

УДК 551.46.07

СТАТИСТИКА УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧАМ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

А. С. Запевалов, К. В. Показеев

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: sea@phys.msu.ru

Анализируется изменчивость четвертого статистического момента уклонов морской поверхности. Для анализа использованы данные измерений, полученные на океанографической платформе, расположенной на Черном море. Показано, что вероятность бликов зеркального отражения, рассчитанная для реальных значений статистических моментов уклонов морской поверхности, выше, чем определенная для гауссовой поверхности.

Введение

В конце 1960-х – начале 1970-х гг. были сформированы основы современной теории, описывающей рассеяние электромагнитных волн морской поверхностью [1, 2]. Однако достижения теории электромагнитного рассеяния остаются бесполезными, пока не получены конкретные данные в форме детальных и точных статистических характеристик морской поверхности [3].

Плотность вероятностей уклонов морской поверхности является одной из основных характеристик, определяющих рассеяние на ней электромагнитных волн [4]. Натурные исследования показали, что асимметрия продольной (ориентированной в направлении ветра) компоненты уклонов растет с ростом скорости ветра, а значения эксцесса продольной и поперечной компонент заметно отличаются от значений, соответствующих распределению Гаусса [5, 6]. В то же время, несмотря на экспериментальные свидетельства квазигауссового характера распределения уклонов, при анализе рассеяния света морской поверхностью до настоящего времени используются модели, представляющие ее в виде движущейся гауссовой поверхности [7, 8].

В работе [9] была предпринята попытка оценить, как отклонения статистических характеристик уклонов от значений, соответствующих распределению Гаусса, влияют на вероятность регистрации бликов зеркального отражения. Расчеты с использованием средних значений статистических моментов уклонов показали, что при лазерном зондировании в надир вероятность бликов в среднем возрастает на 10% по сравнению с вероятностью, определенной для гауссовой поверхности.

Короткие поверхностные волны, дающие основной вклад в интегральные характеристики уклонов, зависят от большого числа различных по своей геофизической природе факторов (течения, порывистость ветра, концентрация поверхностно-активных веществ и т. д.), что определяет их сильную изменчивость. Это обстоятельство, а также нелинейный характер связи между величинами статистических

моментов и вероятностью бликов, создает необходимость учитывать при анализе реально существующий разброс значений статистических моментов. Результаты такого анализа обсуждаются в настоящей работе.

Условие зеркального отражения

Обозначим возвышение поверхности как ξ . Примем, что в декартовой системе координат $d\xi/dx = \xi_u$ и $d\xi/dy = \xi_c$ являются продольной и поперечной компонентами уклонов (уклоны вдоль и поперек направления ветра).

При вертикальном лазерном зондировании условие регистрации блика зеркального отражения имеет вид

$$\xi_m \leq \xi_K = d/4h, \quad (1)$$

где $\xi_m = \sqrt{\xi_u^2 + \xi_c^2}$ — модуль уклона (или полный уклон), d — диаметр апертуры фотоприемника, h — расстояние от прибора до зондируемой поверхности [10]. Соответственно вероятность зеркального блика равна вероятности того, что модуль уклона удовлетворяет условию (1).

Продольная и поперечная компоненты уклона не коррелированы между собой, поэтому их двумерную плотность вероятностей можно представить в виде $P_{2D}(\xi_u, \xi_c) = P_u(\xi_u)P_c(\xi_c)$, где P_u и P_c — плотности вероятностей компонент уклонов. Для аппроксимации квазинормальных распределений, как правило, используются ряды Грама–Шарлье, коэффициенты которых рассчитываются по эмпирическим оценкам моментов распределений. Обычно в морских экспериментах определяются статистические моменты до четвертого порядка включительно, поэтому распределения компонент уклонов $\tilde{\xi}_x$ имеют вид [9]

$$P_u(\tilde{\xi}_u) = P_N(\tilde{\xi}_u) \left[1 + \frac{1}{6} A_u H_3(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24} E_u H_4(\tilde{\xi}_u) \right], \quad (2)$$

$$P_c(\tilde{\xi}_c) = P_N(\tilde{\xi}_c) \left[1 + \frac{1}{6} A_c H_3(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{24} E_c H_4(\tilde{\xi}_c) \right], \quad (3)$$

где $\tilde{\xi}_u = \xi_u/\sigma_u$ (σ^2 — дисперсия соответствующей компоненты уклонов); P_N — одномерная плотность

вероятностей распределения Гаусса; A и E — асимметрия и эксцесс; H_3 и H_4 — ортогональные полиномы Чебышева–Эрмита третьего и четвертого порядка.

Еще одним фактором, влияющим на характер распределения модуля уклонов, является различие в дисперсии продольной и поперечной компонент. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе [11], где показано, что его можно параметризовать, введя показатель трехмерности волнового поля $\gamma = \sigma_c / \sigma_u$.

Статистические оценки уклонов

Для анализа воспользуемся данными измерений уклонов морской поверхности, полученными в экспериментах на Черном море с помощью двумерного лазерного уклономера. Измерения проводились на океанографической платформе Морского гидрофизического института, установленной у Южного берега Крыма. Платформа установлена на глубине 30 м, что для типичных волновых условий на Черном море соответствует условию «глубокой воды». Предварительные результаты исследований зависимости статистических моментов уклонов от скорости ветра представлены в работе [7].

Измерение уклонов морской поверхности осуществлялось с помощью двумерного лазерного уклономера. Принцип работы уклономера основан на определении углов отклонения лазерного луча при прохождении из-под воды взволнованной границы раздела вода–воздух. Регистрируемый угол отклонения от вертикали определяется локальным наклоном морской поверхности в точке (на площадке $\sim 2 \text{ м}^2$), где ее пересекает луч.

Измерения проводились сеансами продолжительностью 30 с, с дискретностью измерений 0.02 с. Во время проведения экспериментов скорость ветра менялась от нуля до 14 м/с. Измерения проводились при ветре как со стороны открытого моря, так и со стороны берега, что соответствует длинному и короткому разгону ветровых волн. Стратификация вода–воздух была близка к нейтральной. Анализируемый массив данных включает результаты 276 сеансов измерений.

При лазерном зондировании диаметр апертуры фотоприемника много меньше расстояния от прибора до зондируемой поверхности, поэтому критическое значение модуля уклона при зондировании в надир (см. (1)) удовлетворяет условию $\xi_K \ll 1$. Поскольку полином Чебышева–Эрмита третьего порядка является нечетной функцией, в силу малости значений ξ_K асимметрией распределения компонент уклонов в (2) и (3) можно пренебречь. Таким образом, влияние отклонения от нормального закона распределения уклонов на вероятность бликов зеркального отражения при зондировании в надир будут определять три параметра: E_u , E_c и γ .

Зависимости параметров E_u и E_c от скорости ветра W представлены на рис. 1. Видно, что оба

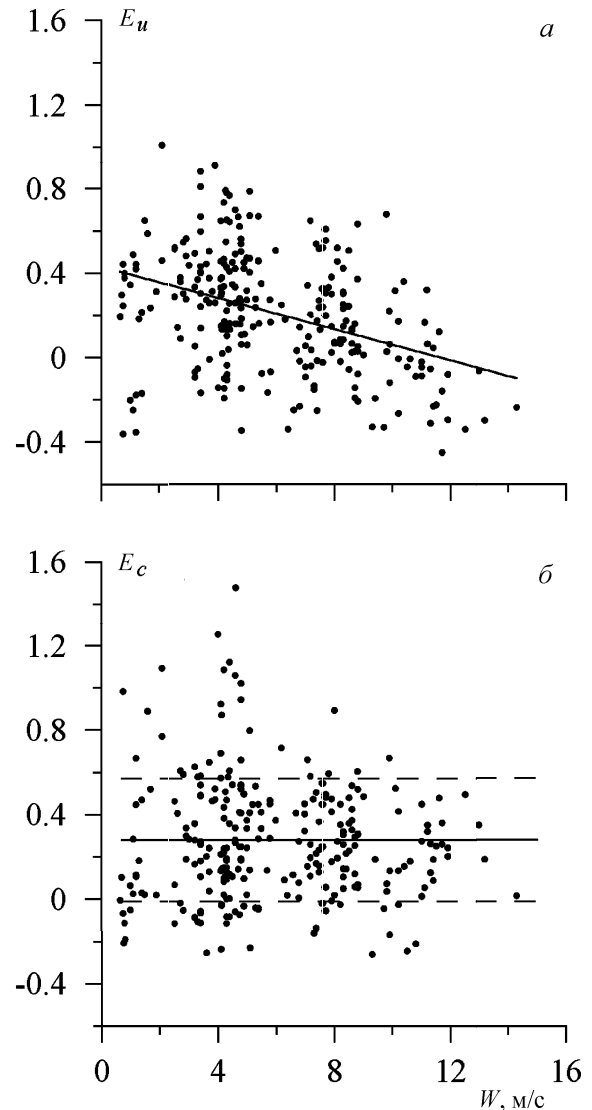


Рис. 1. Зависимости характеристик уклонов от скорости ветра: (а) эксцесс продольной компоненты уклонов E_u , сплошная — регрессия (4); (б) эксцесс поперечной компоненты уклонов E_c , сплошная — среднее значение, штриховые — среднеквадратическое отклонение

параметра характеризует значительный разброс их значений. Эксцесс продольной компоненты уклонов слабо зависит от скорости ветра, коэффициент корреляции между E_u и W равен -0.38 при 95% доверительном интервале, равном 0.1. Зависимость описывается уравнением линейной регрессии

$$E_u = 0.43 - 0.037 W \quad (4)$$

со среднеквадратической ошибкой ± 0.26 . Наши оценки параметра E_u близки к оценкам, приведенным в работе [5], $E_u = 0.23 \pm 0.41$, которые определены по аэрофотоснимкам солнечных бликов на морской поверхности. По данным, полученным с помощью лазерного уклономера, конструкция которого аналогична конструкции нашего уклономера, $E_u = 0.40 \pm 0.15$ [12]. Измерения велись с борта медленно движущегося судна.

Эксцесс поперечной компоненты не зависит от скорости ветра, $E_c = 0.28 \pm 0.29$. По данным [5, 12,

13], значения E_c равны 0.40 ± 0.23 и 0.51 ± 0.29 соответственно. Оценки параметров E_u и E_c статистически между собой не связаны.

Коэффициент корреляции показателя трехмерности волнового поля и скорости ветра равен 0.22 ± 0.12 . Зависимость показателя трехмерности от скорости ветра можно описать регрессией

$$\gamma = 0.61 + 0.0094 W$$

со среднеквадратической ошибкой ± 0.12 .

Влияние отдельных физических механизмов на характер распределения уклонов морской поверхности рассмотрено в работе [14]. Было показано, что основным из них является модуляция коротких волн длинной волной, которая может приводить к асимметрии уклонов, согласующейся по величине и знаку с наблюдаемой в экспериментах. Позднее было установлено, что модуляция также изменяет четвертый момент распределения уклонов [15]. Эффект модуляции играет важную роль в радиолокационных исследованиях океана, в частности, он позволяет осуществлять мониторинг ветровых волн из космоса с помощью локаторов с синтезированной апертурой [16].

Эффект квазигауссова распределения

Эффект, созданный квазигауссовым характером распределения уклонов, можно описать, используя параметр

$$\varepsilon = \int_0^{\xi_K} P(\xi_m) d\xi_m / \int_0^{\xi_K} P_{mN}(\xi_m) d\xi_m, \quad (5)$$

где P_{mN} — плотность вероятностей модуля уклона в случае, когда его компоненты имеют нормальное распределение.

В отличие от работы [9], где для расчета параметра ε использовались только средние значения асимметрии и эксцесса компонент уклонов, в настоящей работе анализ проводится на основе индивидуальных оценок статистических моментов уклонов, полученных в разных гидрометеорологических ситуациях. Такой подход позволяет не только определить средние значения параметра ε , но и оценить его изменение при разных скоростях ветра.

Значения параметра ε меняются в широких пределах (рис. 2). Как правило, справедливо неравенство $\varepsilon > 1$, т. е. реальная вероятность регистрации бликов зеркального отражения от поверхности моря выше, чем рассчитанная для гауссовой поверхности. Данный результат является следствием того, что большинство оценок E_u и E_c имеют положительный знак (см. рис. 1). Положительные значения эксцесса компонент уклонов приводят к более высокой, чем при гауссовом распределении, вероятности значений модуля уклонов, близких к нулевым. Значения параметра ε лежат в пределах от 0.93 до 1.29 при среднем значении 1.06.

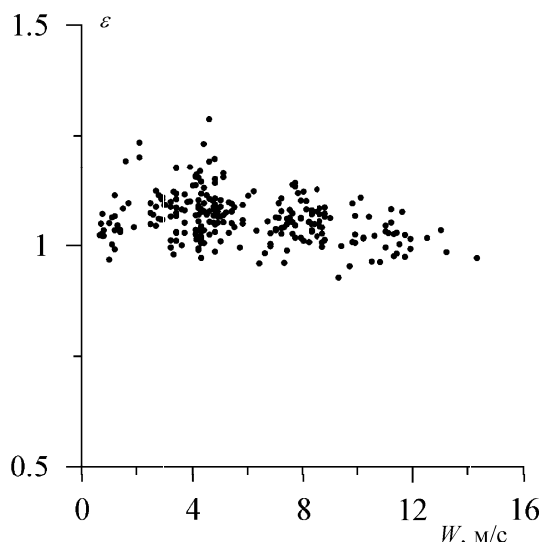


Рис. 2. Зависимость параметра ε от скорости ветра W

Выводы

Проанализирована связь четвертого статистического момента компонент уклонов со скоростью ветра. Эксцесс продольной компоненты уклонов слабо зависит от скорости ветра, зависимость описывается регрессией (5). Эксцесс поперечной компоненты не зависит от скорости ветра, среднее значение равно 0.28. Между собой оценки параметров E_u и E_c не коррелированы.

Показано, что рассчитанная по реальным значениям статистических моментов вероятность бликов зеркального отражения может быть как выше, так и ниже, чем определенная для гауссовой поверхности. Значения параметра ε лежат в пределах от 0.93 до 1.29 при среднем значении 1.06.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Мировой океан» № 43.634.11.0001-7.

Литература

1. Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И. и др. // Препринт № 51 ИРЭ АН УССР. Харьков, 1975.
2. Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W.A. // Deep Sea Res. 1977. **24**, N 12. P. 1211.
3. Valenzuela G. // Boundary Layer Meteorology. 1978. **13**, N 1-4. P. 61.
4. Guissard A., Baufoys C., Sobieski P. // J. Geophys. Res. 1986. **91**, N C2. P. 2477.
5. Apel J.R. // J. Geophys. Res. 1994. **99**, N C8. P. 16269.
6. Cox C., Munk W. // J. Optical. Soc. America. 1954. **44**, N 11. P. 838.
7. Христофоров Г.Н., Запелалов А.С., Бабий М.В. // Океанология. 1992. **32**, № 3. С. 452.
8. Гардашов П.Г. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991. **27**, № 12. С. 1367.
9. Малиновский В.В., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н., Смолен В.Е. // Морской гидрофизический журнал. 2000. № 3. С. 64.

10. Запевалов А.С., Ратнер Ю.Б. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь. МГИ НАНУ. 2002. № 1(6). С. 262.
11. Вильчинская Т.Б., Михайлович В.Г. // Морской гидрофизический журнал. 1990. № 6. С. 57.
12. Komen G.J., Cavaleri I., Donelan M. et al. The wind waves. Cambridge, 1994.
13. Лонге-Хиггинс М.С. Ветровые волны. М., 1962.
14. Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W. // Deep Sea Res. 1977. **24**, N 12. P. 1211.
15. Longuet-Higgins M.S. // J. Phys. Oceanogr. 1982. **12**. P. 1283.
16. Запевалов А.С., Ратнер Ю.Б. // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 1. С. 3.

Поступила в редакцию
19.11.03