

УДК 551.463.7

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 3 см НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ

*В. В. Малиновский*<sup>1\*</sup>, *А. Е. Кориненко*<sup>1</sup>, *В. Н. Кудрявцев*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь;

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты радиолокационных исследований рассеяния морской поверхностью электромагнитного излучения в диапазоне длин волн 3 см при горизонтальной поляризации передаваемого и принимаемого сигналов и больших углах падения. Натурные измерения выполнены на Стационарной океанографической платформе в Чёрном море в диапазоне углов падения от 84,0° до 87,5° при скоростях ветра от 4 до 19 м/с. Рассмотрены только условия ветрового волнения без зыби. Показано, что удельная эффективная площадь рассеяния практически не меняется при вариации угла падения, однако обладает сильной ветровой зависимостью. Эта зависимость может быть описана степенной функцией с показателями 2,8 и 3,8 при направлениях зондирования на ветер и по ветру соответственно. При слабых и умеренных ветрах азимутальная зависимость удельной эффективной площади рассеяния характеризуется унимодальной функцией с одним максимумом в направлении на ветер и с минимумом по ветру. При скоростях ветра более 10 м/с азимутальная зависимость площади рассеяния становится бимодальной с минимумом при азимуте, близком к направлению, перпендикулярному ветру. Измеренные значения удельной эффективной площади рассеяния аппроксимированы ограниченным рядом Фурье по азимуту, в котором коэффициенты разложения зависят от скорости ветра и угла падения.

### ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные съёмки морской поверхности при больших углах падения (более 80°, т. е. при малых углах скольжения, не превышающих 10°), характерные для навигационных радиолокационных станций (РЛС), широко используются для решения различных прикладных и исследовательских задач, например для определения параметров поверхностного волнения [1, 2], вектора скорости поверхностных течений [3–5], приповерхностного ветра [6, 7] и исследования неоднородности мелкомасштабной структуры поверхностного волнения [8, 9].

Изучению особенностей формирования радиолокационного сигнала с горизонтальной поляризацией в диапазоне длин радиоволн 3 см, отражённого от морской поверхности при больших углах падения, посвящено значительное количество как натурных (см., например, статьи [10–13]), так и лабораторных исследований (см. работы [14–17] и цитируемую там литературу). Эмпирическая модель рассеяния радиолокационного сигнала при скользких углах наблюдения, в которой учитывается вклад обрушений в суммарный сигнал, предложена в статье [18]. Результаты исследований показали, что при таких условиях сигнал формируется не за счёт резонансного брэгговского рассеяния, а в результате радиолокационных отражений от обрушивающихся гребней ветровых волн. В качестве возможных механизмов предложено рассматривать квазизеркальные отражения (однократные [19–21] или многократные [22, 23] отражения от крутых передних склонов обрушивающихся гребней), дифракцию радиоволн на клине [10, 24], рассеяние на брызгах [25]. Однако, несмотря на многочисленные усилия, к настоящему времени так и не сложилось единого понимания причин и механизмов радиолокационного рассеяния при малых углах скольжения. Отчасти

\* dvs-ltd@mail.ru

это связано с недостаточностью радиолокационных измерений для оценки работоспособности того или иного механизма и/или тестирования модели.

В большинстве случаев радиолокационные измерения ограничиваются наблюдениями в направлении на ветер. Исследования во всём азимутальном диапазоне единичны. В качестве примера можно отметить результаты полных азимутальных измерений, представленных в работах [11, 26], где показано, что удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) морской поверхности имеет один явно выраженный максимум при измерениях на ветер, а минимальное её значение наблюдается по ветру. Однако ограниченный диапазон скоростей ветров ( $2\div 10$  м/с) не позволил авторам работ [11, 26] детально исследовать зависимость азимутальной асимметрии сигнала от скорости ветра.

Азимутальная зависимость радиолокационного сигнала в диапазоне длин волн 3 см с горизонтальной поляризацией при больших углах падения изучалась в эксперименте [27], в ходе которого судно выполняло серию циркуляций в открытом океане при скорости ветра  $9\div 10$  м/с. Полученные результаты показали, что при угле падения  $85^\circ$  азимутальная зависимость имеет бимодальный характер с основным максимумом в направлении на ветер. Уровень локального максимума, совпадающего с направлением по ветру, оказался примерно в 5 раз меньше основного максимума. В то же время азимутальная зависимость сигнала при угле падения  $88^\circ$  имела качественно иной характер: наблюдался чёткий минимум в направлении по ветру с уровнем приблизительно в 10 раз меньше уровня максимума при направлении на ветер.

Ветровые зависимости радиолокационного сигнала приведены в работах [28, 29]. Однако в них нет информации о линейности характеристик приёмного тракта и калибровочных зависимостях, что не позволяет пересчитать уровень сигнала в УЭПР и провести сопоставление с данными из других источников.

Для использования радиолокационной информации в практических целях и унификации данных измерений, получаемых при малых углах скольжения, необходимо построение геофизической модельной функции, аналогичной, например, SMOD5 для С-диапазона [30] или NSCAT для Ku-диапазона [31]. Для построения такой функции требуются комплексные радиолокационные измерения при различной геометрии наблюдения морской поверхности (углы падения и азимут) в широком диапазоне гидрометеорологических условий. Такие измерения были проведены в 2015 году с черноморской Стационарной океанографической платформы с использованием РЛС диапазона длин волн 3 см.

Основной целью данной работы является построение геофизической модельной функции для УЭПР морской поверхности в X-диапазоне при горизонтальной поляризации сигнала. Эта функция описывает УЭПР при скользящих углах облучения.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ И АППАРАТУРА

Натурный эксперимент проводился в августе–октябре 2015 года на Стационарной океанографической платформе, расположенной в Голубом заливе в районе посёлка Кацевели (Южный берег Крыма). Стационарная океанографическая платформа установлена примерно в 480 м от ближайшей точки берега и имеет координаты  $44^\circ 23' 38''$  с. ш.,  $33^\circ 59' 09''$  в. д. Глубина в месте проведения измерений составляет около 30 м.

При измерениях использовалась судовая РЛС «Река» [32] ближнего обзора с высоким разрешением по дальности, работающая на горизонтальной поляризации сигнала. В данной РЛС формируется непрерывный линейно модулируемый сигнал на частоте 9430 МГц. Принимаемый отражённый сигнал подвергается усилению и гомодинной обработке. В результате на выходе сверхвысокочастотного блока формируется сигнал биений, спектр которого определяет даль-

Таблица 1. Параметры РЛС

Мощность, МВт	70
Длина волны, см	3
Диапазон частот, МГц	9 300 ÷ 9 500
Излучаемый сигнал	непрерывный с линейной частотной модуляцией
Поляризация излучаемого/ принимаемого сигнала	горизонталь- ная/горизон- -тальная
Ширина диаграммы направ- ленности антенны в горизон- тальной плоскости, градусы	1
Ширина диаграммы направ- ленности антенны в верти- кальной плоскости, градусы	30
Разрешение по дальности, м	0,75
Угловая скорость вращения антенны, градусы/с	150

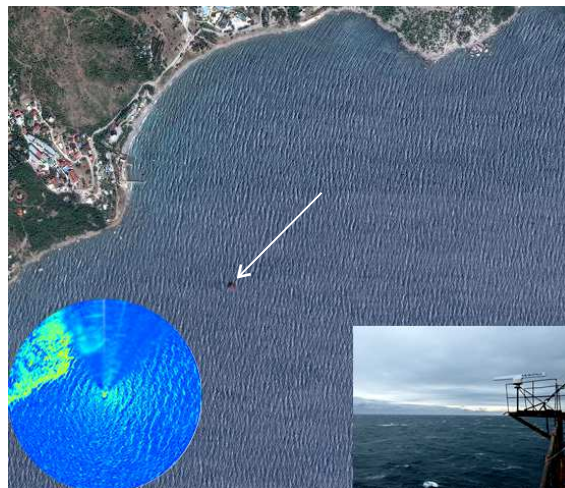


Рис. 1. Район проведения экспериментальных исследований. Стрелкой отмечена океанографическая платформа. На врезках представлены фотография радиолокационной станции (справа) и радиолокационное изображение морской поверхности (слева)

ность и эффективную площадь рассеяния цели. Основные характеристики используемой нами РЛС приведены в табл. 1.

Радиолокатор устанавливался на океанографической платформе на высоте 15 м над уровнем моря и во время эксперимента работал в режиме кругового обзора. На рис. 1 представлен район проведения экспериментальных исследований, а также приведены фотография РЛС и пример изображения морской поверхности. Сектор обзора морской поверхности РЛС находился в пределах от  $55^\circ$  до  $300^\circ$  географического азимута. Тёмная область в верхней части радиолокационного изображения является следствием затенения элементами платформы. Яркая область в верхней левой части связана с отражениями от берега. Сбор метеорологической информации осуществлялся многофункциональным комплексом «Davis 6152EU», расположенным на высоте 23 м над уровнем моря на мачте океанографической платформы. В комплект метеостанции входят измеритель скорости и направления ветра, датчики атмосферного давления, температуры воздуха и воды (на глубине 3 м) и влажности. Измерения метеопараметров усреднялись за 1 мин. Измеренная скорость ветра пересчитывалась в эффективную нейтрально стратифицированную скорость ветра на высоте 10 м по методике [33]. Характеристики поверхностного волнения измерялись с помощью струнного волнографа, расположенного на расстоянии более 10 м до ближайшего элемента платформы. Все результаты измерений синхронно записывались в блок регистрации на базе персонального компьютера. Радиолокационные измерения выполнялись в широком диапазоне скоростей ветра от 4 до 19 м/с. Далее из базы измерений были исключены случаи присутствия зыби, которая может вызывать сильную модуляцию радиолокационного сигнала. Для анализа были отобраны 153 записи. Общая информация об условиях при проведении измерений представлена в табл. 2: дата измерений, средние значения  $\bar{U}$  скорости ветра и его направления  $\varphi_{\bar{U}}$ , высота  $H_S$  значимых волн (33 % обеспеченности), возраст волн  $\beta = C_p/U$ , где  $C_p$  — фазовая скорость на частоте максимума спектра и частота спектрального волнового пика  $f_p$ .

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для предварительной обработки использовался сигнал, поступающий с выхода центрального процессора приёмника РЛС до его поступления в блок визуализации, в котором осуществляется логарифмическое усиление.

Данные измерений разбивались на серии из 76 последовательных радиолокационных изображений. С учётом скорости вращения антенны временной интервал между началами двух изображений равнялся 2,4 с. Таким образом, полное время одной серии составляло около 182 с. Далее анализу подвергались изображения, усреднённые в пределах одной серии. Всего в ходе эксперимента были получены 153 усреднённые серии (радиолокационные сканы).

Для исключения из полученных данных шумов аппаратуры были выполнены записи сигнала в штилевых условиях при полном отсутствии радиолокационных отражений от моря. В результате усреднения 76 «шумовых» сканов рассчитаны уровни шума  $P_N$  для всех азимутов и дальностей в радиолокационном изображении. При предварительной обработке радиолокационных измерений уровень шума вычитался из усреднённых данных.

Для пересчёта сигнала в каждом пикселе усреднённого изображения в УЭПР морской поверхности  $\sigma_0$  была выполнена калибровка РЛС, в ходе которой использовался уголкового отражателя с квадратными гранями с длиной ребра 0,2 м. Эффективная площадь рассеяния отражателя составила  $\sigma_{\text{corn}} = 67 \text{ м}^2$ . В штилевую погоду мишень размещалась на неотражающей поплавке на расстояниях от 150 до 600 м от платформы. Мощность  $P_R$  принимаемого сигнала от уголкового отражателя даётся основной радиолокационной формулой

$$P_R = P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma_{\text{corn}} (4\pi)^{-3} R^{-4}, \quad (1)$$

где  $P_T$  — мощность излучения,  $G_T$  и  $G_R$  — диаграммы направленности по мощности передатчика и приёмника соответственно,  $\lambda$  — длина волны радиолокационной станции,  $R$  — дальность. Зависимость (1) предполагает, что тракт РЛС до блока регистрации сигнала является линейным. Если же характеристики приёмника радиолокатора являются нелинейными, то зависимость мощности сигнала от дальности может отличаться от функции  $R^{-4}$ . В этом случае расчёт значений  $\sigma_0$  по данным радиолокационных измерений окажется проблематичным.

Характеристики приёмного тракта используемой в эксперименте РЛС нам неизвестны. Поэтому для оценки его линейности мы проанализировали зависимость величины  $P_R/\sigma_{\text{corn}}$  от дальности до уголкового отражателя, представленные на рис. 2. Данные измерений могут быть описаны степенной функцией вида

$$P_R/\sigma_{\text{corn}} = CR^{-\alpha}. \quad (2)$$

Эта зависимость с параметрами  $C = 8 \cdot 10^9$  и  $\alpha = 3,3$ , оценёнными методом наименьших квадратов, показана на рис. 2. Очевидно, что константа  $C$  определяется не только величинами  $P_T$ ,  $G_T$ ,

Таблица 2. Условия проведения измерений

Дата (2015 г.)	$\bar{U}$ , м/с	$\phi_{\bar{U}}$ , градусы	$H_S$ , м	$\beta$	$f_p$ , градусы
06.09	7,2	70	0,4	0,8	0,27
10.09	12,0	80	1,2	0,7	0,22
12.09	16,0	75	1,4	0,5	0,18
13.09	10,4	74	1,3	0,8	0,18
15.09	6,5	86	0,7	0,9	0,27
16.09	5,8	82	0,5	1,0	0,27
17.09	6,0	100	0,5	1,0	0,27
18.09	6,7	90	0,6	0,8	0,28
19.09	11,1	90	0,7	0,6	0,26
20.09	7,0	90	0,7	0,7	0,33
04.10	6,8	90	0,4	0,7	0,31
08.10	13,0	73	1,4	0,8	0,16
12.10	15,5	66	2,0	0,6	0,15

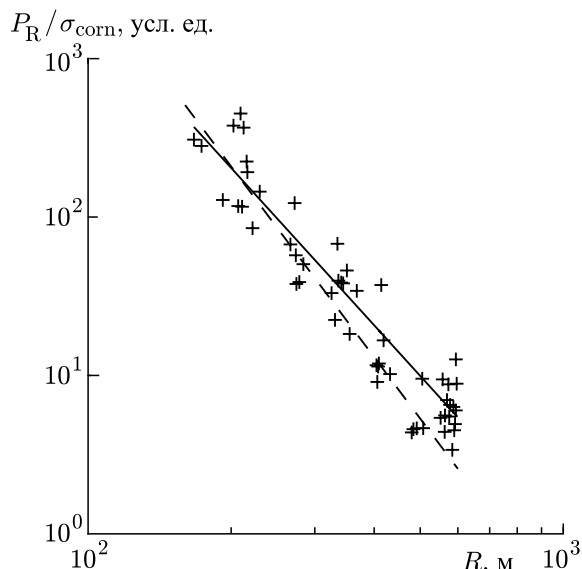


Рис. 2. Зависимость мощности принимаемого сигнала (символы +), нормированного на эффективную площадь рассеяния уголкового отражателя, от расстояния до цели. Сплошной и штриховой линиями показаны аппроксимации функциями, пропорциональными  $R^{-3,3}$  и  $R^{-4}$  соответственно

и (3) значения УЭПР морской поверхности для всех точек радиолокационного изображения находились по формуле

$$\sigma_0 = C' P_R R^{2,3}, \tag{4}$$

где  $C' = 1/[2C\Delta L \operatorname{tg}(\Delta\phi/2)]$ . В дальнейшем для анализа измерений мы использовали только те данные, для которых уровень сигнала превышал уровень шума более чем в два раза, т.е.  $\sigma_0/\sigma_0^N > 2$ . Здесь  $\sigma_0^N$  — УЭПР, рассчитанные по (4), где величина  $P_R$  заменена значением шумов  $P_N$  для каждого пикселя усреднённого радиолокационного изображения. В наших экспериментах отношение  $\sigma_0/\sigma_0^N < 2$  наблюдалось для скорости ветра менее  $5\div 6$  м/с при измерениях по ветру и углах падения  $\theta > 87^\circ$ . Отметим, что анализируемые ниже значения  $\sigma_0$  «очищены» от шума, т.е. из значений (4) вычтен уровень шума  $\sigma_0^N$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

При зондировании под большими углами падения, характерными для измерений с судов или морских платформ, радиолокационный сигнал с горизонтальной поляризацией имеет выраженную спекл-структуру, формируемую всплесками с уровнем в  $10\div 100$  раз выше среднего значения (см., например, [34]). В наших измерениях превышение  $\sigma_0$  над средним значением во всплесках сигнала достигало 300 раз. Рассмотрим зависимости  $\sigma_0$  от скорости ветра, азимута  $\phi$  и угла падения  $\theta$ .

#### 3.1. Зависимости УЭПР от угла падения

Зависимость УЭПР от угла падения при наблюдениях на ветер ( $\sigma_0^{\text{up}}$ ), перпендикулярно ветру ( $\sigma_0^{\text{cross}}$ ) и по ветру ( $\sigma_0^{\text{down}}$ ) в диапазоне скоростей ветра  $U = 7\pm 1$  м/с,  $11\pm 1$  м/с и  $15\pm 1$  м/с пред-

дetermined by  $G_R, \lambda$ , но и характеристиками используемого радиолокатора. В наших измерениях сигнал спадает с увеличением дальности как  $R^{-3,3}$  (сплошная линия на рис. 2), что несколько отличается от ожидаемого поведения  $R^{-4}$ , показанного штриховой линией. Это подтверждает нелинейность характеристик приёмного тракта используемой РЛС, которая должна учитываться при дальнейших оценках эффективной площади рассеяния морской поверхности.

Расчёт эффективной площади рассеяния морской поверхности при наших измерениях с учётом (2) выполнялся по формуле

$$\sigma = C^{-1} P_R R^{3,3}. \tag{3}$$

Нормируя  $\sigma$  на площадь облучаемого участка морской поверхности, запишем удельную эффективную площадь рассеяния  $\sigma_0$  в виде

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{2\Delta L R \operatorname{tg}(\Delta\phi/2)},$$

где  $\Delta L$  — разрешение РЛС по дальности,  $\Delta\phi$  — разрешение по азимутальному углу. С учётом (2)

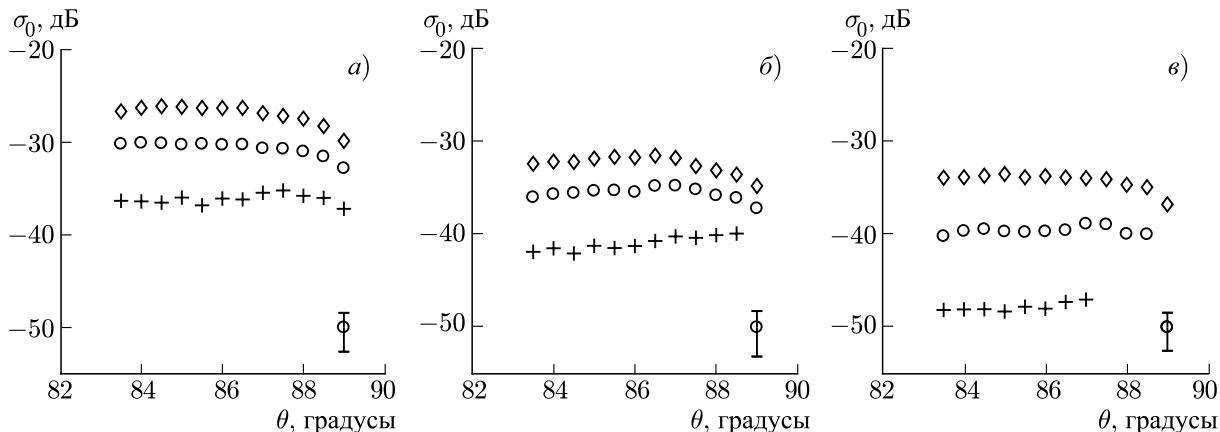
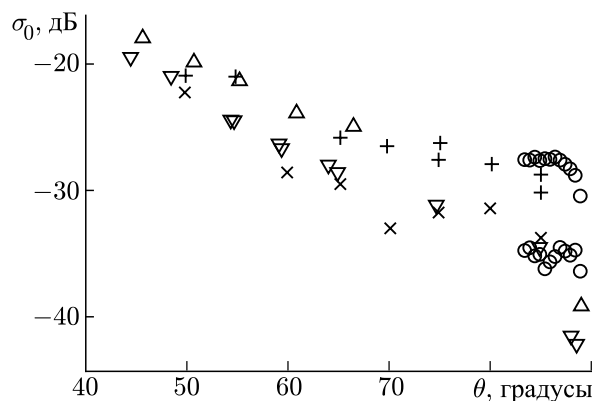


Рис. 3. Зависимость УЭПР от угла падения при измерениях на ветер (а), перпендикулярно ветру (б) и по ветру (в). Символами +, o, diamond обозначены данные, полученные в диапазоне скоростей ветра  $U = 7 \pm 1$  м/с,  $11 \pm 1$  м/с и  $15 \pm 1$  м/с соответственно

Рис. 4. Зависимость УЭПР от угла падения в направлении на ветер. Символами o показаны наши результаты, символами  $\nabla$  и  $\Delta$  — данные работы [25] для скорости ветра 8 и 12 м/с, символами  $\times$  и + — данные работы [26] для скорости ветра 6 ÷ 8 и 12 ÷ 14 м/с соответственно. Нижние и верхние группы символов o получены при  $\bar{U} = 8$  и 12 м/с соответственно



ставлена на рис. 3. Каждая экспериментальная точка соответствует средней величине, рассчитанной для диапазона указанных выше скоростей ветра. Среднеквадратичное отклонение УЭПР в каждом интервале углов падения, приведённое в правой нижней части рис. 3, составляет около 3 дБ. Отсутствие экспериментальных точек на рис. 3в при  $U = 7$  м/с и углах обзора более  $87^\circ$  связано с тем, что при данных условиях сигнал сопоставим с уровнем шума РЛС.

Как следует из рис. 3, УЭПР морской поверхности не зависит от угла падения при  $\theta < 87^\circ$ ; при бóльших  $\theta$  УЭПР падает. Подобное независимое от угла падения поведение сигнала с горизонтальной поляризацией при углах падения  $84^\circ \div 87^\circ$  наблюдалось ранее в работах [25, 35]. В то же время для вертикальной поляризации падение сигнала существенно, примерно до 10 дБ [9, 35].

На рис. 4 приведено сопоставление полученных значений  $\sigma_0$  при зондировании на ветер с данными измерений [25, 26]. Наши измерения УЭПР совпадают с [25, 26], которые также демонстрируют падение величины  $\sigma_0$  при  $\theta$  более  $87^\circ \div 88^\circ$ .

### 3.2. Ветровые зависимости УЭПР

На рис. 5 приведён пример ветровых зависимостей  $\sigma_0^{up}$ ,  $\sigma_0^{cross}$  и  $\sigma_0^{down}$  для углов падения  $83,5^\circ$ ,  $85,5^\circ$  и  $87,5^\circ$ , а также их аппроксимации зависимостями  $\sigma_0(\theta, \phi) \approx U^{\alpha(\phi)}$  (см., например, [36]).

Примечательным результатом, следующим из рис. 5, является то, что наклон ветровой зависимости УЭПР по ветру круче, чем при наблюдениях на ветер и перпендикулярно ему. Показатели степени ветровой зависимости  $\sigma_0$  для направлений зондирования против ветра, перпендикулярно

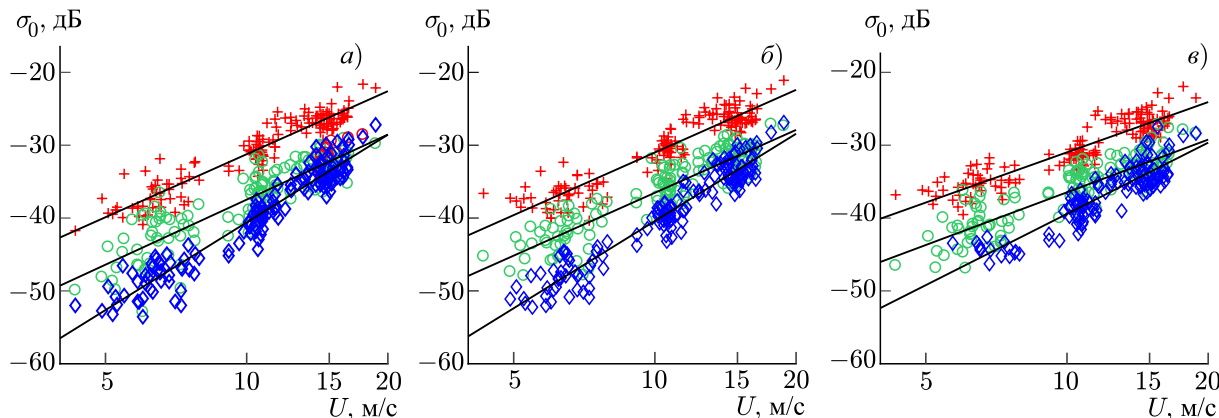


Рис. 5. Зависимость УЭПР от скорости ветра при зондировании на ветер (символы +), перпендикулярно ветру (o) и по ветру (diamond) для углов падения 83,5° (a), 85,5° (b) и 87,5° (c). Сплошные линии показывают аппроксимации степенными функциями с показателями степени, приведёнными в табл. 3

Таблица 3. Показатели степени ветровой зависимости УЭПР

$\theta, ^\circ$	83,5	84,0	84,5	85,0	85,5	86,0	86,5	87,0	87,5
$\phi = 0^\circ$	2,9	3,0	3,0	2,8	2,9	2,8	2,7	2,4	2,3
$\phi = 90^\circ$	3,0	3,0	3,0	2,8	2,9	2,8	2,8	2,5	2,4
$\phi = 180^\circ$	4,0	4,0	4,1	4,1	4,0	3,9	3,7	3,6	3,2

ветру и по ветру при различных  $\theta$  приведены в табл. 3. Средняя величина  $\overline{\alpha(\phi)}$  при измерениях на ветер и перпендикулярно ветру равна 2,8, а при измерениях по ветру  $\overline{\alpha(180^\circ)} = 3,8$ , что заметно превышает показатели степени для  $\sigma_0^{up}$  и  $\sigma_0^{cross}$ .

Отметим, что полученные нами значения  $\alpha(\phi)$  при направлениях против ветра и перпендикулярно ему совпадают с результатами модельных расчётов ( $\alpha = 3$  [37, 38]) и натурных измерений ( $\alpha = 3,2 \pm 0,8$  [39]) при анализе небрэгговской компоненты рассеяния, связанной с обрушениями. Это косвенно подтверждает определяющую роль обрушений волн в формировании радиолокационного сигнала при скользких углах облучения, как было указано ранее в ряде работ (см., например, [37, 38] и цитируемую там литературу).

Особенности ветровой зависимости УЭПР при различных азимутах отражаются в её асимметрии, характеризуемой отношениями  $\sigma_0^{up}/\sigma_0^{down}$ ,  $\sigma_0^{up}/\sigma_0^{cross}$  и  $\sigma_0^{cross}/\sigma_0^{down}$ . Ветровые зависимости указанных величин показаны на рис. 6. Из него следует, что значения  $\sigma_0^{up}/\sigma_0^{cross}$  очень слабо зависят от скорости ветра и составляют около 5 дБ. В то же время с увеличением скорости ветра от 7 до 18 м/с величина  $\sigma_0^{up}/\sigma_0^{down}$  уменьшается с 11 до 6 дБ, а величина  $\sigma_0^{cross}/\sigma_0^{down}$  — с 7 до 0,3 дБ. На рис. 6 также показаны данные из работы [26], полученные при  $\theta = 88^\circ$ . Видно их хорошее соответствие с нашими результатами.

#### 4. ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ

Данные измерений могут быть параметризованы в виде эмпирической радиолокационной функции, которая традиционно представляется в виде ограниченного ряда Фурье (см., например, [36]):

$$\sigma_0(U, \theta, \phi) = A_0(U, \theta) + A_1(U, \theta) \cos(\phi) + A_2(U, \theta) \cos(2\phi), \tag{5}$$

где коэффициенты  $A_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) являются функциями угла падения и скорости ветра,  $\phi$  — азимут относительно скорости ветра, значение  $\phi = 0$  соответствует измерениям на ветер. За-

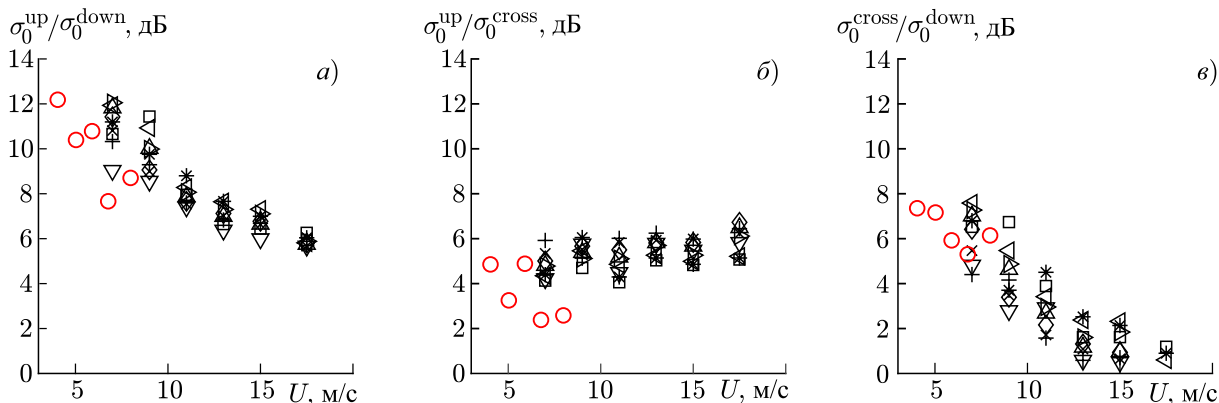


Рис. 6. Ветровая зависимость отношений  $\sigma_0^{\text{up}}/\sigma_0^{\text{down}}$  (а),  $\sigma_0^{\text{up}}/\sigma_0^{\text{cross}}$  (б) и  $\sigma_0^{\text{cross}}/\sigma_0^{\text{down}}$  (в). Символы + соответствуют углу обзора морской поверхности  $83,5^\circ$ ,  $\times$  — углу  $84,0^\circ$ ,  $\diamond$  — углу  $84,5^\circ$ ,  $\Delta$  — углу  $85,0^\circ$ ,  $\triangleright$  — углу  $85,5^\circ$ ,  $\triangleleft$  — углу  $86,0^\circ$ , \* — углу  $86,5^\circ$ ,  $\square$  — углу  $87,0^\circ$ ,  $\nabla$  — углу  $87,5^\circ$ ,  $\circ$  — данные работы [26]

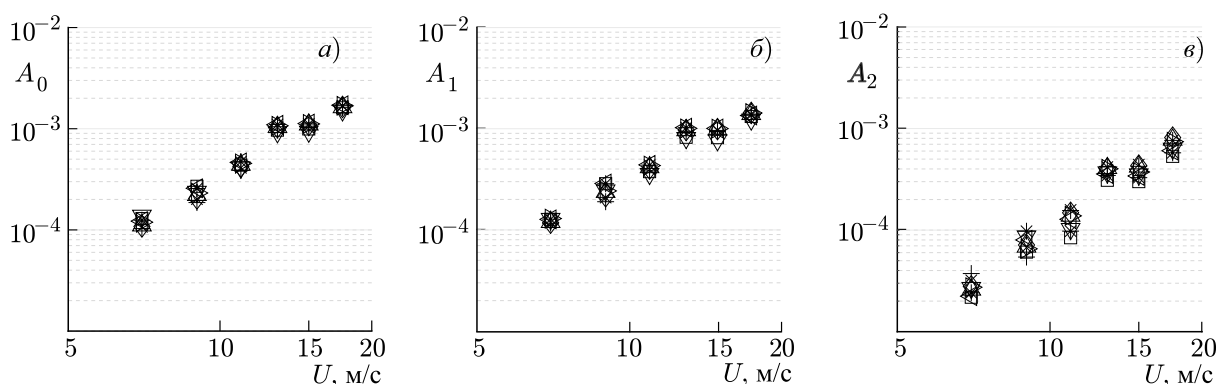


Рис. 7. Ветровая зависимость коэффициентов  $A_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) при различных углах падения, приведённых в подписи к рис. 6

Таблица 4. Параметры ветровой зависимости коэффициентов  $A_i$

$\theta, ^\circ$	83,5	84,0	84,5	85,0	85,5	86,0	86,5	87,0	87,5
$n_0$	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,8	2,7
$10^7 m_0$	2,1	2,3	2,4	2,8	3,4	4,0	4,3	6,0	7,0
$n_1$	2,9	2,9	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5
$10^7 m_1$	4,1	4,4	4,3	5,4	6,3	8,1	8,4	10,4	10,3
$n_2$	3,5	3,6	3,7	3,8	3,6	3,5	3,3	3,5	3,4
$10^8 m_2$	3,2	2,9	2,1	1,8	2,3	2,8	4,4	2,4	3,9

висимость значений  $A_i$  от скорости ветра для различных углов падения приведена на рис. 7, величины  $A_i$  рассчитаны по реализациям  $\sigma_0(U, \phi)$ , измеряемым в интервалах скоростей ветра  $7 \pm 1$  м/с,  $9 \pm 1$  м/с,  $11 \pm 1$  м/с,  $13 \pm 1$  м/с,  $15 \pm 1$  м/с и  $17,5 \pm 1$  м/с.

Как следует из рис. 7, коэффициенты  $A_i$  практически не зависят от  $\theta$ . Ветровая зависимость значений  $A_i$  аппроксимирована степенной функцией  $A_i = m_i(U[\text{м/с}])^{n_i}$ , где коэффициенты  $m_i$  и  $n_i$  приведены в табл. 4.

На рис. 8 показаны азимутальные зависимости  $\sigma_0$  при  $\theta = 84^\circ$  в диапазонах скоростей ветра  $U = 7 \pm 1$  м/с,  $15 \pm 1$  м/с и  $17,5 \pm 1$  м/с, а также аппроксимирующие зависимости (5).

При слабых и умеренных скоростях ветра (см. рис. 8а) азимутальная зависимость УЭПР



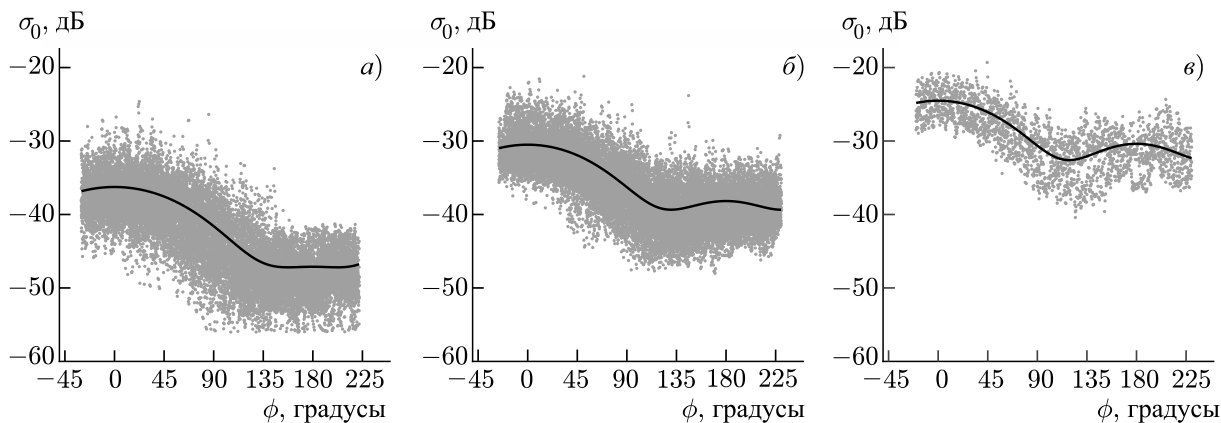


Рис. 8. Зависимость УЭПР от азимута для  $\theta = 84^\circ$  в диапазоне скоростей ветра  $U = 7 \pm 1$  м/с (а),  $15 \pm 1$  м/с (б) и  $17,5 \pm 1$  м/с (в). Линиями показаны аппроксимации формулой (5)

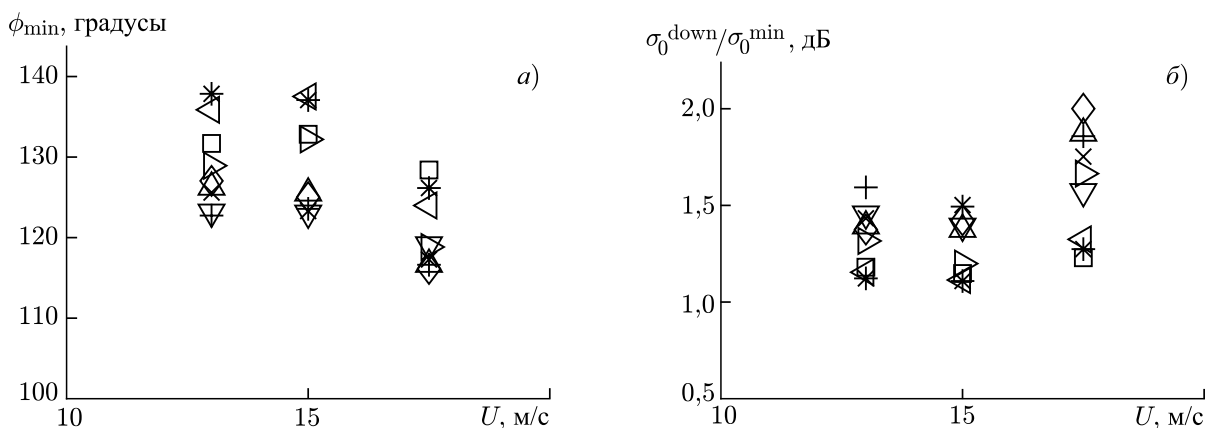


Рис. 9. Зависимости азимута минимума УЭПР (а) и отношения УЭПР в направлении по ветру к минимальной УЭПР (б) от скорости ветра. Обозначения те же, что на рис. 6

имеет один явно выраженный максимум при измерениях на ветер, минимальное её значение наблюдается по ветру. При усилении ветра (см. рис. 8б и в) азимутальная зависимость приобретает двуимодальный характер: появляется второй локальный максимум в направлении по ветру ( $\phi = 180^\circ$ ). Отметим, что при больших  $U$  (см. рис. 8б и в) минимальное значение  $\sigma_0$  наблюдается не точно при направлении перпендикулярно ветру ( $\phi = 90^\circ$ ), а несколько смещено в сторону направления по ветру. Трансформация азимутального распределения УЭПР от унимодального (при малых ветрах) к бимодальному (при сильных ветрах) согласуется с отмеченной ранее более сильной ветровой зависимостью УЭПР в направлении по ветру по сравнению с направлениями против и перпендикулярно ветру (см. рис. 6). Подобное поведение функции  $\sigma_0(\phi)$  также наблюдалось в эксперименте [27] с использованием РЛС 3-сантиметрового диапазона длин волн: было установлено, что при  $\theta = 88^\circ \div 89^\circ$  азимутальная зависимость при горизонтальной поляризации сигнала при излучении и приёме имела одноимодальный характер с минимумом при  $\phi = 180^\circ$ , в то время как при  $\theta = 85^\circ$  и  $\phi = 180^\circ$  наблюдался второй максимум. Одноимодальное поведение зависимости  $\sigma_0(\phi)$  отмечено в работах [11, 26], однако эти измерения проведены в ограниченном диапазоне скоростей ветра от 2 до 10 м/с.

Отличие азимута минимума УЭПР от направления перпендикулярно ветру может представлять определённый интерес при последующих тестированиях моделей радиолокационного рассеяния при малых углах скольжения, поэтому остановимся на этом более подробно. Используя

модельную функцию (5), значения азимута минимума УЭПР  $\phi_{\min}$  можно записать как  $\phi_{\min} = \arccos[-A_1/(4A_2)]$ . Здесь необходимо отметить следующее. Азимутальные характеристики при слабых и умеренных ветрах, как отмечалось выше, практически одномодальны, что хорошо видно на рис. 8а. В этом случае значения  $\sigma_0(\phi)$  в интервале углов  $130^\circ < \phi \leq 180^\circ$  практически не меняются, а  $\sigma_0^{\text{down}}/\sigma_0^{\text{min}} \sim 1$ , где  $\sigma_0^{\text{min}} = \sigma_0(\phi_{\min})$  — УЭПР при  $\phi_{\min}$ . При таких условиях наблюдений определение  $\phi_{\min}$  является проблематичным, что не позволяет исследовать поведение положения минимума функции  $\sigma_0(\phi)$  при  $U < 10 \div 11$  м/с. При больших ветрах с появлением второго локального максимума (см. рис. 8б и в) найденные значения  $\phi_{\min}$  являются более достоверными.

На рис. 9 представлены зависимости  $\phi_{\min}$  и  $\sigma_0^{\text{down}}/\sigma_0^{\text{min}}$  от скорости ветра при  $U > 11$  м/с. Из рис. 9а следует, что при сильных ветрах разброс значений  $\phi_{\min}$  незначительный и они лежат в пределах  $120^\circ \div 140^\circ$ . При этом с увеличением скорости  $U$  азимутальное положение минимума УЭПР смещается в направлении перпендикулярно ветру. Отношение  $\sigma_0^{\text{down}}/\sigma_0^{\text{min}}$ , показанное на рис. 9б, с ростом ветра увеличиваются, и его среднее значение составляет около 1,6 при  $\bar{U} = 17,5$  м/с.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследований УЭПР морской поверхности с помощью РЛС 3-сантиметрового диапазона длин волн с горизонтальной поляризацией излучения при передаче и приёме сигнала при больших углах падения, характерных для береговых или установленных на морских платформах станций. Эксперимент выполнялся в 2015 году на Стационарной океанографической платформе в районе посёлка Кацивели (Южный берег Крыма). Совместно с радиолокационными съёмками синхронно регистрировались характеристики ветрового волнения и параметры атмосферы. Совместный анализ массивов полученных радиолокационных данных и скоростей ветра показывает, что УЭПР морской поверхности при больших углах падения (более  $83^\circ$ ) хорошо описывается ограниченным рядом Фурье, широко используемым для обработки и анализа радиолокационных данных при малых и умеренных углах падения (например, в модели СМОД5). Для нашего случая больших углов падения определены коэффициенты азимутального изменения УЭПР (5), которые оказались практически независимыми от угла падения. Ветровая зависимость значений  $A_i$  описывается степенной функцией  $A_i = m_i U^{n_i}$ . Зависимости УЭПР от  $U$  в направлениях на ветер, перпендикулярно ветру и по ветру также близки к степенным функциям, но если в первых двух случаях показатель степени равен примерно 2,8, то в направлении  $\phi = 180^\circ$  он составляет 3,8.

При слабых и умеренных ветрах функция  $\sigma_0(\phi)$  имеет один максимум, соответствующий  $\sigma_0^{\text{up}}$ . При сильных ветрах в азимутальной зависимости УЭПР появляется второй максимум при  $\phi = 180^\circ$ , а минимальное значение  $\sigma_0(\phi)$  смещается к  $\sigma_0^{\text{down}}$ , что не согласуется с результатами других авторов. Физические механизмы, приводящие к сдвигу значения  $\phi_{\min}$ , требуют дальнейших детальных исследований. В качестве рабочей гипотезы сделаем предположение, что положение минимума функции  $\sigma_0(\phi)$  может также определяться как азимутальной зависимостью эффективной площади рассеяния обрушения, так и ориентацией обрушений ветровых волн относительно направления ветра.

Полученные в ходе эксперимента результаты показывают, что отношение  $\sigma_0^{\text{up}}/\sigma_0^{\text{cross}}$  слабо зависит от скорости ветра и составляет около 5 дБ. В то же время значения  $\sigma_0^{\text{up}}/\sigma_0^{\text{down}}$  и  $\sigma_0^{\text{cross}}/\sigma_0^{\text{down}}$  с усилением ветра существенно снижаются.

Приводимые в работе натурные данные были получены при экспериментальных исследованиях, выполненных в рамках работы по государственному заданию на 2015–2017 годы (тема

0827–2014–0010). Обработка данных, построение эмпирической модели УЭПР поверхности моря при малых углах скольжения и анализ радиолокационных зависимостей, полученных при различных условиях наблюдений, выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 15–17–20020).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dankert H., Rosenthal W. // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2004. V. 109, No. C4. Art. no. C04016.
2. Nieto-Borge J. C., Hessner K., Jarabo-Amores P., de La Mata-Moya D. // *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2008. V. 2, No. 1. P. 35.
3. Senet C., Seemann J., Ziemer F. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2001. V. 39, No. 3. P. 492.
4. Lund B., Graber H. C., Tamura H., et al. // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120. P. 8466.
5. Ивонин Д. В., Чернышов П. В., Куклев С. Б., Мысленков С. А. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 2. С. 53.
6. Vican-Bueno R., Horstmann J., Terril E., et al. // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. V. 30, No 1. P. 127.
7. Chen Z., He Y., Zhang B., Qiu Z. // *Ocean Engineering*. 2015. V. 96. P. 79.
8. Гуськов М. П., Жидко Ю. М., Родин В. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1988. Т. 31, № 11. С. 1318.
9. Гуськов М. П., Жидко Ю. М., Иванова Г. К. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1990. Т. 33, № 9. С. 1013.
10. Kalmykov A. I., Pustovoytenko V. V. // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 1960.
11. Trizna D. B., Carlson D. J. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1996. V. 34, No. 3. P. 747.
12. Lee P. H. Y., Barter J. D., Beach K. L., et al. // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, No. C2. P. 2591.
13. Liu Y., Frasier S. J., McIntosh R. E. // *IEEE Trans. Anten. Propag.* 1998. V. 46, No. 1. P. 27.
14. Trizna D. B., Hansen J. P., Hwang P., Wu J. // *J. Geophys. Res. Oceans*. 1991. V. 96, No. C7. P. 12529.
15. Lee P. H. Y., Barter J. D., Beach K. L., et al. // *IEEE Trans. Anten. Propag.* 1998. V. 46, No. 1. P. 14.
16. Fuchs J., Regas D., Waseda T., et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. V. 37, No. 5. P. 2442.
17. Sletten M. A., West J. C., Liu X., Duncan J. H. // *Radio Science*. 2003. V. 38, No. 6. Art. no. 1110.
18. Ермошкин А. В., Баханов В. В., Богатов Н. А. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 4. С. 51.
19. Kwoh D. S., Lake B. M. // *IEEE J. Oceanic Eng.* 1984. V. 9, No. 5. P. 291.
20. Melville W. K., Loewen M. R., Felizardo F. C., et al. // *Nature*. 1988. V. 336. P. 54.
21. Кравцов Ю. А., Митягина М. И., Чурюмов А. Н. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1999. Т. 42, № 3. С. 240.
22. Trizna D. B. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997. V. 35, No. 5. P. 1232.
23. Churyumov A. N., Kravtsov Y. A. // *Waves in Random Media*. 2000. V. 10, No. 1. P. 1.
24. Lyzenga D. R., Ericson E. A. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998. V. 36, No. 2. P. 636.
25. Plant W. J. // *Waves in Random Media*. 2003. V. 13. P. 339.
26. Plant W. J., Keller W. C., Hayes K., Chatham G. // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. Art. no. C09032.
27. Малиновский В. В., Розенберг А. Д. // *Морской гидрофизический журн.* 1990. № 4. С. 50.
28. Dankert H., Horstmann J., Rosenthal W. // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, No. C11. Art. no. 3352.
29. Lund B., Graber H. C., Romeiser R. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2012. V. 50, No. 10. P. 3800.

30. Hersbach H. // J. Atmos. Ocean. Technol. 2010. V. 27. P. 721.
31. Wentz F. J., Smith D. K. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, No. C5. P. 11499.
32. Доценко В. В., Носов Д. М., Осипов М. В. и др. // Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 13–17 сентября 2000 года, Севастополь. С. 1 253.
33. Fairall C. W., Bradley E. F., Hare J. E., et al. // J. Clim. 2003. V. 16. P. 571.
34. Smith M. J., Poulter E. M., McGregor J. A. // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, No. C6. P. 14 269.
35. Hwang P. A., Sletten M. A., Toporkov J. V. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, No. C2. Art. no. C02003.
36. Wentz F. J., Peteherych S., Thomas L. A. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89, No. C3. P. 3 689.
37. Phillips O. M. // J. Phys. Ocean. 1988. V. 18, No. 8. P. 1 065.
38. Kudryavtsev V. N., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. C3. Art. no. 8054.
39. Jessup A. T., Melville W. K., Keller W. C. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, No. C11. P. 20 561.

Поступила в редакцию 23 августа 2017 г.; принята в печать 16 февраля 2018 г.

### EMPIRICAL MODEL OF RADAR SCATTERING IN THE 3-cm WAVELENGTH RANGE ON THE SEA AT HIGH INCIDENCE ANGLES

*V. V. Malinovsky, A. E. Korinenko, and V. N. Kudryavtsev*

We present the results of radar investigation of scattering of electromagnetic radiation in the 3-cm wavelength range by the sea surface in the case of horizontal polarization of the transmitted and received signals and high incidence angles. Full-scale measurements were performed on the Stationary Oceanographic Platform in the Black Sea in the range of incidence angles from  $84.0^\circ$  to  $87.5^\circ$  at wind velocities from 4 to 19 m/s. Only the conditions of wind waves with no swelling were considered. It is shown that the specific scattering cross section is almost invariant, when the incidence angle varies, but has a strong wind dependence. It can be described by the power function with the exponents 2.8 and 3.8 at the windward and downwind probing directions, respectively. At weak and moderate winds, the azimuthal dependence of the specific scattering cross section is characterized by the unimodal function with one maximum in the windward direction and a minimum in the downwind direction. At wind velocities exceeding 10 m/s, the azimuthal dependence of the scattering cross section becomes bimodal and has a minimum at the azimuth being close to the direction perpendicular to the wind. The measured values of the specific scattering cross section are approximated by a bounded Fourier series with respect to the azimuth, in which the expansion coefficients depend on the wind velocity and inclination angle.