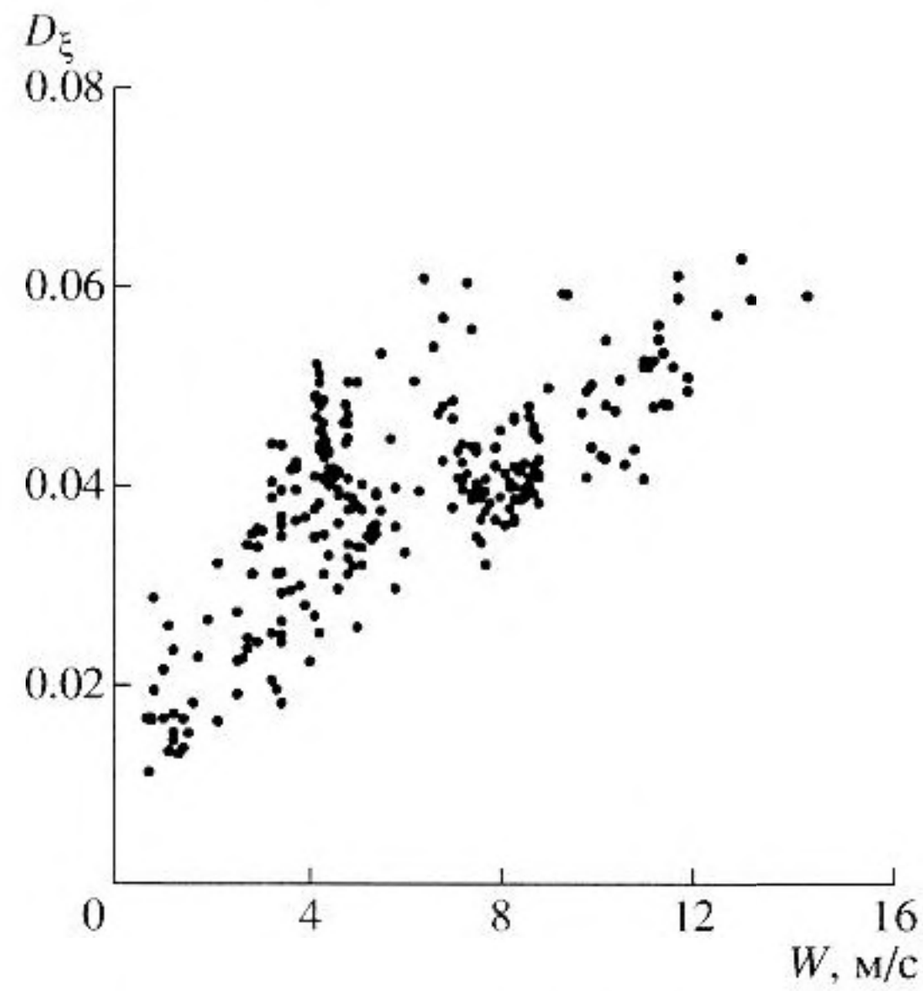

Рис. 2. Зависимость дисперсии уклонов D_ξ от скорости ветра W.

В распределении полной дисперсии уклонов морской поверхности

$$D_\xi = \overline{\xi_c^2} + \overline{\xi_u^2} \tag{8}$$

наблюдается явная зависимость от скорости ветра (рис. 2). Наиболее быстрый рост значений D_ξ при усилении ветра имеет место при $W \le 4$ м/с. Как и для показателя трехмерности γ для дисперсии D_ξ характерен значительный разброс при фиксированных скоростях ветра.

Из (7) и (8) следует, что $\overline{\xi_u^2} = D_\xi/(1 + \gamma^2)$, $\overline{\xi_c^2} = D_\xi/(1 + \gamma^{-2})$, и коэффициент рассеяния анизотропного гауссова волнового поля можно представить в форме

$$G_{NA}(\theta, \varphi) = \frac{F^2\sqrt{(1+\gamma^2)(1+\gamma^{-2})}}{2\pi D_\xi} \times$$
$$\times \exp\left[-\frac{(1+\gamma^2)(\sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0)^2}{2D_\xi(\cos\theta + \cos\theta_2)^2}\right] \times$$
$$\times \exp\left[-\frac{(1+\gamma^{-2})(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0)^2}{2D_\xi(\cos\theta + \cos\theta_0)^2}\right].$$

В качестве характеристики, описывающей влияние трехмерности поля поверхностных волн на рассеянное акустическое поле, можно использовать отношение коэффициентов рассеяния, рассчитанных с учетом $G_{NA}(\theta, \varphi)$ и без учета $G_{NI}(\theta, \varphi)$ анизотропии волнового поля,

Таблица 1. Влияние анизотропии уклонов морской поверхности на оценки коэффициента рассеяния

№	θ_0, град	φ_0, град	φ_0, град	$\overline{\chi_1}$, СКО(χ_1)	min(χ_1), max(χ_1)
1	0	–	–	1.028, 0.024	1.000, 1.104
2	5	0	0	1.067, 0.047	1.003, 1.263
3	10	0	0	1.023, 0.155	1.013, 1.974
5	20	0	0	2.225, 1.689	1.055, 13.89
4	15	0	0	1.507, 0.486	1.002, 4.312
6	5	0	90	1.021, 0.018	1.000, 1.086
7	10	0	90	1.001, 0.018	0.897, 1.037
8	15	0	90	0.968, 0.048	0.693, 1.000
9	20	0	90	0.923, 0.089	0.468, 1.000

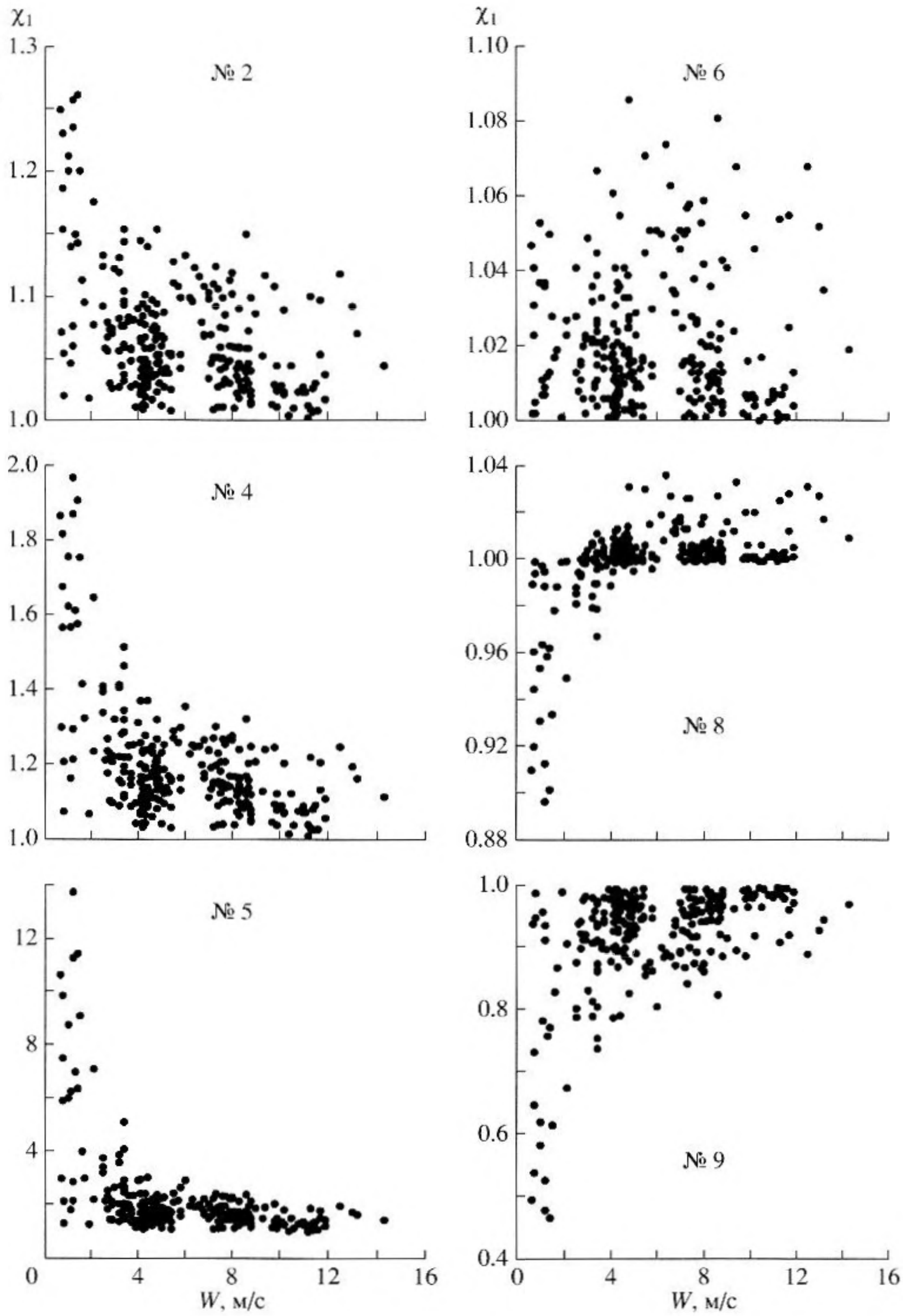

Рис. 3. Влияние анизотропии поля поверхностных волн на коэффициент рассеяния (номерами на каждом фрагменте указано соответствие с табл. 1).

$$\chi_1(\theta, \varphi) = G_{NA}(\theta, \varphi)/G_{NI}(\theta, \varphi). \quad (9)$$

Статистические характеристики параметра χ_1, определенные для разных углов падения и рассеяния, представлены в табл. 1. Здесь $\overline{\chi_1}$ – среднее по всему диапазону скоростей ветра значение параметра χ_1; СКО(χ_1) – среднеквадратическое отклонение от него; min(χ_1) и max(χ_1) – параметры, которые определяют, в каких пределах меняются оценки χ_1. Из табл. 1 видно, что с ростом угла θ_0 влияние анизотропии уклонов морской поверхности на величину коэффициента рассеяния растет.

Таблица 2. Влияние отклонений статистических моментов уклонов морской поверхности от значений, соответствующих распределению Гаусса, на оценки коэффициента рассеяния

№	θ_0, град	φ_0, град	φ_0, град	$\overline{\chi_2}$, СКО(χ_1)	min(χ_2), max(χ_2)
1	0	–	–	1.063, 0.053	0.928, 1.235
2	5	0	0	1.025, 0.061	0.892, 1.221
3	10	0	0	0.974, 0.073	0.769, 1.227
4	15	0	0	0.979, 0.111	0.372, 1.505
6	5	0	90	1.045, 0.058	0.913, 1.286
7	10	0	90	1.001, 0.062	0.832, 1.200
8	15	0	90	0.938, 0.076	0.706, 1.132

Наиболее сильно влияние анизотропии проявляется при слабых ветрах (см. рис. 3), когда значения угла θ_0 значительно превышают углы локальных наклонов поверхности. Если исключить область низких скоростей ветра, то разброс оценок χ_1 значительно уменьшается. В частности, для скоростей ветра выше 4 м/с, при углах, соответствующих позициям № 5 и 9 в табл. 1, $\overline{\chi_1}$ = = 1.740 и 0.948, СКО(χ_1) = 0.411 и 0.045 соответственно, т.е. разброс оценок χ_1 снижается в несколько раз.

ЭФФЕКТЫ КВАЗИГАУССОВОГО ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЙ УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Распределение уклонов морской поверхности относится к классу квазигауссовых распределений. Для аппроксимации плотности вероятностей подобных распределений используются модели, построенные на основе ряда Грама-Шарлье, коэффициенты которого рассчитываются с помощью эмпирических оценок статистических моментов. В морских условиях обычно определяют моменты уклонов до четвертого порядка включительно.

После введения нормировок $\tilde{\xi}_u = \xi_u/\sqrt{\overline{\xi_{is}^2}}$ и $\tilde{\xi}_c = \xi_c/\sqrt{\overline{\xi_{is}^2}}$ распределения компонентов уклонов можно представить в форме [7]:

$$P_{\xi_u}(\tilde{\xi}_u) = P_N(\tilde{\xi}_u)\left[1 + \frac{1}{6}A_u H_3(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24}E_u H_4(\tilde{\xi}_u)\right], \quad (10)$$

$$P_c(\tilde{\xi}_c) = P_N(\tilde{\xi}_c)\left[1 + \frac{1}{6}A_c H_3(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{24}E_c H_4(\tilde{\xi}_c)\right]. \quad (11)$$

где P_N – одномерная плотность вероятностей распределения Гаусса; A и E – асимметрия и эксцесс соответствующего нижнему индексу компонента уклонов; $H_3(x) = x^3 - 3x$ и $H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3$ – ортогональные полиномы Чебышева-Эрмита третьего и четвертого порядка. Эмпирические оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса представлены на рис. 4.

Для оценки влияния отклонения распределения уклонов от распределения Гаусса на величину коэффициента рассеяния аналогично (9), введем функцию

$$\chi_2(\theta, \varphi) = G_{NK}(\theta, \varphi)/G_{NI}(\theta, \varphi),$$

где $G_{NK}(\theta, \varphi)$ – коэффициент рассеяния на изотропной квазигауссовой поверхности.

Учитывая (10), (11) функцию $\chi_2(\theta, \varphi)$ можно представить в виде

$$\chi_2(\theta, \varphi) = \left[1 + \frac{A_u}{6}H_3(x_u) + \frac{E_u}{24}H_4(x_u)\right]\times$$
$$\times\left[1 + \frac{A_c}{6}H_3(x_c) + \frac{E_c}{24}H_4(x_c)\right],$$

где

$$x_u = \frac{\sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0}{(\cos\theta + \cos\theta_0)\sqrt{\overline{\xi_{is}^2}}},$$

$$x_c = \frac{\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0}{(\cos\theta + \cos\theta_0)\sqrt{\overline{\xi_{is}^2}}}.$$

Как показано в [7], аппроксимации плотности вероятностей, построенные с использованием первых пяти членов ряда Грама-Шарлье, могут приводить к появлению отрицательных значений. Поэтому в настоящей работе анализ ограни-

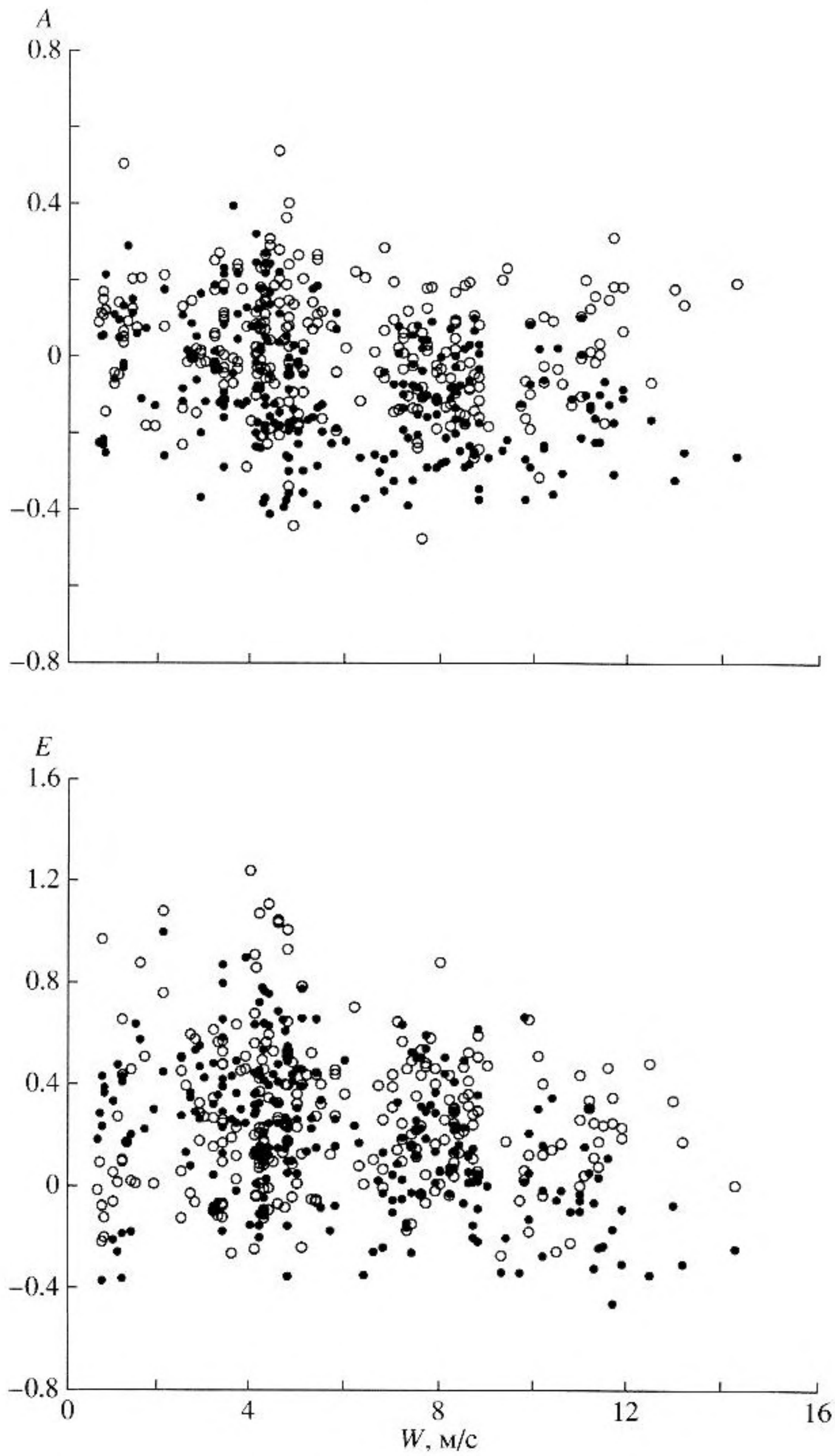

Рис. 4. Зависимости асимметрии A и эксцесса E уклонов морской поверхности от скорости ветра W: ● – продольная компонента уклонов; ○ – поперечная компонента уклонов.

чим областью уклонов, для которых выполняются условия $\tilde{\xi}_u \leq 3$ и $\tilde{\xi}_c \leq 3$. Дисперсия уклонов растет с усилением ветра (см. рис. 2), поэтому ограничения обусловлены состоянием морской поверхности при слабых ветрах. В частности, при скорости ветра 1 м/с аппроксимации (10) и (11) можно использовать при уклонах до 15°.

Статистические характеристики параметра χ_2 представлены в табл. 2. Максимальное отклонение значений $\overline{\chi_2}$ от 1 наблюдается при $\theta_0 = \theta = 0°$. В этом случае средняя ошибка при расчете коэффициента рассеяния в рамках гауссовой модели будет превышать 6%.

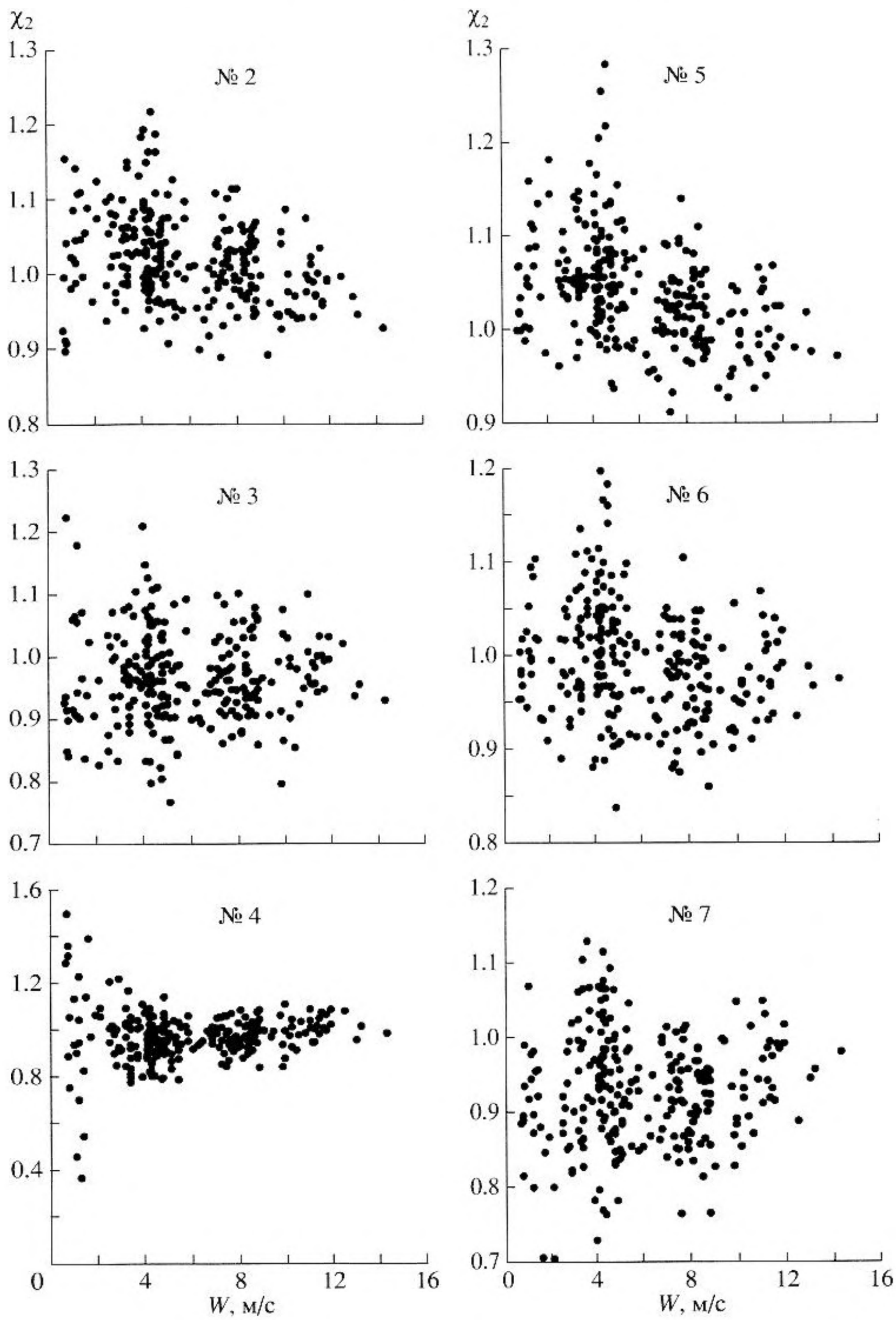

Рис. 5. Влияние отклонений статистических моментов уклонов морской поверхности от значений соответствующих распределению Гаусса на коэффициент рассеяния (номерами на каждом фрагменте указано соответствие с табл. 2).

Зависимость характеристики χ_2 от скорости ветра при фиксированных углах зондирования и рассеяния показана на рис. 5. Отклонения от значения $\chi_2 = 1$ наблюдаются как в большую, так и в меньшую стороны. Как правило, все оценки безразмерной характеристики χ_2 лежат в пределах от 0.8 до 1.2. Более значительные отклонения от $\chi_2 = 1$ имеют место только при слабых ветрах и углах облучения поверхности превышающих 10°. Оценки среднеквадратического отклонения зна-

чений χ_2 от $\overline{\chi_2}$ лежат в диапазоне от 0.053 при $\theta_0 = 0°$ до 0.012 при $\theta_0 = 15°$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корректное описание свойств рассеянного морской поверхностью акустического поля во многом определяется тем, на сколько точно воспроизведены ее статистические характеристики. Проведенный анализ позволил оценить, в какой мере наблюдаемые в морских условиях отклонения поля короткопериодных поверхностных волн от модели изотропной гауссовой поверхности влияют на коэффициент рассеяния высокочастотного звука.

Влияние анизотропии уклонов морской поверхности на величину коэффициента рассеяния зависит от угла облучения, с увеличением угла падения θ_0 оно растет. При $\theta_0 \leq 10°$ средняя ошибка при расчете коэффициента рассеяния в рамках изотропной модели волнового поля может достигать 6%, при $\theta_0 \geq 15°$ она может превышать 50%. Наиболее сильно влияние анизотропии проявляется при слабых ветрах в ситуациях, когда значения угла θ_0 значительно превышают углы локальных наклонов поверхности.

Внутри конуса, соответствующего углам падения до 15°, оценки характеристики χ_2, описывающей влияние отклонений распределения уклонов от распределения Гаусса, как правило, лежат в пределах от 0.8 до 1.2. Только при слабых ветрах были зафиксированы несколько ситуаций, когда величины χ_2 значительно отклонялись от единицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М.* Дифракция волн на неровной поверхности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1952. Т. 23. № 3. С. 275–288.
2. *Курьянов Б.Ф.* Рассеяние звука на шероховатой поверхности с двумя типами неровностей // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 3. С. 325–333.
3. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972, 424 с.
4. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Акустика океана // Океанология, Сер. Физика океана. 1978. Т. 2. С. 49–146.
5. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.
6. *Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Бабий М.В.* Статистические характеристики уклонов морской поверхности при разных скоростях ветра // Океанология. 1992. Т. 32. № 3. С. 452–459.
7. *Запевалов А.С.* Изменчивость характеристик локальных уклонов морской поверхности // Прикладная гидромеханика. 2005. Т. 7(79). № 1. С. 17–21.
8. *Babanin A.V., Soloviev Yu.P.* Variability of directional spectra of wind-generated waves, studied by means of wave staff arrays // Mar. Freshwater Res. 1998. V. 49. P. 89–101.
9. *Запевалов А.С.* Натурные исследования анизотропии уклонов морской поверхности на масштабах коротких гравитационных и гравитационно-капиллярных волн // Исследование Земли из космоса. 2000. № 3. С. 21–25.
10. *Лысанов Ю.П.* Рассеяние звука неровными поверхностями // В. кн.: Акустика океана М.: Наука, 1974. С. 231–330.
11. *Лонге-Хиггинс М.С.* Статистический анализ случайной движущейся поверхности // В кн.: Ветровые волны. М.: Иностранная литература, 1962. С. 125–218.
12. *Ewans D.D., Shemdin O.H.* An investigation of modulation of capillary and short gravity waves in the open ocean // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 5019–5024.
13. *Tang S., Shemdin O.H.* Measurement of high frequency waves using a wave follower // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 9832–9840.

Evaluation of the Scattering Coefficient for High-Frequency Sound Scattered from the Sea Surface

A. S. Zapevalov

Marine Hydrophysical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Kapitanskaya ul. 2, Sevastopol, Crimea, 99038 Ukraine

e-mail: sevzepter@mail.ru

Received July 18, 2006

Abstract—The effect of the deviation of the real rough sea surface from the Gaussian isotropic surface on the scattering coefficient of high-frequency sound is analyzed. The analysis relies on the data on the sea surface slopes that were obtained from field experiments in the Black Sea with the use of a two-dimensional laser inclinometer. It is shown that the effect of the anisotropy of the surface wave field on the scattering coefficient is small when the angle of incidence is small, but this effect rapidly increases as the angle of incidence groows. The deviation of the real statistical moments of the sea surface slopes from those corresponding to the Gaussian distribution results in a ±20% error in the theoretical values of the scattering coefficient.