

УДК 528.8.044

## ПОГРЕШНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ МОРСКИХ ВОЛН

*А. С. Запевалов\**

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия

Проанализированы погрешности восстановления дисперсии крупномасштабных уклонов морской поверхности по данным зондирования в сверхвысоочастотном диапазоне. Рассмотрены погрешности, вызванные отклонениями распределений уклонов от распределения Гаусса. Для анализа использована модель функции плотности вероятностей Кокса—Манка. Показано, что при расчёте дисперсии по данным зондирования в надир средняя относительная погрешность дисперсии составляет 12 %. При расчёте дисперсий уклонов по данным зондирования при нескольких углах падения погрешность зависит от выбора диапазона углов падения. В этом случае относительная погрешность определения дисперсии уклонов морской поверхности составляет  $10 \div 20$  %. Как при зондировании в надир, так и при наклонном зондировании отклонения распределений уклонов морской поверхности от распределения Гаусса приводят к занижению расчётных значений их дисперсии.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основной объём информации о процессах, протекающих в океане и приводном слое атмосферы, получают на основе данных дистанционного зондирования с космических аппаратов [1]. Измерения параметров морской поверхности и приводного слоя атмосферы относятся к классу косвенных измерений, и их погрешность во многом зависит от того, насколько полно учтены все факторы, влияющие на взаимодействие электромагнитного излучения с морской поверхностью.

Уклоны морской поверхности являются одним из основных параметров, определяющих рассеяние радиоволн [2, 3]. В большинстве радиоокеанографических приложений при описании полей радиоволн, отражённых от морской поверхности, используются регрессионные зависимости статистических моментов уклонов морской поверхности от скорости ветра, известные как модель Кокса—Манка [4]. Исследования, проведённые недавно с помощью установленных на космических аппаратах оптических сканеров [5], подтвердили справедливость этих зависимостей.

Длины электромагнитных волн оптического диапазона много меньше длин поверхностных волн, поэтому оптические измерения несут информацию о дисперсии уклонов, формируемых поверхностными волнами всех масштабов. В то же время существует ряд задач, в рамках которых необходимо знать дисперсию уклонов морской поверхности, создаваемых поверхностными волнами заданной длины. Если зондирование морской поверхности осуществляется при малых углах падения, то механизм зеркального отражения определяет крупномасштабные уклоны, формируемые длинными волнами, т. е. волнами, длина которых много больше длины радиоволны [6]. Соответственно, в расчётах сечения обратного рассеяния необходимо использовать характеристики уклонов, создаваемых именно этими волнами [7, 8]. Также необходимо учитывать уклоны длинных волн, если зондирование проводится при углах падения, при которых регистрируемый локатором сигнал определяется резонансным механизмом рассеяния. Длинные волны меняют локальные углы падения, тем самым изменяя уровень рассеянного назад сигнала [9].

\* sevzepter@mail.ru

Актуальность задачи расчёта характеристик уклонов морской поверхности, создаваемых волнами заданного диапазона, стимулировала проведение цикла работ, в результате которых были разработаны методы и алгоритмы определения дисперсии длинных волн на основе радиолокационных измерений [10, 11], а также по данным многочастотного радиометра [12]. Указанные исследования проводились в рамках предположения, что поле поверхностных волн является линейным, а распределение уклонов является гауссовым.

Морское волнение относится к классу слабо нелинейных процессов [13, 14]. Как следствие, распределения возвышений морской поверхности [15] и её уклонов отличаются от распределения Гаусса [5, 16]. Хотя нелинейность поля поверхностных волн мала, и, следовательно, малы отклонения от распределения Гаусса, в ряде случаев они играют заметную роль [17]. Целью настоящей работы является анализ влияния отклонений от распределения Гаусса на расчётные значения дисперсий уклонов, полученных по данным радиозондирования при малых углах падения.

## 1. КВАЗИЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

При построении модели зеркального отражения радиоволн морской поверхностью используется подход на основе приближения геометрической оптики. Приближение геометрической оптики (или метод Кирхгофа) справедливо в случае, когда радиус кривизны  $\rho$  отражающей поверхности много больше длины радиоволны  $\lambda$  [18]:

$$\rho \frac{2\pi}{\lambda} \cos^3 \theta \gg 1, \quad (1)$$

где  $\theta$  — угол падения.

Нормированное сечение обратного рассеяния радиоволн, удовлетворяющих условию (1), в случае их падения на шероховатую поверхность с конечной проводимостью описывается выражением [2]

$$\sigma = \pi \sec^4(\theta) |R_0| P(\xi_{\uparrow}, \xi_{\perp}) \Big|_{\xi_{\uparrow}=\tan \theta, \xi_{\perp}=0}. \quad (2)$$

Здесь  $R_0$  — коэффициент Френеля,  $P$  — двумерная функция плотности вероятностей уклонов,  $\xi_{\uparrow}$  и  $\xi_{\perp}$  — уклоны морской поверхности в плоскости зондирования и в ортогональной плоскости соответственно. Волны мелкомасштабной ряби, длины которых меньше или сравнимы с длиной зондирующей радиоволны, вызывают диффузное рассеяние, которое уменьшает мощность отражённого назад радиолокационного сигнала. Для того, чтобы учесть диффузное рассеяние в выражении (2), коэффициент Френеля заменяют эффективным коэффициентом отражения  $R_{\text{eff}}$  [6].

Зависимость сечения обратного рассеяния от функции плотности вероятностей уклонов морской поверхности позволяет решать обратную задачу: восстанавливать статистические характеристики уклонов по данным радиозондирования. В работах [7, 8, 10, 11] предложены алгоритмы, в которых расчёт дисперсий проводится по данным зондирования при нескольких углах падения. Это позволяет исключить из расчётов коэффициент  $R_{\text{eff}}$ , точное значение которого неизвестно.

## 2. ФУНКЦИЯ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В линейном волновом поле, которое представляет собой суперпозицию независимых компонент, распределения уклонов описываются распределением Гаусса [19]. Нелинейные эффекты

в поле морских поверхностных волн приводят к отклонениям распределения уклонов от распределения Гаусса [14]. В настоящее время основной моделью, которая описывает двумерное распределение уклонов морской поверхности в приложениях, связанных с взаимодействием электромагнитных волн с морской поверхностью, является модель Кокса—Манка, построенная на основе рядов Грама—Шарлье [4]. Она построена для компонент уклона  $\xi_u$  и  $\xi_c$ , ориентированных вдоль и поперёк направления ветра соответственно:

$$P_{CM}(\xi_c, \xi_u) = P_G(\xi_c, \xi_u) \left[ 1 - \frac{1}{2} C_{11} H_2(\tilde{\xi}_c) H_1(\tilde{\xi}_u) - \frac{1}{6} C_{03} H_3(\tilde{\xi}_u) + \right. \\ \left. + \frac{1}{24} C_{40} H_4(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{4} C_{22} H_2(\tilde{\xi}_c) H_2(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24} C_{04} H_4(\tilde{\xi}_u) \right]. \quad (3)$$

Здесь  $P_G$  — распределение Гаусса,  $\tilde{\xi}_c = \xi_c/s_c$ ,  $\tilde{\xi}_u = \xi_u/s_u$ ,  $s_u^2$  и  $s_c^2$  — дисперсии продольной и поперечной компонент уклонов соответственно,  $C_{ij}$  — коэффициенты ряда Грама—Шарлье,  $H_n$  — ортогональные полиномы Эрмита порядка  $n$ . Первый индекс коэффициента  $C_{ij}$  соответствует поперечной компоненте уклона, второй — продольной. Модель (3) построена в рамках предположения, что распределение уклонов является симметричным относительно направления ветра. Первые четыре полинома  $H_n$  даются выражениями

$$H_n = \begin{cases} x, & n = 1; \\ x^2 - 1, & n = 2; \\ x^3 - 3x, & n = 3; \\ x^4 - 6x^2 + 3, & n = 4. \end{cases} \quad (4)$$

Для дальнейшего анализа будем использовать оценки статистических моментов, представленные в работе [5] (см. табл. 1). Статистические оценки уклонов получены по изображениям морской поверхности оптического сканера POLDER (POLarization and Directionality of the Earth Reflectances). Для определения скорости ветра использовался скаттерометр NSCAT (NASA Scatterometer). Оба прибора установлены на борту космического аппарата ADEOS (The Advanced Earth Observing Satellite).

В работе [20] по данным радиозондирования морской поверхности в Ку-диапазоне (частоты  $12 \div 18$  ГГц при углах падения от  $0^\circ$  до  $18^\circ$ ) были рассчитаны коэффициенты  $C_{21}$  и  $C_{03}$ . Полученные значения оказались значительно ниже величин этих же коэффициентов, найденных оптическим методом [5] для чистой поверхности, и ближе к значениям, определённым в сликовой ситуации, когда морская поверхность покрыта плёнкой. Это дало основание предположить [21], что для

Таблица 1. Параметры модели (3) (здесь  $W$  [м/с] — скорость ветра, измеренная на высоте 10 м)

Параметр	по данным работы [5]	по данным работ [20, 21]
$\sigma_c^2$	$0,003 + 0,00185W \pm 0,0005$	$0,0097 + 0,00053W$
$\sigma_u^2$	$0,001 + 0,00316W \pm 0,0005$	$0,0092 + 0,00079W$
$C_{21}$	$-0,0009W^2 \pm 0,01$	$0,0087 - 0,00210W$
$C_{03}$	$-0,45 [1 + \exp(7 - W)]^{-1} \pm 10^{-2}$	$0,0325 - 0,00836W$
$C_{40}$	$0,30 \pm 0,05$	$0,36 \pm 0,24$
$C_{22}$	$0,12 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,05$
$C_{04}$	$0,40 \pm 0,10$	$0,26 \pm 0,31$

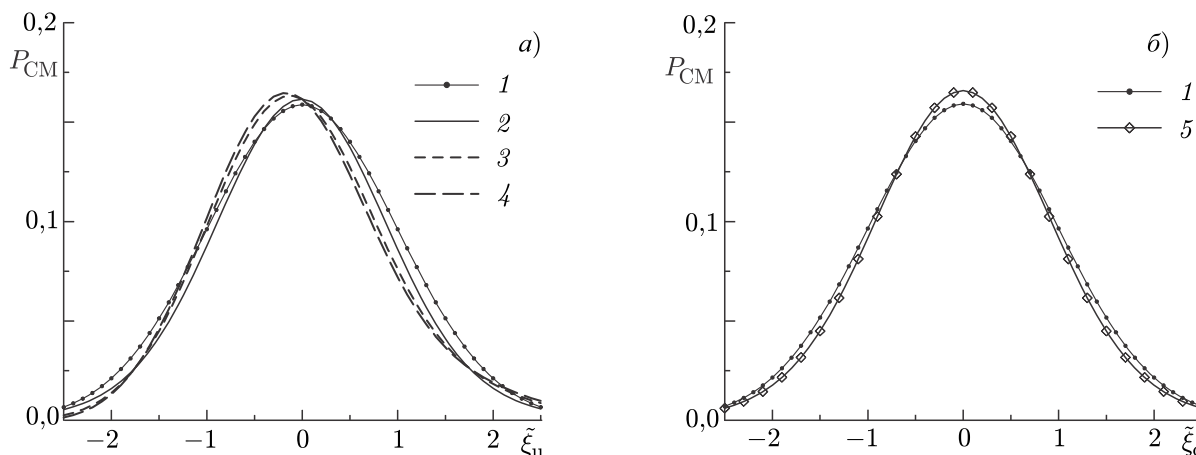


Рис. 1. Сечения функций плотности вероятностей уклонов морской поверхности: распределение Гаусса (кривая 1),  $P_{CM}(\tilde{\xi}_c = 0, \tilde{\xi}_u)$  для скоростей ветра 4; 8 и 12 м/с (а, кривые 2–4 соответственно),  $P_{CM}(\tilde{\xi}_c, \tilde{\xi}_u = 0)$  (б, кривая 5)

расчётов поля радиоволн, рассеянных морской поверхностью, можно использовать полученные в сликовой ситуации [5] коэффициенты  $C_{40}$ ,  $C_{22}$  и  $C_{04}$ . Значения этих коэффициентов также приведены в табл. 1.

Сечения двумерной плотности вероятностей уклонов морской поверхности, построенные по модели (3) для нормированных компонент уклонов  $\tilde{\xi}_c$  и  $\tilde{\xi}_u$ , представлены на рис. 1. Зависимости нечётных коэффициентов  $C_{ij}$  от скорости ветра приводят к тому, что форма распределения  $P_{CM}(\tilde{\xi}_c = 0, \tilde{\xi}_u)$  меняется с изменением скорости ветра. Чётные коэффициенты  $C_{ij}$  от скорости ветра не зависят, соответственно при изменении скорости ветра распределение  $P_{CM}(\tilde{\xi}_c, \tilde{\xi}_u = 0)$  не меняется.

### 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ УКЛОНОВ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Погрешность восстановления дисперсии уклонов определяется тем, насколько корректно в выражении (2) описана двумерная функция их плотности вероятности. При зондировании в надир сигнал радиолокатора формирует площадки поверхности, для которых выполняется условие  $\tilde{\xi}_c = \tilde{\xi}_u = 0$ . Из (4) следует, что  $H_1(0) = 0$ ,  $H_2(0) = -1$ ,  $H_3(0) = 0$  и  $H_4(0) = 3$ . Получаем

$$P_{CM}(\tilde{\xi}_c = 0, \tilde{\xi}_u = 0) = \frac{1 + F_0}{2\pi s_c s_u}, \quad (5)$$

где

$$F_0 = \frac{1}{8}C_{40} + \frac{1}{4}C_{22} + \frac{1}{8}C_{04}. \quad (6)$$

Поскольку чётные коэффициенты  $C_{ij}$  не зависят от скорости ветра, то отклонения модели  $P_{CM}(\tilde{\xi}_c = 0, \tilde{\xi}_u = 0)$  от распределения Гаусса, определяемые параметром  $F_0$ , также не зависят от скорости ветра. Согласно оценкам коэффициентов  $C_{ij}$  по данным работы [5] (см. табл. 1),  $F_0 = 0,12$ . Коэффициенты  $C_{ij}$  являются случайными величинами, значения которых, определённые в разных экспериментах, имеют разброс. Параметр  $F_0$  меняется в диапазоне от 0,10 до 0,14 при вариациях коэффициентов  $C_{ij}$  в пределах, соответствующих их среднеквадратическим отклонениям. Близкая оценка  $F_0 = 0,10$  получена по данным работ [20, 21], но со значительно большим разбросом от 0,02 до 0,18.

Все найденные значения параметра  $F_0$  являются положительными; это означает, что при одних и тех же  $\sigma$  расчёты дисперсий уклонов в рамках гауссовой модели приводят к их занижению. Таким образом, если достоверно известен коэффициент  $R_{\text{эф}}$ , то точность восстановления дисперсии уклонов определяется точностью оценок параметров распределения  $C_{40}$ ,  $C_{22}$  и  $C_{04}$ .

Зеркальное отражение создают поверхностные волны, длина которых  $\Lambda$  много больше длины зондирующей радиоволны [6]:

$$\Lambda \gg \lambda. \quad (7)$$

При увеличении длины радиоволны сужается спектральный диапазон поверхностных волн, формирующих зеркальное отражение, и дисперсия их уклонов уменьшается. Для того, чтобы учесть этот эффект, в работе [22] было предложено оценивать дисперсию уклонов, создаваемых волнами, длина которых удовлетворяет условию (7), как часть общей дисперсии, полученной по данным оптических измерений. Отметим, что при зондировании морской поверхности в надир изменение дисперсии уклонов длинных волн, как следует из выражений (5) и (6), не влияет на относительную точность её определения.

При изменении длины зондирующей радиоволны также могут меняться моменты третьего и четвёртого порядков распределения уклонов, определяющих зеркальное отражение. Их отклонение от значений, соответствующих распределению Гаусса вызывается рядом физических механизмов, приводящих к нелинейности поверхностных волн: межволновыми взаимодействиями, воздействием индуцированных длинной волной орбитальных движений на более короткие, кинематической нелинейностью волн конечной амплитуды и т. д. В разных диапазонах поверхностных волн роль различных физических механизмов неодинакова, но нелинейными являются волны всех диапазонов, включая диапазон доминантных энергонесущих волн.

Одну из причин расхождения в оценках значений коэффициентов, рассчитанных по данным радиолокационных и оптических измерений, можно объяснить следующим образом. Максимальный угол падения, при котором осуществлялись радиолокационные измерения, был равен  $18^\circ$ . Соответственно, оценки статистических моментов уклонов осуществлялись по усечённому распределению, что приводит к их занижению [23].

#### 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Задача измерения уклонов может быть решена с помощью радиолокаторов, работающих при малых углах падения [7, 8, 10, 11]. В основе этого подхода лежит определение зависимости сечения обратного рассеяния от угла зондирования. Указанная зависимость, как видно из (2), однозначно описывается функцией плотности вероятности уклонов морской поверхности.

Рассмотрим два предельных случая: когда направление зондирования совпадает с направлением ветра и когда направление зондирования перпендикулярно ему. Для случая зондирования вдоль направления ветра получаем

$$P_{\text{СМ}}(\tilde{\xi}_c = 0, \tilde{\xi}_u) = \frac{\exp(-\tilde{\xi}_u^2)}{2\pi s_c s_u} F_u(\tilde{\xi}_u). \quad (8)$$

Здесь

$$F_u(\tilde{\xi}_u) = 1 + \frac{1}{2}C_{21}H_1(\tilde{\xi}_u) - \frac{1}{6}C_{03}H_3(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{8}C_{40} - \frac{1}{4}C_{22}H_2(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24}C_{04}H_4(\tilde{\xi}_u). \quad (9)$$

Функция  $F_u(\tilde{\xi}_u)$ , представленная на рис. 2, описывает отклонение реального распределения продольной компоненты уклонов от распределения Гаусса. Видно, что  $F_u(\tilde{\xi}_u)$  заметно меняется

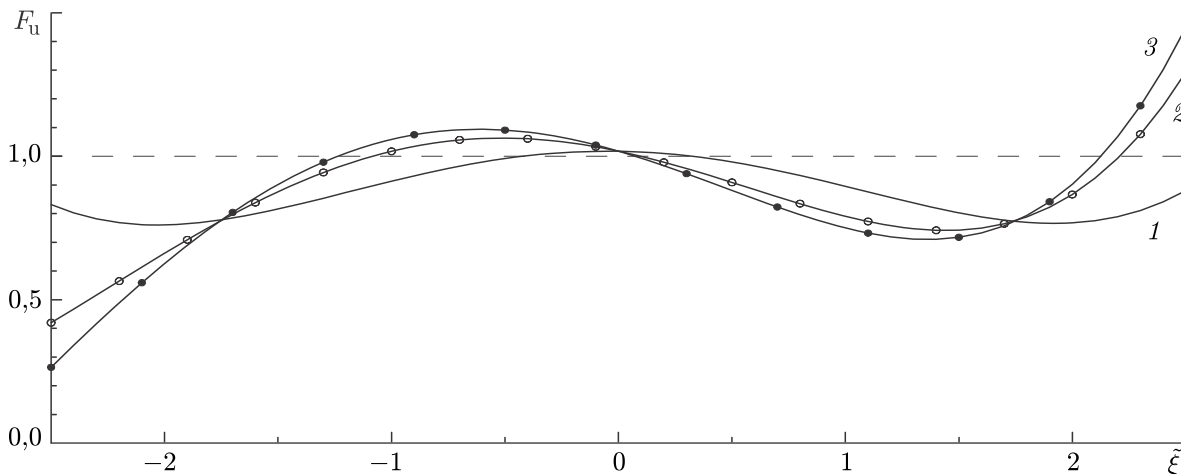


Рис. 2. Отклонение модели Кокса—Манка от распределения Гаусса  $F_u(\tilde{\xi}_u)$  в сечении вдоль направления ветра: кривая 1 соответствует распределению Гаусса, кривые 2 и 3 — модели Кокса—Манка для скорости ветра 4 и 8 м/с соответственно

с вариацией скорости ветра, что обусловлено асимметрией продольной компоненты уклонов  $C_{03}$ , а также смешанным коэффициентом  $C_{21}$ .

Если зондирование осуществляется поперёк направления ветра, то выражение (3) переходит в

$$P_{CM}(\tilde{\xi}_c, \tilde{\xi}_u = 0) = \frac{\exp(-\tilde{\xi}_u^2/s_c^2)}{2\pi s_c s_u} F_c(\tilde{\xi}_c), \quad (10)$$

$$F_c(\tilde{\xi}_c) = 1 + \frac{1}{24}C_{40}H_4(\tilde{\xi}_c) - \frac{1}{4}C_{22}H_2(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{8}C_{04}. \quad (11)$$

Функция  $F_c(\tilde{\xi}_c)$  является чётной, поэтому на рис. 3 она показана только для области положительных значений  $\tilde{\xi}_c$ .

При использовании функций  $F_u(\tilde{\xi}_u)$  и  $F_c(\tilde{\xi}_c)$  для коррекции восстановленных по данным радиозондирования оценок уклонов морской поверхности следует учитывать, что эти функции зависят от дисперсии компонент уклонов. Зеркальное отражение назад имеет место, если отражающая площадка ориентирована перпендикулярно направлению падающей волны, т. е. должно выполняться условие  $\xi_{\uparrow} = \text{tg } \theta$ . Соответственно функции  $F_u(\tilde{\xi}_u)$  и  $F_c(\tilde{\xi}_c)$  можно представить как функции угла падения:

$$F_u(\theta) = 1 + \frac{1}{2}C_{21}H_1\left(\frac{\text{tg } \theta}{s_u}\right) - \frac{1}{6}C_{03}H_3\left(\frac{\text{tg } \theta}{s_u}\right) + \frac{1}{8}C_{40} - \frac{1}{4}C_{22}H_2\left(\frac{\text{tg } \theta}{s_u}\right) + \frac{1}{24}C_{40}H_4\left(\frac{\text{tg } \theta}{s_u}\right), \quad (12)$$

$$F_c(\theta) = 1 + \frac{1}{24}C_{40}H_4\left(\frac{\text{tg } \theta}{s_c}\right) - \frac{1}{4}C_{22}H_2\left(\frac{\text{tg } \theta}{s_c}\right) + \frac{1}{8}C_{04}. \quad (13)$$

Модель (3) справедлива только в ограниченном диапазоне изменения уклонов, который определяется условием [4]

$$|\xi_c| < 2,5s_c, \quad |\xi_u| < 2,5s_u. \quad (14)$$

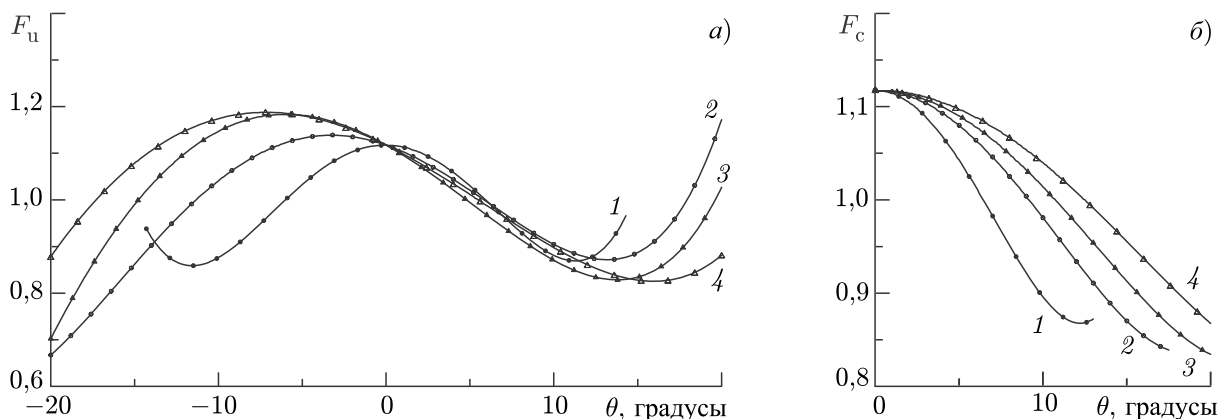


Рис. 4. Отклонение сечения обратного рассеяния, рассчитанного по модели Кокса—Манка, от сечения обратного рассеяния, вычисленного для распределения Гаусса: кривая 1 соответствует распределению Гаусса, кривые 2–4 — модели Кокса—Манка для скорости ветра 4; 8 и 12 м/с соответственно

За пределами диапазона (14) модель (3) некорректно описывает функцию плотности вероятности уклонов и даже может давать отрицательные значения [24, 25]. Дисперсии компонент уклонов зависят от скорости ветра, поэтому максимальный угол зондирования  $\theta_m$ , при котором можно использовать модель (3), также есть функция скорости ветра.

Функции  $F_u(\theta)$  и  $F_c(\theta)$ , представленные на рис. 4, описывают отношения сечений обратного рассеяния, рассчитанных по модели (3) и для гауссова распределения соответственно. Данные функции построены для диапазонов углов падения  $|\theta| < \theta_m$ .

По виду функции  $\sigma = \sigma(\theta)$  оценим погрешность расчёта дисперсий уклонов, вызванную отклонением функции плотности вероятности уклонов  $P(\xi_{\uparrow}, \xi_{\perp})$  от распределения Гаусса. В случае, когда распределение уклонов является гауссовым, справедливо выражение

$$\ln[\sigma(\theta) \cos^4 \theta] = \ln\left(\frac{|R_{\text{eff}}|}{2s_{\uparrow} s_{\perp}}\right) - \frac{\text{tg}^2 \theta}{2s_{\uparrow}^2}. \tag{15}$$

Здесь, как и выше, предполагается, что зондирование осуществляется вдоль или поперёк направления ветра, т. е. индексу  $\uparrow$  соответствует u или s. Далее, на основе радиолокационных измерений при разных углах падения рассчитываются величины  $\ln[\sigma(\theta) \cos^4 \theta]$ , строится линейная аппроксимация как функция  $\text{tg}^2 \theta$ , и по наклону линейной функции определяется дисперсия уклонов [8]. Если распределение уклонов не является гауссовым, то в правой части выражения (15) появляется ещё одно слагаемое, зависящее от угла падения:

$$\ln[\sigma(\theta) \cos^4 \theta] = \ln\left(\frac{|R_{\text{eff}}|}{2s_{\uparrow} s_{\perp}}\right) - \frac{\text{tg}^2 \theta}{2s_{\uparrow}^2} + \ln[F_{\uparrow}(\theta)]. \tag{16}$$

Вид функций

$$\chi_{\uparrow}(\theta) = \frac{\text{tg}^2 \theta}{2s_{\uparrow}^2} - \ln[F_{\uparrow}(\theta)],$$

построенных для скорости ветра 7 м/с, показан на рис. 5. Он иллюстрирует три ситуации, когда зондирование осуществляется вдоль направления ветра, навстречу ветру и поперёк направления ветра, для приведённых в табл. 1 параметров модели, полученных на основе оптических

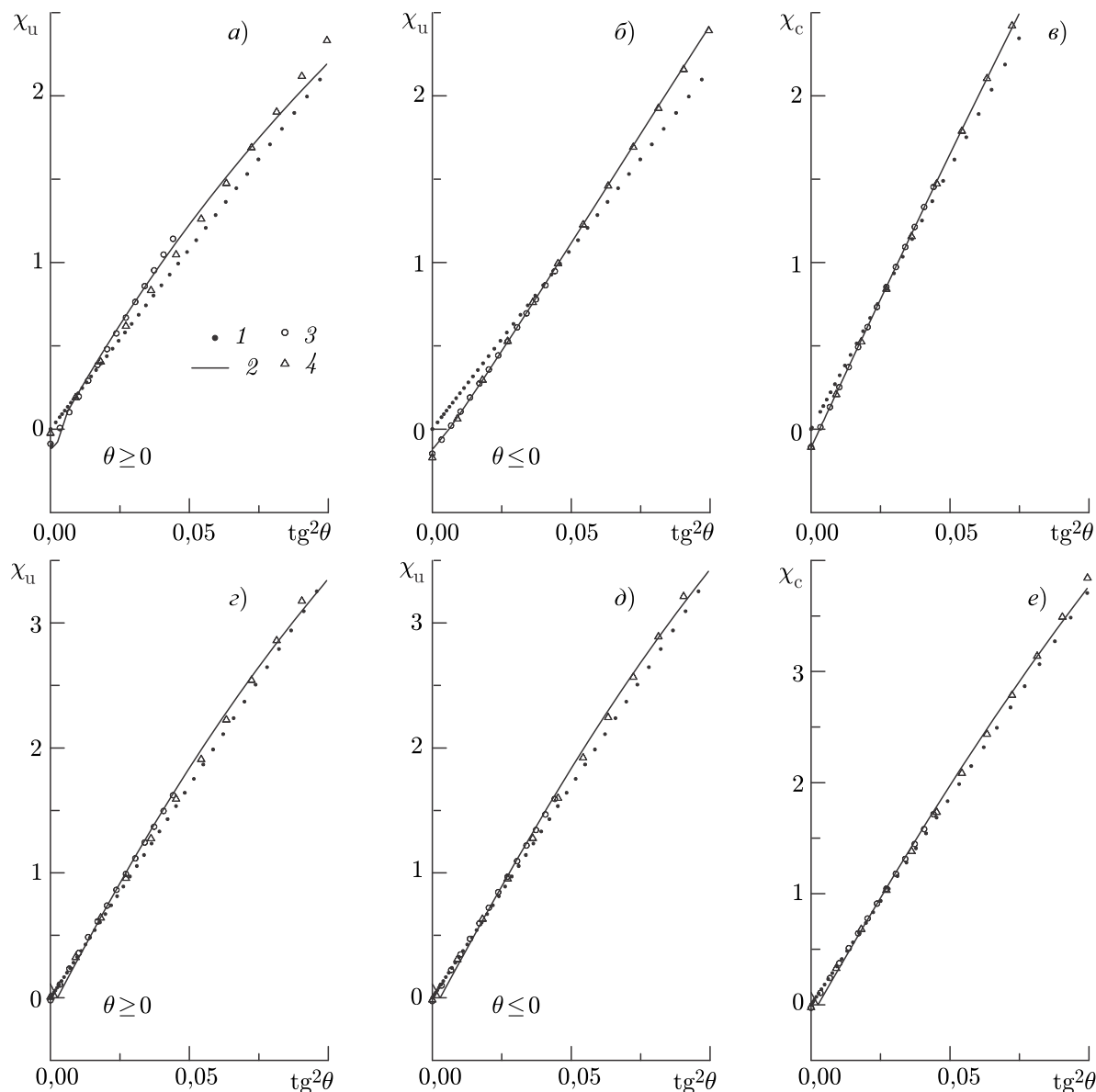


Рис. 5. Функции  $\chi_{\uparrow} = \chi_{\uparrow}(\theta)$ : для распределения Гаусса (1), для распределения Грама–Шарлье (2). Линейные аппроксимации функции  $\chi_{\uparrow}(\theta)$  построены по распределению Грама–Шарлье для разных диапазонов углов падения (3 и 4). Панели а–в соответствуют расчётам по распределению Грама–Шарлье, коэффициенты которого определены по данным оптических измерений, панели г–е — расчётам на основе данных радиолокационных измерений

(панели а–в) и радиолокационных (панели г–е) измерений. Отрицательные значения угла  $\theta$  соответствуют зондированию навстречу ветру. Зависимостями 3 и 4 показаны линейные регрессии, аппроксимирующие функции  $\chi_{\uparrow}(\theta)$  (построены в тех диапазонах углов  $\theta$ , для которых они рассчитывались). Поскольку в общем случае функции  $\chi_{\uparrow}(\theta)$  являются нелинейными, то наклон регрессионных зависимостей меняется в зависимости от выбора области изменения угла  $\theta$ . По сравнению с наклоном функции  $\chi_{\uparrow}(\theta)$  для гауссова распределения, наклон регрессий может отклоняться на 25 %, если они построены по данным оптических измерений, и на 15 % в случае радиолокационных измерений.



## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нелинейные процессы в поле морских поверхностных волн приводят к отклонениям распределений уклонов морской поверхности от распределения Гаусса. Эти отклонения заметно влияют на точность восстановления дисперсии крупномасштабных уклонов поверхности по данным вертикального зондирования.

Численное моделирование на основе модели Кокса—Манка, описывающей функцию плотности вероятности уклонов морской поверхности, показало следующее. Если зондирование осуществляется при нулевом угле падения, то сечение обратного рассеяния в среднем на 12 % выше, чем при рассеянии на поверхности, уклоны которой описываются гауссовым распределением. Соответственно оценки дисперсии уклонов, определённые по данным радиозондирования в надир, будут содержать систематическую погрешность, если при расчётах не учтены отклонения от распределения Гаусса.

При расчёте дисперсий уклонов по данным зондирования при нескольких углах падения погрешность зависит от выбора диапазона углов падения. Относительная погрешность восстановления дисперсии уклонов длинных волн, рассчитанная по распределению Грама—Шарлье, в котором старшие статистические моменты уклонов получены оптическими методами, может достигать 25 %. Если в распределении Грама—Шарлье использованы старшие статистические моменты, определённые на основе радиолокационных измерений, то относительная погрешность не превышает 15 %.

Работа выполнена в рамках госзадания (проект 0827–2014–0011 «Исследования закономерностей изменения состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротаев Г. К., Еремеев В. Н. Введение в оперативную океанографию Чёрного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 382 с.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Данилычев М. В., Кутуза Б. Г., Николаев А. Г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 2. С. 68.
4. Cox C., Munk W. // J. Optical. Soc. America. 1954. V. 44, No. 11. P. 838.
5. Breon F. M., Henriot N. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, No 6. Art. no. C06005.
6. Wu S. T., Fung A. K. // J. Geophys. Res. 1972. V. 77, No. 30. P. 5917.
7. Караев В. Ю., Панфилова М. А., Баландина Г. Н., Чу К. // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 62.
8. Hauser D., Caudal G., Guimbard S., Mouche A. A. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, No. 2. Art. no. C02006.
9. Запевалов А. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 266.
10. Караев В. Ю., Каневский М. Б., Мешков Е. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 5. С. 399.
11. Панфилова М. А., Караев В. Ю. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 6. С. 119.
12. Danilychev M. V., Nikolaev A. N., Kutuza B. G. // J. Commun. Technology and Electronics. 2009. V. 54, No. 8. P. 869.

13. Longuet-Higgins M. S. // *J. Fluid Mech.* 1963. V. 17, No. 3. P. 459.
14. Hou Y., Song G., Zhao X., et al. // *Chinese J. Oceanology and Limnology.* 2006. V. 24, No. 1. P. 1.
15. Запевалов А. С., Большаков А. Н., Смоллов В. Е. // *Океанология.* 2011. Т. 51, № 3. С. 432.
16. Zapevalov A. S. // *Physical Oceanography.* 2002. V. 12, No. 1. P. 24.
17. Показеев К. В., Запевалов А. С., Пустовойтенко В. В. // *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия.* 2013. № 5. С. 80.
18. Бреховских Л. М. // *Журн. эксперим. теорет. физики.* 1952. Т. 23, № 3. С. 275.
19. Лонге-Хиггинс М. С. *Ветровые волны.* М.: Иностранная литература, 1962. С. 125.
20. Chu X., He Y., Chen G. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 2012. V. 50. P. 4014.
21. Chen P., Yin Q., Huang P. // *Chinese J. Oceanology and Limnology.* 2015. V. 33, No. 5. P. 1142.
22. Wilheit T. T. // *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 1979. V. GE-17, No. 4. P. 244.
23. Запевалов А. С. // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30, № 9. С. 789.
24. Tatarskii V. I. // *J. Atmosph. Oceanic Technology.* 2003. V. 20. P. 1697.
25. Запевалов А. С., Пустовойтенко В. В. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 2. С. 110.

Поступила в редакцию 7 апреля 2017 г.; принята в печать 31 января 2018 г.

## **ERRORS IN RADAR MEASUREMENTS OF THE LARGE-SCALE SEA-SURFACE SLOPES CAUSED BY THE SEA-WAVE NONLINEARITY**

*A. S. Zapevalov*

We analyze the errors when reconstructing the variance of the large-scale slopes of the sea surface from the microwave-range sounding data. The errors caused by the slope-distribution deviations from the Gaussian distribution are considered. The model of the Cox—Munk probability-density function is used for analysis. The average relative error when calculating variance from the nadir-sounding data amounts to 12%. When calculating the slope variance from the sounding data in the case of several incidence angles, the error is a function of choosing the incidence-angle range. In this case, the relative error when determining the sea-surface slope variance amounts to 10–20%. Deviations of the sea-surface slope distributions from the Gaussian distribution lead to underestimated design values of their variance for both nadir and oblique sounding.