

Ю.Ю. Юровский, В.В. Малиновский

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН НА
ОБРУШЕНИЯХ МОРСКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН**

Приводятся результаты натурного исследования обратного рассеяния радиоволн миллиметрового диапазона (длина волны 8 мм) на обрушениях морских ветровых волн. Выполнено сопоставление геометрических параметров обрушений (длины, площади, ориентации) и их эффективной площади рассеяния (ЭПР) на вертикальной и горизонтальной поляризациях излучения и приема. При больших углах падения (70°) выявлена близкая к линейной зависимость между длиной обрушающегося гребня и его ЭПР. В диапазоне умеренных углов падения (45°) и в присутствии на морской поверхности масляной пленки, подавляющей маскирующие действие резонансного рассеяния, эта связь близка к квадратичной. Показано, что азимутальная зависимость ЭПР обрушения проявляется только при умеренных углах падения. Показано, что результаты эксперимента можно объяснить с помощью модели квазизеркальных отражений, если учесть влияние рассеяния на облаках брызг, формируемых над обрушениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *дистанционное зондирование, обрушения ветровых волн.*

Введение. Влияние обрушений ветровых волн на радиолокационный (РЛ-) сигнал, рассеянный морем, известно со времен самых ранних исследований взаимодействия радиоволн с морской поверхностью. Одним из первых предположений о природе так называемого «морского эха» была гипотеза о рассеянии падающего излучения на брызгах, образующихся в результате обрушений волн [1]¹⁾. Проявление обрушений в сигнале РЛС дает возможность исследовать те океанологические процессы, которые так или иначе связаны с обрушениями ветровых волн. Например, появление внутренних волны в стратифицированном океане вызывает модуляцию поля обрушений ветровых волн на поверхности, которая хорошо проявляется в РЛ-изображениях. Это позволяет исследовать характеристики внутренних волн [2] и параметры термоклина [3]. Конвергентные и дивергентные зоны морских течений характеризуются изменением интенсивности обрушения волн, что позволяет привлекать РЛ-методы для поиска океанических фронтов и связанных с ними районов повышенной биопродуктивности.

Эти примеры указывают на то, что обрушения ветровых волн целесообразно рассматривать в качестве информативного параметра при анализе РЛ-данных. На сегодняшний день, для решения подобного рода задач используется лишь качественная связь между обрушениями и интенсивностью РЛ-отражений – известно, что появление обрушения вызывает всплеск РЛ-сигнала (см., например, [4]). Очевидно, что установление количественной связи, т.е. построение РЛ-модели «барашка», позволит более точно восстанавливать параметры поля обрушений ветровых волн, а значит более точно оценивать характеристики связанных с ними океанологических процессов.

Изучение механизмов рассеяния радиоволн на морской поверхности в сантиметровом диапазоне показало, что при умеренных углах падения (угол между вертикалью и лучом зрения) основным рассеивателем являются волны, длина которых удовлетворяет условию брэгговского резонанса [5]. Предложенная двухмасштабная модель [6, 7], учитывающая модуляцию уклонов длинными энергонесущими волнами, вместе с теорией зеркальных отражений [8, 9] достаточно точно предсказывают результаты наблюдений во всем диапазоне углов падения для длин волн вплоть до ~ 10 см²).

При более коротких волнах в области умеренных и больших углов падения наблюдаются существенные отклонения экспериментальных значений эффективной площади рассеяния (ЭПР) от теоретических в сторону более высоких величин, которые проявляются в виде всплесков РЛ-сигнала [4], и так или иначе связываются с рассеянием в зонах обрушений [9]. Для теоретического описания этого эффекта был рассмотрен ряд различных механизмов, описывающих те или иные стороны изучаемого «многогранного» явления. В частности, рассматривалась дифракция на заостренных гребнях волн перед их опрокидыванием [4, 10, 11], резонансное рассеяние на шероховатости «барашка» [12, 13], квазизеркальное отражение от передних склонов обрушивающихся волн [14, 15] и от возмущенной поверхности перед ними [16], рассеяние на брызгах, генерируемых обрушением [17 – 19]. Несмотря на множество гипотез единого мнения насчет механизма рассеяния до сих пор нет.

В связи с этим основной целью представленной работы является исследование возможных механизмов обратного рассеяния РЛ-сигнала на обрушениях. Рассматривается миллиметровый диапазон радиоволн, так как именно в нем наблюдаются наибольшие расхождения между теорией (в рамках двухмасштабной модели) и экспериментом, и влияние обрушений на РЛ-сигнал миллиметрового диапазона должно быть более значимым, чем в более длинноволновых диапазонах. В основу исследования положен анализ связи между геометрическими характеристиками обрушений (пространственным масштабом, азимутальной ориентацией) и их рассеивающими свойствами (ЭПР, поляризационное отношение), полученной в результате серии специализированных натурных экспериментальных работ.

Методика проведения эксперимента. Натурные эксперименты проводились в 2008 – 2009 гг. в Черном море на стационарной океанографической платформе ЭО МГИ НАН Украины, расположенной на расстоянии около 600 м от берега в акватории Голубого Залива (поселок городского типа Кацивели).

РЛ-измерения выполнялись с помощью РЛС непрерывного излучения, работающей в миллиметровом диапазоне радиоволн (длине волны ~ 8 мм).

В качестве источника сигнала в передающей части РЛС применен генератор на диоде Ганна. В волноводном тракте, соединяющем генератор с излучающей (передающей) антенной, плоскость поляризации излучаемого сигнала развернута на угол 45° относительно вертикали. Это позволяет рассматривать излучаемый сигнал в виде суммы одновременно существующих сигналов, имеющих вертикальную (ВП) и горизонтальную (ГП) поляризации. Таким образом, РЛС одновременно излучает два зондирующих сигнала.

ла, один из которых имеет вертикальную поляризацию, а второй – горизонтальную.

Приемный тракт РЛС построен на основе приемного устройства «с нулевой промежуточной частотой», в котором в качестве сигнала гетеродина используется излучаемый сигнал. В СВЧ-части приемного тракта установлены поляризационные фильтры – поляризаторы, выделяющие из принимаемого сигнала его составляющие, имеющие вертикальную и горизонтальную поляризации³⁾, которые в дальнейшем и рассматриваются нами.

Каждый из поляризационных каналов, в свою очередь имеет синхронный и смещенный каналы, что позволяет определять знак доплеровского смещения частоты.

Таким образом, РЛС имеет четыре выходных канала, сигналы каждого из них оцифровываются с частотой дискретизации 10 кГц на канал.

Приемная и передающая антенны РЛС представляют собой два сонаправленных конических рупора (диаметр раскрытия 16,5 см).

Калибровка РЛС осуществлялась с помощью семи мишеней с известной ЭПР: четырех уголковых (с длиной ребра, соответственно, 12, 10 и 7 см) и трех сферических (диаметром, соответственно, 10; 3,9 и 1,95 см). При калибровке РЛС крепилась на штативе таким образом, чтобы в диаграмму направленности попадал только эталонный рассеиватель (мишень), который подвешивался в свободном пространстве с помощью диэлектрических нитей (рыболовной лески).

Расстояние до мишени при калибровке составляло 7 м. Отметим, что приближение дальней зоны для рассматриваемой в работе РЛС справедливо при дистанциях более $2D/\lambda_r \sim 6$ м, где D – диаметр апертуры. В ходе натурального эксперимента дальность до морской поверхности изменялась в зависимости от угла падения и высоты РЛС, поэтому на стадии калибровки была исследована зависимость амплитуды сигнала от расстояния до мишени, которая, как и ожидалось, оказалась близка к обратно-квадратичной. Чтобы привести значения амплитуды сигнала на заданной дальности R_r к значениям, которые наблюдались бы на расстоянии R_{0r} , при котором была выполнена калибровка, амплитуды сигнала умножались на коэффициент $(R_r/R_{0r})^2$.

Углы падения при наблюдениях составляли 45° и 70° , что соответствовало дальностям до морской поверхности, соответственно, 20 и 17 м. Уровень собственных шумов аппаратуры, измеренный во время калибровки, соответствовал значению ЭПР около 2×10^{-5} м². С учетом того, что принимаемая мощность зависит от дальности как R_r^{-4} , минимально регистрируемая ЭПР (или уровень шума в единицах ЭПР) во время эксперимента составляла 2×10^{-3} м² (дальность 20 м, угол падения 45°) и 6×10^{-4} м² (дальность 17 м, угол падения 70°).

Геометрические характеристики обрушений, проходящих через пятно облучения, определялись путем обработки видеозаписей изображений морской поверхности с помощью алгоритма, аналогичного приведенному в [20]. Цифровая видеокамера крепилась либо непосредственно на корпусе

РЛС, либо на одной вертикали на разных палубах, но так чтобы их оси были сонаправлены.

Скорость и направление ветра измерялись стандартным гидрометеорологическим анемометром, установленным на высоте 21 м над уровнем моря (определялись средние значения за 1 мин интервалы). Возвышения морской поверхности регистрировались струнным резистивным волнографом с частотой дискретизации 10 Гц.

Схема эксперимента, показывающая расположение основных приборов, приведена на рис.1.

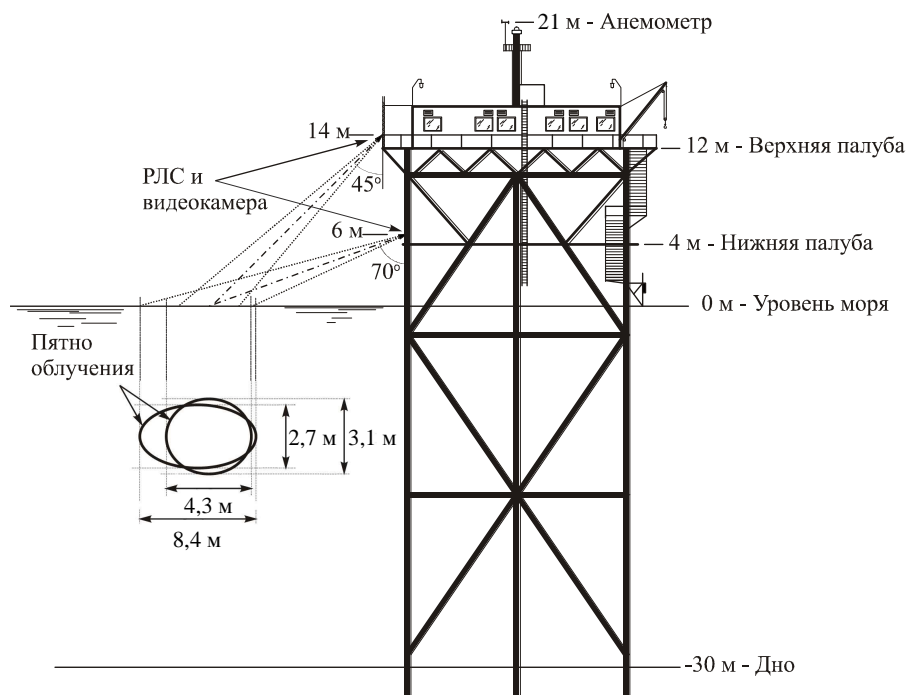


Рис. 1. Океанографическая платформа и схема расположения оборудования.

Первичная обработка данных. Для уточнения положения центра пятна облучения в видеокадре, а также, для определения его положения в случае, когда видеокамера и РЛС были на разных палубах, был применен следующий метод. Кадры обрабатываемой видеозаписи, представляющие собой матрицы размером 1440×1080 элементов, поэлементно суммировались между собой с весом, пропорциональным ЭПР участка морской поверхности, попадающего в данных кадр. Максимальный вес соответствовал максимальной ЭПР за время записи. Полученная в результате такого осреднения матрица нормировалась на свое максимальное значение.

На рис. 2 показан пример построенных таким образом матриц в случае, когда камера и РЛС были разнесены между собой. Как ожидалось, прохождение обрушения через диаграмму направленности РЛС должно было вызывать всплеск РЛ сигнала. Поэтому пятно облучения в матрице проявляется в виде яркой области (см. рис. 2). Координаты центра этой области, кото-

рые определялись вручную, были приняты за координаты центра пятна облучения в кадре и использовались для дальнейшей обработки.

В результате обработки видеорядов и исходных РЛ-данных были получены синхронизированные временные ряды длины L , площади S и ориентации ϕ обрушений, попадающих в пятно облучения, а также ЭПР σ^{pp} этого пятна.

В тех редких случаях, когда в пятно облучения попадало сразу несколько обрушений, вычислялись их суммарные длина, площадь и средняя ориентация. Частота дискретизации σ^{pp} была ниже (10 Гц), чем для L , S и ϕ (25 Гц), поэтому временная реализация ЭПР была линейно интерполирована на временную сетку с частотой 25 Гц.

Для всех событий, выделенных на видеозаписи, были рассчитаны максимальные значения L , S и σ^{pp} . Для оценки ориентации обрушения использовалось среднее за время жизни значение ϕ .

Выбор максимальных величин в некоторой степени произволен, однако позволяет существенно упростить задачу, т.к. в этом случае не требуется учитывать эволюцию обрушения, т.е. барашки рассматриваются как быстро живущие события, с не изменяющимися за время жизни характеристиками. На рис. 3 приведены зависимости между средними и максимальными значениями длин, площадей и ЭПР обрушений, построенные по всему массиву полученных данных (разделение на две группы точек на рис. 3 прослеживается вследствие того, что нанесены точки, соответствующие $\theta = 45^\circ$ и $\theta = 70^\circ$). Видно, что средние и максимальные значения каждого параметра связаны между собой линейно, поэтому выбор между максимальными и средними характеристиками не оказывает качественного влияния на результаты приведенные ниже.

Натурные исследования геометрических свойств обрушений [20] показывают, что площадь активной фазы барашка в кульминационный момент его развития пропорциональна квадрату длины обрушивающего гребня (т.е. обрушения имеют форму эллипса)

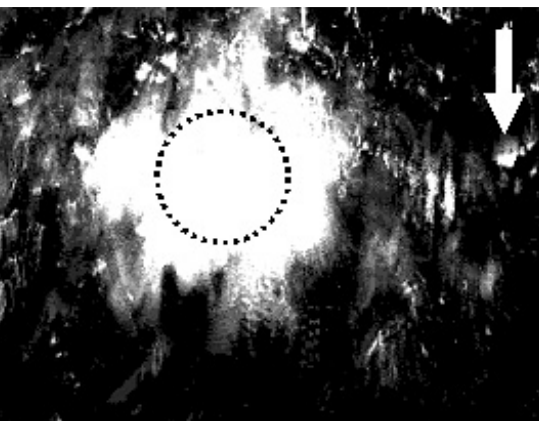


Рис. 2. Осредненные кадры видеозаписи. Угол падения РЛС – 70° , видеокамеры – 45° . Стрелкой обозначено генеральное направление распространения волн. Пунктиром обозначена область, занимаемая пятном облучения.

$$S = const \cdot L^2.$$

Поэтому не имеет принципиального значения, какой из параметров (длину или площадь) мы будем использовать для описания геометрии об-

рушения. Выберем в качестве основного такого характерного параметра максимальную длину обрушивающего гребня L .

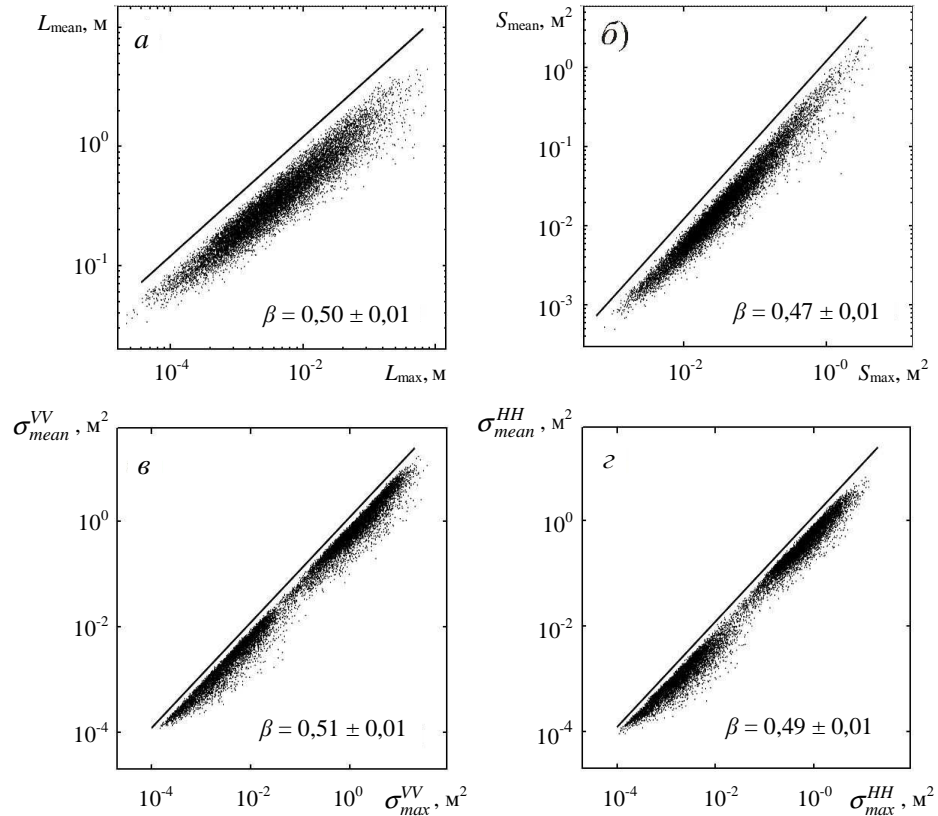


Рис. 3. Зависимости между средними («mean») и максимальными («max») значениями: a – длин L , $б$ – площадей S , $в$ – ЭПР обрушений при вертикальной поляризации излучения и приема (VV), $з$ – ЭПР обрушений при горизонтальной поляризации излучения и приема (HH). β – угловой коэффициент линейной зависимости вида $y = \beta x$ (сплошные прямые).

Зависимость ЭПР обрушений от их пространственного масштаба. В настоящее время в работах, так или иначе затрагивающих рассеяние радиоволн на обрушениях, предполагается полная автомодельность обрушений и следующее из нее постоянство удельной ЭПР (УЭПР) в обрушениях любого размера (см., например, [21 – 23]). При этом в научной литературе встречается лишь несколько работ, в которых поднимается этот вопрос.

Так, в работе [24] приводятся зависимости всплесков ЭПР, наблюдаемых в X -диапазоне (частота 10,5 ГГц, длина волны 2,85 см), от площади затененной поверхности, отнесенной к площади пятна облучения S_r . При умеренных углах падения ($\theta = 44 - 59^\circ$) авторы указывают на линейное соотношение между σ_{wb}^{VV} и S/S_r .

С другой стороны, в работе [25] сравниваются статистические распределения двух случайных величин: амплитуды всплесков РЛ-сигнала

X-диапазона при скользящих углах падения и длины обрушивающихся гребней. Обнаруженное подобие указанных распределений позволило автору [25] сделать вывод о линейной связи между этими двумя параметрами.

В подтверждение [25] можно привести также следующее косвенное свидетельство. В работах [26] и [27] опубликованы ветровые зависимости суммарной мощности всплесков РЛ сигнала X-диапазона, приходящейся на единицу площади (см. рис. 9 в работе [26]), и суммарной длины контуров вдоль которых лежат барашки на единице поверхности (см. рис. 18 в работе [27]).

Логично предположить, что если суммарная ЭПР обрушений некоторого участка морской поверхности определяется суммой ЭПР всех присутствующих на ней обрушений (некогерентное рассеяние), и ЭПР прямо пропорциональна длине обрушивающегося гребня, то изменение суммарной длины обрушений (в данном случае в результате изменения скорости ветра) должно вызывать соответствующее изменение суммарной площади рассеяния. Обе зависимости имеют схожий вид – степенная функция с показателем степени около 2. Следовательно, удельная мощность всплесков и удельная длина обрушений должны быть связаны линейно, что соответствует выводам работы [25].

Кажущееся противоречие между результатами исследований [24] и [25], возможно, кроется в различии механизмов рассеяния при умеренных и больших углах падения. Таким образом, взаимосвязь между пространственным масштабом обрушения и его ЭПР может пролить свет на механизмы рассеяния, действующие при различных углах падения.

Для выяснения этого вопроса во время наших натуральных экспериментов была выполнена серия записей, включающих измерения при углах падения 45° и 70° и зондировании «на волну». В табл. 1 приведены значения гидрометеорологических параметров, соответствующих каждой записи этой серии: U_{21} – скорость ветра на высоте 21 м, T_p – период волн спектрального пика, $\alpha = U_{21}/c_p$ – отношение скорости ветра к фазовой скорости доминантных волн c_p (обратный возраст волн) ⁴⁾.

Таблица 1. Гидрометеорологические условия во время выполнения первой серии измерений.

Номер записи	Дата записи	$\theta, ^\circ$	$U_{21}, \text{м/с}$	$T_p, \text{с}$	α
1	14.10.08	45	$4,4 \pm 0,2$	1,53	1,84
2	18.10.09	45	$5,0 \pm 0,9$	4,63	0,69
3	13.10.09	45	$8,2 \pm 0,3$	2,99	1,75
4 ¹	13.10.09	45	$8,2 \pm 0,3$	2,99	1,75
5	23.10.08	70	$5,9 \pm 0,2$	5,94	0,64
6	23.10.08	70	$4,1 \pm 0,7$	5,84	0,45
7	07.10.09	70	$7,0 \pm 0,7$	4,16	1,08
8	19.10.09	70	$15,6 \pm 0,6$	3,31	3,02

Примечания:

1. Эксперимент выполнен при присутствии в пятне облучения масляной пленки;
2. В колонке приведены значения средней по записи скорости ветра U_{21} и ее среднеквадратичного отклонения.

На рис. 4 представлены зависимости максимальной ЭПР обрушений от максимальной длины обрушения L для ВВ и ГГ поляризаций, полученные в результате анализа записей при схожих ветро-волновых условиях (записи № 3 на рис. 4, *а, б* и записи № 5 и № 7 на рис. 4, *в, г*. Номера записей – см. табл. 1). Облака точек усреднены по интервалам, ширина которых меняется по логарифмическому закону. Средние значения сигнала, полученные таким способом, показаны на рис. 4 кружочками (○). Там же штриховыми линиями нанесены кривые, аппроксимирующие зависимости степенной функцией вида $y = \alpha L^\gamma$. Аппроксимация выполнена методом наименьших квадратов ошибок (МНК). Для наглядности на рис. 4 также приведены расчетные значения показателя степени γ .

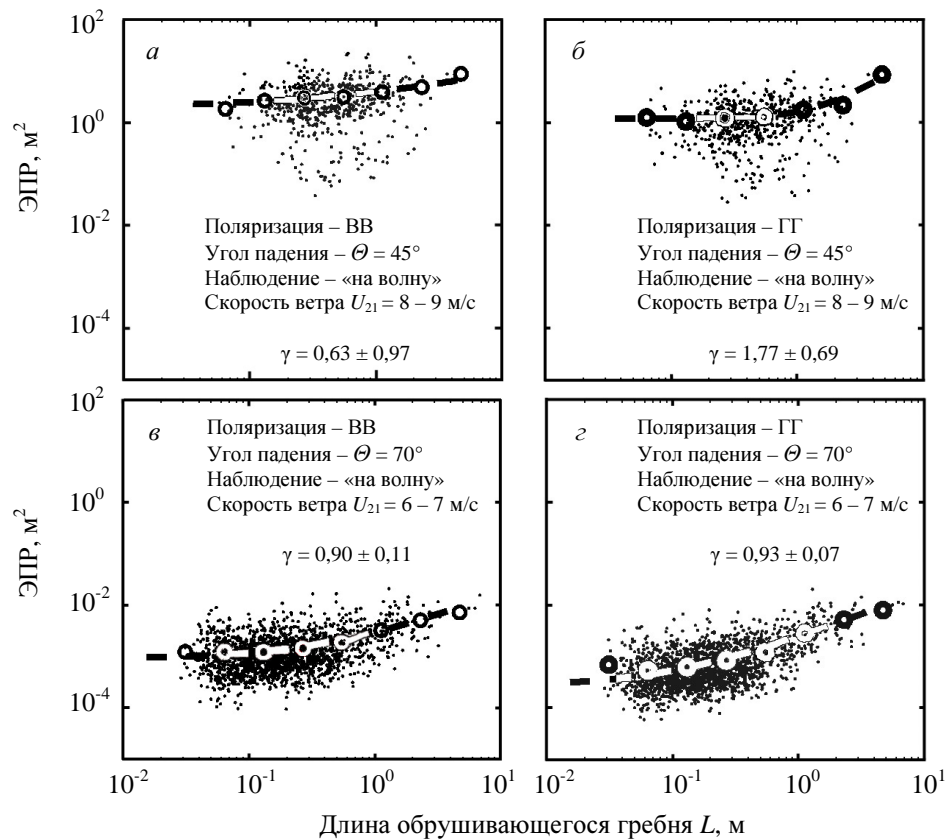


Рис. 4. Зависимость ЭПР обрушений от максимальной длины обрушивающегося гребня при наблюдении «на волну» и различных поляризациях, углах падения и скоростях ветра: *а* – поляризация ВВ, угол падения $\theta = 45^\circ$, скорость ветра $U_{21} = 8 - 9$ м/с; *б* – поляризация ГГ, угол падения $\theta = 45^\circ$, скорость ветра $U_{21} = 8 - 9$ м/с; *в* – поляризация ВВ, угол падения $\theta = 70^\circ$, скорость ветра $U_{21} = 6 - 7$ м/с; *г* – поляризация ГГ, угол падения $\theta = 70^\circ$, скорость ветра $U_{21} = 6 - 7$ м/с. ○ – среднее значение сигнала, — — — аппроксимирующая степенная функция вида $y = L^\gamma$, γ – показатель степени аппроксимирующей функции.

Первое, что обращает на себя внимание (см. рис. 4), это весьма значительный разброс точек вокруг среднего значения. Т.е. обрушения одного масштаба могут иметь ЭПР, отличающуюся на 10 – 20 дБ. Особенно велик этот разброс при угле падения 45° . Также можно отметить увеличение дисперсии, наблюдаемое при уменьшении масштаба обрушения при обоих используемых углах падения. Такой результат сильно затрудняет интерпретацию измерений, однако легко объясняется следующим образом. При умеренных углах падения ($\theta = 45^\circ$) основной вклад в ЭПР вносит резонансная (брэгговская) компонента σ_{br}^{pp} , обусловленная рассеянием на ветровой ряби. В случае, если УЭПР обрушений имеет тот же порядок величины, что и удельная σ_{br}^{pp} , то обрушения малого (по сравнению с пятном облучения) размера будут давать малый вклад в суммарную ЭПР облучаемого участка, а случайные вариации σ_{br}^{pp} , связанные с флуктуациями спектральной плотности волнения на брэгговском волновом числе и геометрической модуляцией уклонами более крупных волн, вызовут большой разброс измеренных значений σ^{pp} . С ростом масштаба «барашка» вклад фонового рассеяния уменьшается, и измерение величины σ_{wb}^{pp} становится более точным (разброс уменьшается).

Вследствие этого эффекта значения ЭПР σ^{pp} при умеренных углах падения $\theta = 45^\circ$ имеют больший разброс, чем при больших углах падения $\theta = 70^\circ$. Подобная ситуация описана в работе [24], где показано, что при $\theta = 44^\circ$ разброс σ^{pp} больше, чем при $\theta = 59^\circ$. Кроме того, нельзя забывать, что процесс обрушения является в значительной степени случайным и трехмерная структура, возникающая в результате опрокидывания гребня, будет всегда уникальной. Поэтому «барашки» одного и того же масштаба могут иметь ощутимо отличающиеся ЭПР. Ярким примером этому служит работа [28], авторы которой отмечают весьма большой (вплоть до 30 дБ) разброс ЭПР обрушений, сгенерированных в лабораторном бассейне, при одних и тех же полностью контролируемых условиях.

Тем не менее, можно считать, что ЭПР обрушения σ^{pp} , появляющегося в пятне облучения, и ЭПР пятна облучения в рамках механизма резонансного рассеяния σ_{br}^{pp} независимые случайные величины. Тогда, средняя ЭПР облучаемого участка морской поверхности, содержащего обрушение длиной L , будет представлять собой сумму среднего значения ЭПР обрушения длиной L и добавки, обусловленной компонентой брэгговского рассеяния, осредненной по набору случайных моментов времени (моментам появления обрушений).

Согласно, рассуждениям, приведенным выше, ЭПР обрушения может быть пропорциональна его геометрической площади $S \propto L^2$ [21, 24] или его длине L [25]. Поэтому для анализа полученных данных будем считать, что в общем случае небрэгговская компонента, связанная с обрушениями, про-

порциональна L^γ , где γ – интересующий нас показатель степени. Таким образом, зависимости $\sigma^{pp}(L)$ аппроксимировались методом наименьших квадратов ошибок функцией вида

$$\sigma^{pp}(L) = \sigma_{wb}^{pp} + \sigma_{br}^{pp} = aL^\gamma + \sigma_{br}^{pp}, \quad (1)$$

где σ_{br}^{pp} – константа, связанная с фоновым резонансным рассеянием на поверхности, незанятой обрушением, но попадающей в пятно, облучаемое РЛС.

Результаты аппроксимации представлены на рис. 4 (пунктирные линии), расчетные значения коэффициентов γ для всей серии измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения показателя степени γ

Номер записи	Дата записи	$\theta, ^\circ$	$\gamma, \text{ВВ}$	$\gamma, \text{ГГ}$	Примечание
1	14.10.08	45	$2,77 \pm 1,51$	$0,98 \pm 0,71$	
2	18.10.09	45	$1,48 \pm 0,57$	$2,06 \pm 0,37$	
3	13.10.09	45	$0,63 \pm 0,97$	$1,77 \pm 0,69$	
4	13.10.09	45	$2,20 \pm 1,07$	$2,12 \pm 0,52$	Морская поверхность покрыта масляной пленкой.
5	23.10.08	70	$1,12 \pm 0,12$	$1,53 \pm 0,10$	
6	23.10.08	70	$0,91 \pm 0,45$	$1,23 \pm 0,46$	
7	07.10.09	70	$0,91 \pm 0,10$	$0,84 \pm 0,06$	
8	19.10.09	70	$0,68 \pm 0,15$	$1,33 \pm 0,12$	

Из приведенных данных (см. рис. 4 и табл. 2) видно, что при больших углах падения ($\theta = 70^\circ$) наблюдается близкая к линейной зависимость между σ_{wb}^{pp} и L . В диапазоне умеренных углов падения ($\theta = 45^\circ$) оценки значения γ подвержены весьма сильному разбросу ($\sim 100\%$), что не позволяет делать какие-либо даже качественные выводы. Связано это в первую очередь с маскирующим действием брэгговского рассеяния, которое было рассмотрено выше.

Чтобы минимизировать действие этого маскирующего фактора был выполнен специальный эксперимент, в котором выполнялись те же самые совместные РЛ- и видеоизмерения, но на морской поверхности формировалась искусственная масляная пленка, подавляющая ветровую рябь, которая является источником брэгговского рассеяния. В качестве пленкообразующего вещества использовалось растительное масло «Олейна», пленка которого обладает упругостью около 10 мН м^{-1} [29]. Разлив масла осуществлялся на расстоянии около 100 м от платформы с таким расчетом, чтобы растекающееся пятно дрейфовало через облучаемую область. Таким образом, при подходе к платформе масляное пятно растекалось до толщины несколько микрометров, поэтому пленку можно считать тонкой. В присутствии такой

пленки уровень спектра брэгговской ряби (для нашей РЛС при $\theta = 45^\circ$ ее длина, в соответствии с условием резонанса [6], составляет 5,7 мм) уменьшается на 15 – 20 дБ при ветре 5 – 7 м с⁻¹ [30]. Значение σ_{br}^{pp} , пропорциональное уровню спектра рассеивающей ряби, должно уменьшиться во столько же раз, и можно рассчитывать, что измерение σ_{wb}^{pp} станет более достоверным в случае присутствия пленки.

Необходимо также отметить, что тонкая пленка может влиять и на шероховатость в зоне обрушения и тем самым исказить σ_{wb}^{pp} , которое мы стремимся определить в условиях чистой воды. Выявление этого эффекта (если он существует), стало бы возможно, если бы размер пятна облучения был меньше размера «барашка», что не наблюдалось в нашем эксперименте (должны обрушиваться волны длиной около 100 м). В научной литературе встречается лишь несколько статей, касающихся данного вопроса. Например, авторы работы [31] отмечают уменьшение частоты появления обрушений в присутствии масляной пленки. В работе [32] показано, что тонкая пленка усиливает турбулентное перемешивание и вовлечение воздуха в микрообрушениях, но ничего не говорится об интенсивных пенообразующих событиях, рассматриваемых в нашей работе. Поэтому будем предполагать в дальнейшем, что в таких обрушениях силы поверхностного натяжения малы, по сравнению с силами инерции, вызывающими разрушение гребня и выплескивание воды, и УЭПР зоны такого обрушения не изменятся под действием тонкой пленки.

На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие зависимости σ_{wb}^{pp} от максимальной длины L и площади S обрушений, полученные при угле падения 45° , зондировании «на волну» и в присутствии на морской поверхности пленки масла (см. табл. 1 и табл. 2, запись № 4).

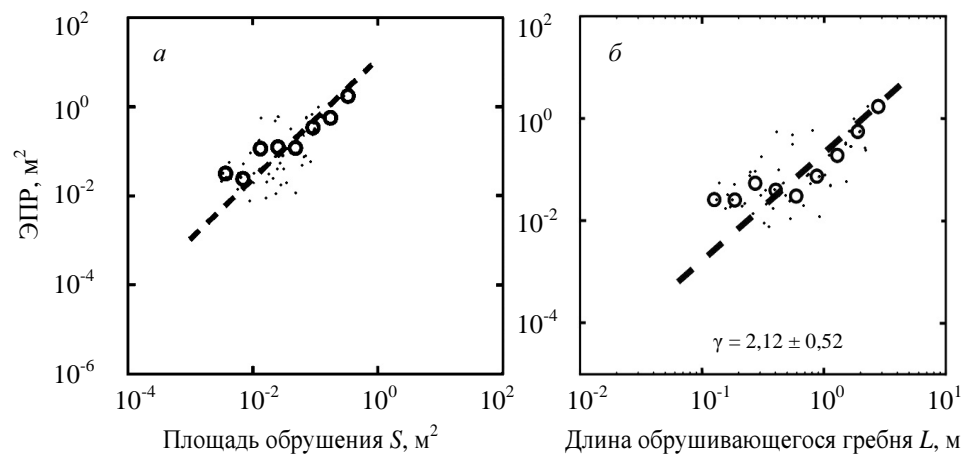


Рис. 5. Зависимость ЭПР обрушений от площади обрушивающегося гребня S (а) и от его максимальной длины L (б) в присутствии на морской поверхности масляной пленки. Условия эксперимента: поляризация – ГГ; угол падения $\theta = 45^\circ$; наблюдение – «на волну»; скорость ветра $U_{21} = 8 - 9$ м/с. Остальные обозначения – см. рис. 4.

Как следует из рис. 5, наличие пленки не повлияло существенным образом на разброс точек, что связано, по-видимому, с неполным затуханием ветровой ряби под пленкой растительного масла, а также с дополнительным резонансным рассеянием от следов обрушений и связанных с ними разрывов пленки. Однако, в силу приведенных выше рассуждений, будем считать, что более достоверными являются измерения ЭПР только достаточно крупных обрушений. Их и будем использовать при дальнейшем анализе.

Итак, в случае умеренных углов падения ($\theta = 45^\circ$) и присутствия пленки, наблюдается близкая к линейной зависимость между ЭПР σ_{wb}^{pp} и геометрической площадью «барашка» S . При больших углах падения, наоборот, линейно связанными оказываются σ_{wb}^{pp} и длина «барашка» L .

Зависимость ЭПР обрушений от их ориентации. Для определения зависимости σ_{wb}^{pp} от азимутального угла «барашка» ϕ было выполнено две серии наблюдений при умеренных и больших углах падения – обобщенные данные о них приведены в табл. 3.

Таблица 3. Условия наблюдений во время измерений азимутальных зависимостей

Номер записи	Дата записи	$\theta, ^\circ$	$\phi, ^\circ$ ¹	$U_{21}, \text{ м/с}$ ²	$\phi_{21}, ^\circ$	$T_p, \text{ с}$	α
9	18.10.09	45	90	$11,2 \pm 0,8$	91	4,02	1,78
10	18.10.09	45	0	$11,7 \pm 1,1$	95	4,32	1,74
11	18.10.09	45	45	$10,3 \pm 0,7$	94	4,47	1,47
12	18.10.09	45	135	$9,9 \pm 0,6$	89	4,47	1,42
13	07.10.09	70	90	$9,9 \pm 0,5$	98	4,54	1,39
14	07.10.09	70	0	$9,7 \pm 0,3$	101	4,20	1,48
15	07.10.09	70	-90	$8,3 \pm 0,5$	110	4,16	1,28

Примечания:

1. Угол между плоскостью падения радиоволны и направлением ветра.
2. Приведены значения средней по записи скорости ветра U_{21} и ее средне-квадратичного отклонения.

Измерения выполнялись в разные дни, но при схожих гидрометеорологических условиях: скорость восточного ветра лежала в пределах от 10 до 11 м с⁻¹ при наблюдении поверхности под углом $\theta = 45^\circ$ (см. табл. 3, записи №№ 9 – 12) и от 8 до 10 м с⁻¹ при наблюдении поверхности под углом $\theta = 70^\circ$ (см. табл. 3, записи №№ 13 – 15), период волн спектрального пика составлял 4 – 4,5 с.

При обработке видеоизображений совместно с L и S определялось положение центра масс «барашка» в каждый момент его существования. Набор таких точек дает траекторию движения центра масс, а прямая, аппроксимирующая эту траекторию, задает среднее направление распространения «барашка». Если в кадре одновременно существовало несколько обрушений, направления усреднялись по всему ансамблю с весом, пропорциональным площади события. В качестве начала отсчета для ϕ было выбрано направление, соответствующее движению обрушения поперек луча зрения

слева направо. Тогда, при движении навстречу наблюдателю $\phi = -90^\circ$ и, наоборот, при движении от наблюдателя $\phi = 90^\circ$.

Известно, что УЭПР морской поверхности в рамках двухмасштабной модели обладает характерной азимутальной зависимостью (см., например, [33])⁵. Для того, чтобы исключить вариации УЭПР, возникающие вследствие изменения направления зондирования относительно направления ветра ϕ , из исходного сигнала была исключена компонента брэгговского рассеяния σ_{br}^{PP} . Последняя оценивалась с помощью фильтрации временной реализации σ^{PP} окном, ширина которого равнялась периоду волн спектрального пика T_p , который вычислялся по спектрам волнографических записей (см. табл. 3).

Графики, приведенные на рис. 6, дают представление об азимутальной изменчивости σ_{wb}^{PP} , оцененной как разность $(\sigma^{PP} - \sigma_{br}^{PP})$, при углах падения 45° и 70° на ВВ и ГГ поляризациях. Существенный разброс значений вокруг среднего при фиксированном ϕ определяется, помимо факторов, перечисленных нами ранее, зависимостью σ_{wb}^{PP} от масштаба обрушения, поэтому на рис. 6 для наглядности приведены только случаи, когда $L > 0,5$ м. В то же время, осреднение по всем событиям с одинаковой ориентацией должно выявить искомую азимутальную зависимость $\sigma_{wb}^{PP}(\phi)$. Для этого облака точек были осреднены по интервалам ϕ , ширина которых составляла $22,5^\circ$.

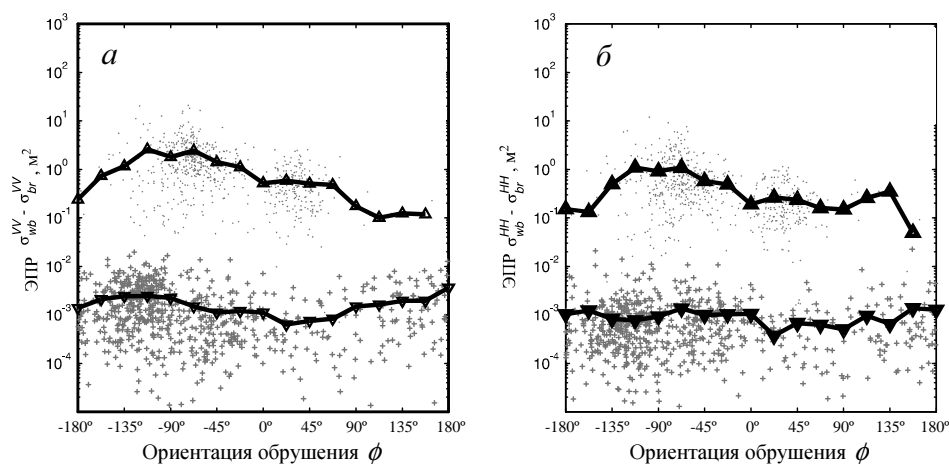


Рис. 6. Зависимости ЭПР обрушений от ориентации обрушивающегося гребня: *a* – поляризация ВВ, углы падения 45° (▲) и 70° (▼); *б* – поляризация ГГ, углы падения 45° (▲) и 70° (▼). Точки – результаты измерений, сплошные линии – среднее значение сигнала.

Отличительной особенностью измерений, полученных при угле падения 70° , является более высокое значение асимметрии σ_{wb}^{PP} при противоположных направлениях зондирования

$$\delta_{UD}^{pp} = \frac{\sigma_{wb}^{pp}(\phi = -90^\circ)}{\sigma_{wb}^{pp}(\phi = 90^\circ)}.$$

В этом случае величина δ_{UD}^{pp} составляет около 5 – 7 дБ, в то время как при $\theta = 70^\circ$ и ГГ поляризации асимметрии вовсе не наблюдается.

Полученные нами азимутальные зависимости при умеренных углах падения согласуются с результатами лабораторных исследований [34] обратного рассеяния радиоволн *K*-диапазона (частота 24,125 ГГц, длина волны ~ 1,25 см) при $\theta = 40^\circ$ на обрушениях волн, сгенерированных волнопродуктором. Как и в нашем случае, в [34] значения δ_{UD}^{pp} лежат в диапазоне от 4 до 7 дБ. Также отмечается, что во всех случаях, кроме $\phi = -90^\circ$, максимум ЭПР возникал после разрушения гребня, т.е. был обусловлен рассеянием от шероховатости, генерируемой обрушением. Авторы [34] объясняют указанные особенности эффектами наклона рассеивающей области, что подтверждается совпадением экспериментальных данных с результатами численного моделирования. В случае более длинных радиоволн (*X*-диапазон, частота 10,525 ГГц, длина волны 2,85 см) и более скользких углов падения ($\theta = 85^\circ$) асимметрия δ_{UD}^{pp} не превышает 2 дБ [34], что также не противоречит данным, полученным нами ⁶⁾.

Поляризационное отношение всплесков ЭПР, связанных с обрушениями. Обрушения ветровых волн часто ассоциируются со всплесками РЛ-сигнала, имеющими аномальное (равное или больше нуля), по сравнению с брэгговским, поляризационное отношение

$$P_{wb} = 10 \lg \frac{\sigma_{wb}^{HH}}{\sigma_{wb}^{VV}}.$$

Случаи, когда $P_{wb} \approx 0$ обычно объясняют рассеянием на изотропных отражателях (сферических брызгах) или квазизеркальными отражениями, в то время как положительные значения P_{wb} говорят о действии иных механизмов рассеяния – дифракции на клиновидной поверхности, многократных переотражениях и т.п. Таким образом, поляризационное отношение может служить одним из индикаторов механизма рассеяния.

На рис. 7 изображены эмпирические функции плотности вероятности для значений P_{wb} , рассчитанные по всем записям при двух используемых нами углах падения (45° и 70°). Как отмечалось выше, одним из факторов, затрудняющих измерение ЭПР обрушений, является фоновое рассеяние от ветровой ряби. Следовательно, в случае «чистой» поверхности значения P_{wb} оказываются заниженными (см. рис. 7) из-за вклада в наблюдаемую ЭПР брэгговской компоненты рассеяния, для которой поляризационное отношение, согласно двухмасштабной модели, составляет при скорости ветра 10 м с^{-1} около -6 дБ и -12 дБ при $\theta = 45^\circ$ и $\theta = 70^\circ$ соответственно [22].

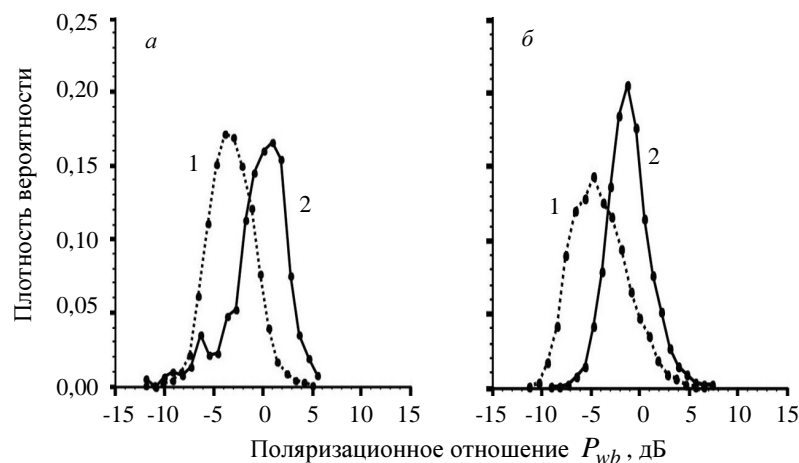


Рис.7. Распределения поляризационного отношения всплесков, связанных с обрушениями, для различной геометрии зондирования: *a* – наблюдение «навстречу волне», угол падения $\theta = 45^\circ$, 1 – «чистая» морская поверхность, 2 – поверхность, покрытая масляной пленкой; *б* – угол падения $\theta = 70^\circ$, «чистая» морская поверхность. 1 – наблюдение «навстречу волне», 2 – наблюдение «вдоль волны».

Присутствие на морской поверхности масляной пленки позволяет ослабить влияние этого фактора. К сожалению, нам удалось выполнить измерения с пленкой только при $\theta = 45^\circ$. Поэтому для случая $\theta = 70^\circ$ (см. рис. 7, *б*) показано распределение P_{wb} при зондировании «вдоль волны», когда резонансная компонента рассеяния минимальна [33].

Очевидно, что в случаях, когда действие фонового рассеяния сведено к минимуму (см. рис.7, *a, б*, сплошные линии), распределение P_{wb} имеет максимум в районе 0 дБ, что хорошо согласуется с многочисленными натурными и лабораторными исследованиями рассеивающих свойств «барашков» (см., например, [16, 34, 35]).

Обсуждение результатов. Модель ЭПР обрушения. Описанные выше результаты позволяют сформулировать основные требования, которым должна удовлетворять создаваемая модель ЭПР обрушения в миллиметровом диапазоне длин радиоволн. Она должна адекватно описывать:

1) *Зависимость от угла падения (наблюдения).* Во всем диапазоне углов падения (за исключением, возможно, скользящих углов $\theta > 85 - 87^\circ$, которые нами здесь не рассматриваются) интенсивность обратного рассеяния не зависит от поляризации излучения/приема. Это хорошо известный факт, который заставляет рассматривать в модели либо квазизеркальные отражения, либо рассеяние на брызгах.

2) *Зависимость от масштаба.* При умеренных углах падения ЭПР обрушения пропорциональна его геометрической площади, при больших – геометрической длине. В первом случае можно предполагать, что УЭПР зоны обрушения постоянна для всех масштабов обрушений, как это делается в современных моделях (см., например, [21 – 23]). Во втором случае, ни один из предложенных механизмов рассеяния не в состоянии описать этот

эффект. Действительно, ЭПР клиновидной особенности [4] пропорциональна квадрату длины ребра клина (см., например, [11, 36]). В случае квазизеркального отражения (если УЭПР зоны обрушения постоянна), ЭПР «барашка» должна быть пропорциональна площади обрушения, или квадрату его длины.

3) *Азимутальная зависимость*. При умеренных углах падения наблюдается асимметрия ЭПР обрушения, соответствующая наблюдениям навстречу гребню и вдоль гребня, при больших углах падения – рассеяние изотропно. В первом случае, результаты легко объяснить квазизеркальным отражением от наклоненной зоны обрушения [22]. Во втором случае, подходящим рассеивателем представляются брызги над обрушением, так как рассеяние (дифракция) на протяженных структурах, таких как заострение или цилиндрический бор, должно обладать достаточно острой индикатрисой (см., например, [37]).

Итак, в качестве основы при разработке модели будем рассматривать предложенную в [22] модель квазизеркальных отражений от обрушений, которая кроме качественных выводов позволяет делать какие-либо количественные оценки. Для объяснения полученных экспериментальных результатов при $\theta = 70^\circ$ используем механизм рассеяния на брызгах над обрушением. Ниже будет рассмотрены основные особенности модели [22] и обоснована ее предлагаемая модификация.

Модель квазизеркальных отражений. В модели [22] в качестве основного механизма рассеяния на обрушениях используется так называемое квазизеркальное отражение от шероховатости барашка. В рамках этой гипотезы предполагается, что удельная ЭПР барашка определяется следующим образом:

$$\sigma_{0wb} = \frac{\sec^4(\theta - \theta_{wb})}{s_{wb}^2} \exp\left\{-\frac{tg^2(\theta - \theta_{wb})}{s_{wb}^2}\right\} + \frac{\varepsilon_{wb}}{s_{wb}^2}, \quad (2)$$

где s_{wb}^2 , θ_{wb} , ε_{wb} – «подстроечные» параметры модели, выбираемые таким образом, чтобы результаты модельных расчетов наилучшим образом аппроксимировали экспериментальные данные, нижний индекс «0» обозначает нормировку на площадь пятна облучения.

Первое слагаемое в соотношении (2) представляет собой решение задачи рассеяния на идеально проводящей поверхности в приближении Кирхгофа. Предполагается, что зона обрушения занимает плоскую шероховатую площадку, имеющую определенный наклон θ_{wb} и азимутальную ориентацию, которая определяется направлением ветра. Считается, что мелкомасштабная шероховатость этой площадки изотропна и имеет среднеквадратичный уклон s_{wb}^2 .

Благодаря тому, что вектор нормали к зоне обрушения ориентирован определенным образом относительно направления ветра, модель удовлетворительно воспроизводит асимметричную азимутальную зависимость суммарной удельной ЭПР морской поверхности, которая наблюдается в натуральных условиях.

Как следует из [22], одного первого слагаемого в уравнении (2) недостаточно для корректного описания УЭПР при больших углах падения. Поэтому авторы модели вводят в это уравнение, определяющее σ_{0wb} , дополнительный член, не зависящий от геометрии наблюдения и задаваемый параметром ε_{wb} . Согласно [22], эта постоянная составляющая возникает в результате отражения от цилиндрического образования на границе зоны обрушения.

Очевидно, что для описанной модели удельная ЭПР барашка не зависит от его размеров и поэтому линейно связана с его геометрической площадью S или квадратом длины L^2 . Это следствие подтверждается нашими наблюдениями при $\theta = 45^\circ$ и подавленной ветровой ряби, однако противоречит данным эксперимента при $\theta = 70^\circ$ (см. рис. 4 и 5).

Кроме того, согласно выражению (2), предполагаемый наклон зоны обрушений должен проявляться в азимутальной зависимости σ_{wb}^{pp} , что также подтверждается при умеренных углах падения, в то время как при больших θ ЭПР обрушения слабо зависит от его ориентации.

Таким образом, гипотеза квазизеркальных отражений, используемая в модели [22], достаточно верно описывает поведение σ_{wb}^{pp} для малых и умеренных θ . С другой стороны, при больших углах падения, механизм отражения от цилиндрического бора не находит подтверждения в результатах эксперимента.

Модель рассеяния на брызгах. Для описания линейной взаимосвязи между длиной обрушения и амплитудой вызванного им всплеска ЭПР в [25] без уточнения механизма рассеяния выдвигается предположение о том, что величина σ_{wb}^{HH} пропорциональна длине проекции обрушения на направление облучения. Очевидно, в этом случае должна наблюдаться сильная азимутальная изменчивость σ_{wb}^{HH} . Возможно такая ситуация имеет место при скользких углах падения, которые использовались в [25], однако в нашем эксперименте при $\theta = 70^\circ$ подобного рода закономерность не прослеживается. Поэтому будем искать механизм, линейно связывающий ЭПР и длину обрушения, независимо от ориентации последнего.

В разное время предлагались несколько теорий, учитывающих рассеяние на каплях, генерируемых обрушениями ветровых волн [17 – 19]. Все они в основном сводились к рассмотрению некоторого слоя над морской поверхностью, в котором капли распределены равномерно в пределах слоя. Поэтому учет рассеяния на них давал определенную добавку к УЭПР морской поверхности. Очевидно, что распределение капель над поверхностью на самом деле должно быть крайне неравномерным, как по высоте, так и в горизонтальной плоскости. Действительно, так как обрушения ветровых волн являются основным источником брызг, то они должны локализоваться над зонами, занятыми «барашками».

Примечательно, что продукция пенных брызг, т.е. объем (или масса) брызг, срывающихся с обрушения, оказывается пропорциональной длине

обрушивающегося гребня [38, 39]. Это дает право привлекать рассеяние на брызгах для интерпретации результатов наших экспериментов.

Предположим, что основной вклад в рассеяние миллиметровых радиоволн на зонах обрушений при больших θ вносят брызги, возникающие в процессе опрокидывания и разрушения гребня волны. Для упрощения рассуждений допустим также, что расстояние между брызгами в объеме обрушения достаточно велико, чтобы считать поле, рассеянное каждой каплей, некогерентным по отношению к полям, рассеянным остальными каплями. Тогда объемная (отнесенная к единице объема) ЭПР облака брызг объема V , генерируемого обрушением длиной L , будет определяться простой суммой ЭПР каждой капли в единице объема

$$\sigma_{dr}^v = \sum_{i=1}^{N_v(L)} \sigma_{dr}^o(i),$$

где $N_v(L)$ – число брызг в единице объема в обрушении длиной L , σ_{dr}^o – ЭПР i -той капли (индекс pp , указывающий поляризацию приема/излучения, опустим, т.к. рассеяние в рассматриваемом приближении не зависит от поляризации радиоволн).

Будем также считать, что брызги имеют сферическую форму и являются идеально проводящими. В этом случае выражение для σ_{dr}^o можно получить в точном, но довольно громоздком виде (в виде рядов Ми), поэтому используем параметризацию, предложенную в [19]

$$\sigma_{dr}^o = \begin{cases} \frac{\pi D^2}{4}, D \geq D_0 \\ \frac{\pi^5 D^6}{4 \lambda_r^4}, D < D_0 \end{cases},$$

где D – диаметр капли, λ_r – длина радиоволны (в нашем случае 8 мм), $D_0 = 0,2\lambda_r$.

Так как все капли имеют разный размер, для решения задачи необходимо знать их распределение по диаметру. Насколько нам известно, прямых измерений таких распределений в природных условиях не проводилось. Тем не менее, в ряде работ, привлекающих рассеяние на брызгах для описания удельной ЭПР морской поверхности, используется формула Маршалла-Пальмера для ливневых дождей, часто применяемая в метеорологии для определения числа капель диаметра D в единице объема [17, 19].

$$p(D) = N_1 \exp(-26,7 W_{dr}^{-0,24} D), \quad (3)$$

где W_{dr} – водность в г м^{-3} , а N_1 – константа.

Также известны лабораторные исследования распределения размеров брызг, срывающихся с гребня волны под действием ветра [38], из которых следует, что плотность вероятности для диаметров капель имеет схожий с (3) вид и представима в виде

$$p(D) = c_1 \exp(-c_2 D), \quad (4)$$

где c_1 определяется из условия нормировки плотности вероятности, а $c_2 = 660 \text{ м}^{-1}$.

Предположим далее, что распределение капель по размеру не зависит от масштаба обрушения и определяется выражением (4). Тогда, приняв во внимание определение плотности вероятности, получим

$$\begin{aligned} \sigma_{dr}^v &= \int_0^{\infty} \sigma_{dr}^{\circ}(D) n_v(D, L) dD = \int_0^{\infty} \sigma_{dr}^{\circ}(D) N_v(L) p(D) dD = \\ &= c_1 N_v(L) \int_0^{\infty} \sigma_{dr}^{\circ}(D) \exp(-c_2 D) dD \end{aligned}, \quad (5)$$

где $n_v(D, L)$ – число капель в единице объема от обрушения длиной L , диаметр которых лежит в пределах от D до $D + dD$.

Для определения величины $N_v(L)$ воспользуемся гипотезой, принятой в работе [39] для моделирования атмосферного приводного погранслоя с учетом брызг, генерируемых обрушениями ветровых волн. Согласно [39], продукция брызг, возникающих при разрушении гребня, пропорциональна его длине L , т.е.

$$N(L) = N_v(L) V(L) = c_3 L, \quad (6)$$

где $N(L)$ – число капель в обрушении длиной L , а c_3 – константа, имеющая смысл количества капель, срывающихся с единицы длины гребня.

Кроме этого, существует другой источник брызг, связанный с всплыванием и разрывом пузырей, формирующихся во время обрушения. Продукция таких капель линейно связана с площадью барашка S , однако размер их мал (не более 50 мкм [40]), чтобы влиять на рассеяние миллиметровых волн [19]. Отметим также, что автор [39] вводит указанную гипотезу, основываясь на результатах работ [38, 40].

Итак, используя соотношения (4) – (6) можно окончательно получить выражение для ЭПР обрушения длины L

$$\sigma_{wb}(L) = \sigma_{dr}^v V(L) = c_1 c_3 L \int_0^{\infty} \sigma_{dr}^{\circ} \exp(-c_2 D) dD. \quad (7)$$

Таким образом, в рамках предлагаемой модели мы получили наблюдаемую в эксперименте линейную связь между σ_{wb} и длиной обрушивающегося гребня L .

Сопоставление теории и эксперимента. Выше было показано, что для верной качественной интерпретации ЭПР «барашка» необходимо рассматривать два механизма рассеяния: квазизеркальные отражения при умеренных углах падения и объемное рассеяние от брызг при больших углах падения. Приведем теперь количественные оценки, позволяющие сопоставить модельные прогнозы с результатами натурального эксперимента.

На рис. 8. представлены зависимости σ_{wb}^{pp} от длины обрушения L , полученные по всему массиву данных для скорости ветра $7 - 9 \text{ м с}^{-1}$ и направления зондирования «на волну», в случаях, когда $\theta = 70^\circ$ и $\theta = 45^\circ$. Для исключения влияния фонового брэгговского рассеяния от ветровой ряби, в первом случае показаны результаты измерений в присутствии масляной пленки, а во втором – из каждой зависимости исключена постоянная составляющая сигнала (параметр σ_{br}^{pp} в выражении (1)). Теоретические расчеты, результаты которых приведены на рис. 8, выполнены по модели квази-зеркальных отражений [22] (сплошные линии) и нашей ее модификации, учитывающей влияние брызг (пунктир).

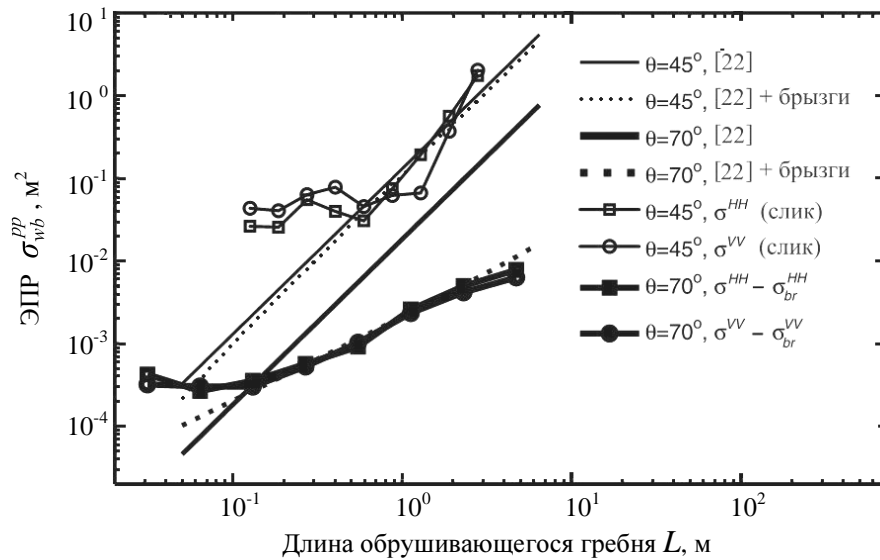


Рис. 8. Зависимости σ_{wb}^{pp} от L : экспериментальные данные и результаты модельных расчетов.

В случае модели [22] прямая подстановка приводимых в первоисточнике значений подстроечных параметров ($s_{wb}^2 = 0,19$, $\varepsilon_{wb} = 0,05$, $\theta_{wb} = 2,9^\circ$), дает в целом заниженные на 4 – 5 дБ по сравнению с экспериментом значения. Возможно, это связано с тем, что показанные на рис. 1 значения σ_{wb} представляют собой максимальные значения ЭПР за время жизни барашка, в то время как подстроечные параметры получены авторами [22] из условия наилучшего совпадения модельной и экспериментальной асимметрии δ_{UD} , т.е. для некоторых осредненных значений. Поэтому мы изменили значение одного из параметров (наклон зоны обрушения θ_{wb}) так чтобы, модель наилучшим образом описывала наши данные, полученные при $\theta = 45^\circ$. В этом случае $\theta_{wb} \cong 15^\circ$. Изменение именно этого параметра выбрано не случайно, т.к. указанное значение θ_{wb} соответствует величине, полученной в лабораторном эксперименте по изучению предельно крутых гравитационных волн,

описанном в [41]. Более того, результаты натурной стереофотосъемки морской поверхности [42] также свидетельствуют о том, что уклон зоны обрушений составляет около 15° .

Отметим, наконец, что варьирование параметров модели [22], как и ожидалось, не дает возможности воспроизвести наклон рассматриваемых экспериментальных зависимостей в области больших углов падения $\theta = 70^\circ$.

В случае модифицированной модели, второе слагаемое в выражении (2) заменяется выражением (7), связанным с рассеянием на брызгах. В выражении (7), помимо параметров распределения диаметров брызг c_1 и c_2 известных из лабораторных работ (см., например, [38]), присутствует коэффициент c_3 , определяющий суммарное количество брызг, генерируемых единицей длины обрушения. К сожалению, оценки этой величины в известной нам научной литературе варьируются в пределах десятков децибел (см., например, обзор [40]), что не дает возможности количественно подтвердить предложенную нами модификацию модели. Поэтому постоянная c_3 выбрана таким образом, чтобы расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями при $\theta = 70^\circ$ было наименьшим. В этом случае c_3 оказывается равным около 300 м^{-1} . Следовательно, согласно предложенной нами модели, достаточно около 300 капель срывающихся с 1 м обрушения, чтобы обеспечить наблюдаемые в натуральных условиях ЭПР. Такая величина c_3 при данном распределении (4), соответствует массе брызг $\sim 50 \text{ г}$.

Необходимо подчеркнуть, что модель сильно разреженного облака брызг, срывающихся с обрушивающейся поверхности, является лишь грубым упрощением, сделанным здесь для того, чтобы дать качественную интерпретацию полученных экспериментальных результатов. Поэтому для более точных количественных оценок требуется более детальное исследование геометрии пенной структуры обрушения.

В заключение отметим, что предложенная модель должна оправдывать себя только в миллиметровом диапазоне длин волн РЛС, т.к. максимальный относительный вклад в ЭПР дают капли, имеющие размер, сопоставимый с длиной радиоволны (подробно этот вопрос освещен в [19]).

Отметим, что мы не затронули часто обсуждаемое в соответствующей литературе явление всплесков РЛ-сигнала на ГГ поляризации излучения/приема, наблюдаемое при экстремально больших углах падения. Возможно, в этом случае брызги также участвуют в рассеянии, а интерференция и эффект Брюстера при многократном переотражении обеспечивают высокие значения поляризационного отношения всплесков. Действительно, в работе [43] для демонстрации механизма многократного рассеяния приводится следующий простой лабораторный эксперимент. Над гладкой поверхностью воды на заданной высоте z размещалась металлическая сфера диаметром 2,54 см. РЛС X-диапазона освещала сферу под углом $\theta = 82,8^\circ$. Опыт и его сопоставление с теорией показали, что изменение высоты сферы приводит к значительному изменению поляризационного отношения (от -60

до 15 дБ), причем при максимальной интенсивности рассеяния поляризационное отношение также максимально и составляет 10 – 15 дБ.

Заключение. В настоящей работе, представлены результаты натуральных измерений ЭПР обрушений ветровых волн на длине волны 8 мм. Совместно с РЛ-наблюдениями выполнялась видеосъемка облучаемой поверхности, которая позволила определить геометрические параметры обрушений – площадь активной фазы, длину обрушивающегося гребня и его относительную ориентацию. Это дало возможность найти взаимосвязь между рассеивающими свойствами барашков и их геометрическими характеристиками при различных направлениях зондирования.

Результаты подобных измерений трудно интерпретировать из-за сильного влияния фонового резонансного рассеяния на ветровой ряби, всегда присутствующей в пятне облучения вместе с обрушением. Поэтому особое внимание уделено условиям, при которых уровень фонового рассеяния минимален – излучение/прием сигнала на горизонтальной поляризации, наблюдение в направлении «вдоль волны». Также предложена методика определения РЛ-характеристик обрушений в присутствии на морской поверхности тонкой искусственной пленки органического вещества (растительного масла), при котором «мешающая» измерениям ветровая рябь оказывается подавлена.

В результате, при больших углах падения ($\theta = 70^\circ$) обнаружена близкая к линейной связь между максимальными за время жизни ЭПР обрушения σ_{wb}^{pp} и его длиной L , в то время как при умеренных углах падения ($\theta = 45^\circ$) прослеживается зависимость близкая к квадратичной (т.е. линейная зависимость от площади S).

Анализ поведения ЭПР обрушений на ГГ поляризации излучения/приема при различной ориентации гребня показал, что азимутальная зависимость проявляется только при $\theta = 45^\circ$ и практически отсутствует при $\theta = 70^\circ$.

Выявленные особенности рассмотрены в рамках модели квазизеркальных отражений, описанной в [22]. Сравнение теоретических и экспериментальных данных свидетельствует о том, что модель [22] качественно верно предсказывает экспериментальные данные при $\theta = 45^\circ$, но при $\theta = 70^\circ$ дает сильно завышенные значения ЭПР σ_{wb}^{pp} и не воспроизводит ее линейной связи с L .

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных при умеренных углах падения показало, что средний наклон зоны обрушений составляет порядка 15° , что согласуется с выводами лабораторного исследования предельно крутых гравитационных волн [41] и результатами стереофотосъемки в натуральных условиях [42].

Для объяснения расхождений при больших углах падения, предлагается модифицированная модель квазизеркальных отражений, учитывающая рассеяние от брызг, генерируемых обрушением. Одним из параметров этой модели является количество капель, образующихся при разрушении единицы

длины гребня, которое довольно тяжело измерить как в натуральных, так и в лабораторных условиях. Поэтому для количественных оценок в качестве этого параметра было выбрано значение, при котором расхождения теоретических и экспериментальных величин σ_{wb}^{pp} минимально.

Представленные в работе результаты дают простое физическое обоснование механизму рассеяния радиоволн, и вместе с тем в дальнейшем могут служить основой при создании методов восстановления параметров обрушений по РЛ данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goldstein H.* Sea Echo // Propagation of Short Radio Waves / Ed. by Kerr D.E. – IET, 1947. – P. 481-571.
2. *Бурдюгов В.М., Верещак А.И., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В.* Оценки параметров внутренних волн по радиолокационному сигналу // Известия АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 1987. – т. 23. – № 8. – С. 877-892.
3. *Lu H., He Y., Shen H., Cui L., Dou C.* A new method for the estimation of oceanic mixed-layer depth using shipboard X-band radar images // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. – 2010. – v. 28. – P. 962-967.
4. *Kalmykov A.I., Pustovoytenko V.V.* On polarization features of radio signals scattered from the sea surface at small grazing angles // Journal of Geophysical Research. – 1976. – v. 81. – April, – P. 1960-1964.
5. *Калмыков А.И., Островский И.Е., Розенберг А.Д., Фукс И.М.* Обратное рассеяние сантиметровых радиоволн взволнованной поверхностью моря при малых углах скольжения // Известия ВУЗов: Радиофизика. – 1966. – т. 9, № 6. – С. 1095-1099.
6. *Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Ostrovsky I.E., Rosenberg A.D.* Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1968. – v. AP-16, № 5. – P. 554-568.
7. *Wright J.* A new model for sea clutter // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1968. – v. AP-16, № 2. – P. 217-223.
8. *Barrick D.E.* Rough Surface Scattering Based on the Specular Point Theory // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1968. – v. AP-16, № 4. – P. 449-454.
9. *Valenzuela G.* Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves – a review // Boundary Layer Meteorology – 1978. – v. 13. – P. 61-85.
10. *Lewis B.L., Olin I.D.* Experimental study and theoretical model of high-resolution radar backscatter from the sea // Radio Science. – 1980. – v. 15. – P. 815-828.
11. *Lyzenga D.R., Maffett A.L., Shuchman R.A.* The Contribution of Wedge Scattering to the Radar Cross Section of the Ocean Surface // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1983. – v. 21. – P. 502-505.
12. *Banner M., Fooks E.* On the Microwave Reflectivity of Small-Scale Breaking Water Waves // Royal Society of London Proceedings Series A. – 1985. – v. 399. – P. 93-109.
13. *Kwoh D.S.W., Lake B.M.* A deterministic, coherent, and dualpolarized laboratory study of microwave backscattering from water waves, part 1: Short gravity waves without wind // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1984. – v. 9, № 5. – P. 291-308.
14. *Kwoh D.S.W., Lake B.M., Rungaldier H.* Microwave scattering from internal wave modulated surface waves: A shipboard real aperture coherent radar study in the Georgia strait experiment // Journal of Geophysical Research. – 1988. – v. 94, C10. – P. 12235-12248.

15. *Jessup A.T., Keller W.C., Melville W.K.* Measurements of sea spikes in microwave backscatter at moderate incidence // *Journal of Geophysical Research*. – 1990. – v. 95. – P. 9679-9688.
16. *Ericson E.A., Lyzenga D.R., Walker D.T.* Radar backscattering from stationary breaking waves // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – v.104, C12. – P. 29679-29695.
17. *Калмыков А.И., Курекин А.С., Лементя Ю.А., Островский И.Е., Пустовойтенко В.В.* Особенности рассеяния СВЧ излучения на обрушивающихся морских волнах // *Известия ВУЗов: Радиофизика*. – 1976. – т. 19, № 9. – С. 1315-1321.
18. *Plant W.J.* Microwave sea return at moderate to high incidence angles // *Waves in Random Media*. – 2003. – v. 13. – P. 339-354.
19. *Гутник В.Г., Кулемин Г.П., Шаранов Л.И., Горошко Е.А.* Интенсивность радиолокационных отражений от взволнованной морской поверхности при малых углах скольжения // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – т. 8, № 2. – С. 181-189.
20. *Mironov A.S., Dulov V.A.* Detection of wave breaking using sea surface video records // *Measurement Science and Technology*. – 2008. – v. 19, № 1. – doi: 10.1088/0957-0233/19/1/015405.
21. *Phillips O.M.* Radar returns from the sea surface – Bragg scattering and breaking waves // *Journal of Physical Oceanography*. – 1988. – v. 18. – P. 1063-1074.
22. *Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B.* A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. 1. Background model // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – v. 108, C3 8054, doi: 10.1029/2001JC001003.
23. *Hwang P.A., Sletten M.A., Toporkov J.V.* Analysis of radar sea return for breaking wave investigation // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – v. 113, C02003, doi:10.1029/2007JC004319.
24. *Haller M.C., Lyzenga D.R.* Comparison of radar and video observation of shallow water breaking waves // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – v. 41, № 4. – P. 832-844.
25. *Малиновский В.В.* Оценка связи параметров радиолокационного сигнала, отраженного от моря при малых углах скольжения, с характеристиками обрушений ветровых волн // *Морской гидрофизический журнал*. – 1991. – № 6. – С. 32-41.
26. *Frasier S.J., Liu Y., McIntosh R.E.* Space-time properties of radar sea spikes and their relation to wind and wave conditions // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – v. 103. – P. 18745-18758.
27. *Миронов А.С., Дулов В.А.* Статистические характеристики событий и диссипация энергии при обрушении ветровых волн // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – вып. 16. – С. 97-115.
28. *Fuchs J., Regas D., Waseda T., Welch S., Tulin M.P.* Correlation of hydrodynamic features with LGA radar backscatter from breaking waves // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1999. – v. 37. – P. 2442-2460.
29. *Малиновский В.В., Миронов А.С., Кориненко А.Е.* Влияние поверхностной пленки на небреговскую компоненту радиолокационного рассеяния // *Системы контроля окружающей среды*. – 2006. – С. 164-171.
30. *Kudryavtsev V., Akimov D., Johannessen J., Chapron B.* On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – v. 110. – C07016. – doi: 10.1029/2004JC002505.
31. *Malinovsky V., Sandven S., Mironov A., Korinenko A.* Identification of oil spills based on ratio of alternating polarization images from ENVISAT // *Proc. Geoscience and Remote Sensing Symp. IGARSS'07, IEEE Int.* – v. 2. – 2007. – P. 1326-1329.

32. *Liu X., Duncan J. H.* The effects of surfactants on spilling breaking waves // *Nature*. – 2003. – v. 421. – P. 520-523.
33. *Mouche A., Hauser D., Kudryavtsev V.* Observations and Modeling of the Ocean Radar Backscatter at C-Band in HH- and VV- Polarizations // *IGARSS'05*. – Vol. 2. – 2005. – P. 1006-1009.
34. *Dano E.B., Lyzenga D.R., Meadows G., Meadows L., van Sumeren H., Onstott R.* Radar Backscattering from Mechanically Generated Transient Breaking Waves - Part 2: Azimuthal and Grazing Angle Dependence // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 2001. – v. 26, № 2. – P. 201-215.
35. *Луценко В.И.* Пространственно-временные и поляризационные характеристики обратного рассеяния сантиметровых и миллиметровых радиоволн поверхностью моря // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2009. – № 5. – С. 41-59.
36. *Кравцов Ю.А., Моркотун А.В., Чурюмов А.Н.* Рассеяние электромагнитных волн на крутых морских мезомасштабных волночках: интерполяция результатов теории возмущений и геометрической теории дифракции // *Известия ВУ-Зов: Радиофизика*. – 2002. – т. 45, № 8. – С. 671-678.
37. *Skolnik M.I.* Introduction to Radar Systems. 2nd Edition. – McGraw-Hill Book Company, 1981. – 581 p.
38. *Anguelova M.D., Webster F.* Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – v. 111, C03017. doi: 10.1029/2005JC003158.
39. *Kudryavtsev V.N.* On the effect of sea drops on the atmospheric boundary layer // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – Vol. 111, C07020 doi: 10.1029/2005JC002970.
40. *Andreas E.L.* A New Sea Spray Generation Function for Wind Speeds up to 32 m/s // *Journal of Physical Oceanography*. – 1998. – v. 28. – P. 2175-2184.
41. *Caulliez G.* Self-similarity of near-breaking short gravity wind waves // *Physics of Fluids*. – 2002. – v. 14. – P. 2917-2920.
42. *Kosnik M.V., Dulov V.A.* Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface // *Measurement Science and Technology*. – 2011. – v. 22, № 015504. – doi: 10.1088/0957-0233/22/1/015504.
43. *Lee P.H.Y., Barter J.D., Beach K.L., Hindman C.L., Lake B.M., Rungaldier H., Shelton J.C., Williams A.B., Yee R., Yuen H.C.* What are the mechanisms for non-Bragg scattering from water wave surfaces? // *Radio Science*. – 1999. – v. 34. – P. 123-138.

Материал поступил в редакцию 25.03.2011 г.

После доработки 15.05.2011 г.

ПРИМЕЧАНИЯ И КОММЕНТАРИИ РЕДАКТОРА

¹ В рамках «капельной» модели не объясняется частотная – от частоты зондирующего сигнала, и поляризационная – от вида поляризации излучаемого и принимаемого сигналов, зависимости ЭПР. Не объясняется также и природа формирования морской поверхностью РЛ-сигнала при отсутствии обрушений, следовательно, при отсутствии над морской поверхностью капельно-брызгового облака. Это и стало причиной выполнения обширных экспериментальных и теоретических исследований, результатом которых стало установление резонансного (в широком диапазоне длин радиоволн) механизма взаимодействия радиоволн с морской поверхностью и разработка двухмасштабной ее электродинамической модели.

² Вообще говоря, в работах, выполненных в ИРЭ АН УССР, рассматривался более широкий диапазон длин радиоволн – от миллиметровых до метровых (см., например: Радиоокеанографические исследования морского волнения / под. ред. С.Я. Брауде – Киев.: Изд. АН УССР, 1962. – 116 с.).

³ Заметим, что в каждом поляризационном канале при наблюдении морской поверхности присутствует также и деполаризованная составляющая сигнала.

⁴ Высота 21 м не является в океанологии и метеорологии «стандартной» для измерения скорости ветра.

⁵ Здесь и далее авторы, по-видимому, несколько преувеличивают приоритет и вклад в изучение рассеяния радиоволн морской поверхностью опубликованной в 2005 г. работы [33], поскольку существование азимутальной зависимости ЭПР морской поверхности известно практически с первых шагов морской радиолокации, см., например:

1. Бартон Д. Радиолокационные системы / сокр. пер. с англ. под ред. Трофимова К.Н. – М.: Военное издательство, 1967. – 480 с.;

2. Сколник М.И. Отражение радиолокационного сигнала от морской поверхности / Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. (под. ред. Я.С. Иццоки). – М.: Сов. Радио. – 1976. – С. 320-355.

В рамках двухмасштабной модели («рябь на крупной волне») азимутальная зависимость ЭПР морской поверхности объясняется азимутальной анизотропией распределения уклонов крупных морских волн. Более того, именно эта зависимость, аналитический вид которой можно найти, например, в обзоре Р. Мура и А. Фэна (см. Moore R.K., Fung A.K. Radar determination of winds at sea // Proc. IEEE. – 1979. – v. 67, № 11. – P. 1504-1521), являлась основополагающей при разработке спутниковых скаттриметрических систем (океанографический радиолокационный КА «Seasat» был запущен на орбиту ИСЗ в 1978 г.).

⁶ По-видимому авторы хотели сказать, что результаты их работы согласуются с результатами работы [34], опубликованной десятью годами ранее (в 2001 г.).