

УДК 551.466

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА НА ОБРУШИВАЮЩИХСЯ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЯРНЫХ ВОЛНАХ

*С. А. Ермаков, И. А. Капустин, И. А. Сергиевская*

Институт прикладной физики РАН;

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород,  
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

В лабораторном эксперименте исследованы особенности радиолокационного рассеяния излучения СВЧ диапазона на сильно нелинейных (обрушивающихся) гравитационно-капиллярных волнах на поверхности воды. Показано, что рассеяние на сильно нелинейных волнах сантиметрового и частично дециметрового диапазонов обусловлено эффектами их «микрообрушения» и возбуждаемой на их профиле связанной (паразитной) капиллярной рябью, фазовая скорость которой совпадает с фазовой скоростью порождающих волн. Рассеяние на волнах метрового диапазона, для которых при больших амплитудах характерно сильное обрушение с опрокидыванием гребня, определяется в основном возбуждаемой при обрушении квазилинейной капиллярной рябью, фазовая скорость которой определяется дисперсионным соотношением для свободных поверхностных волн. Для волн промежуточного диапазона с длинами от дециметров до метра вклад в рассеяние дают как паразитная, так и свободная капиллярная рябь.

### ВВЕДЕНИЕ

Гравитационно-капиллярные волны с длинами порядка и менее метра характеризуются, даже при сравнительно небольших скоростях ветра, значительной крутизной (см., например, [1, 2]). Поэтому для развития методов радиолокационного зондирования морской поверхности крайне важным является изучение влияния сильной нелинейности этих волн, в частности, их обрушений, на формирование радиолокационных сигналов. Механизмы обрушения гравитационно-капиллярных волн оказываются существенно различными в разных диапазонах их длин. Так, гравитационно-капиллярные волны с длинами менее  $20 \div 30$  см и крутизной, превышающей некоторое критическое значение, возбуждают вблизи своих гребней «паразитную» рябь с длиной менее 1 см, которая для стационарных гравитационно-капиллярных волн «вморожена» в их профиль (см., например, [3]). Указанный эффект можно описать как результат генерации высших гармоник, частоты и волновые числа которых кратны частоте и волновому числу порождающей их (несущей) гравитационно-капиллярной волны и, вообще говоря, не удовлетворяют дисперсионному соотношению последней. Генерация гармоник приводит к отличию профиля стационарных нелинейных волн от синусоидального. При этом для гармоник с достаточно высоким номером их фазовая скорость может оказаться близкой к собственной скорости поверхностных волн на капиллярной ветви дисперсионной кривой. В результате такие резонансные гармоники проявляются в виде капиллярной ряби, распространяющейся по переднему склону несущей гравитационно-капиллярной волны. Паразитную капиллярную рябь можно описывать и как волны, возбуждаемые движущимся источником — областью высокой локальной кривизны в окрестности заостренного гребня несущей гравитационно-капиллярной волны (см., например, [4]). Форма гребня сильно нелинейных гравитационно-капиллярных волн имеет довольно сложный вид, характеризуемый наличием выпуклости с резким краем, после которой формируется цуг паразитной ряби,

распространяющейся по переднему склону (см., например, [5–7]). Формирование такого профиля можно рассматривать как проявление микрообрушения волны.

Обрушение сильно нелинейных волн метрового диапазона длин на глубокой воде носит иной характер и связано с формированием струи у гребня волны [8] и его опрокидыванием типа «spilling» или «plunging». Струя наиболее сильно выражена при малых значениях коэффициента поверхностного натяжения, например при наличии поверхностной плёнки, а для гравитационно-капиллярных волн на чистой поверхности воды она проявляется слабее [7]. Обрушение гребня гравитационно-капиллярной волны приводит к образованию возмущений на поверхности воды и образованию турбулизованной области в приповерхностном слое [2, 9].

К настоящему времени выполнен ряд лабораторных экспериментов по исследованию особенностей рассеяния радиолокационных сигналов крутыми ветровыми и механически генерируемыми поверхностными волнами (см. [10–14]), причём эксперименты [3, 10–12] соответствовали случаю генерации паразитной ряби, а [13, 14] — сильно обрушивающимся волнам.

Формирование радиолокационного сигнала в Ку-, К- и Ка-диапазонах (длины электромагнитных волн от 2,5 до 0,75 см) в условиях брэгговского рассеяния на микрообрушивающихся гравитационно-капиллярных волнах сантиметрового и дециметрового диапазонов длин можно объяснить наличием паразитной капиллярной ряби, возбуждаемой на их профиле [4]. В то же время физическая природа рассеивателей СВЧ сигналов при сильных обрушениях гравитационно-капиллярных волн остаётся слабо изученной. Хотя в [14] отмечалось, что при сильном обрушении возбуждаются поверхностные волны с длинами, в несколько раз меньшими длины обрушивающейся волны, более детально характеристики этих волн не обсуждались. Поэтому представляет интерес исследовать, как меняются характеристики радиолокационного сигнала при переходе от микрообрушений к сильно обрушивающимся волнам и что с точки зрения гидродинамики представляют собой сами рассеиватели сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов. Выявление природы этих рассеивателей принципиально важно при построении моделей радиолокационного рассеяния, в том числе при обосновании уже имеющихся моделей, использующих, в частности, предположение о наличии паразитной и свободной ряби в спектре ветровых сильно нелинейных гравитационно-капиллярных волн (см., например, [15, 16]).

Целями данной работы является изучение особенностей проявления обрушений волн в характеристиках радиолокационных сигналов (в частности в их доплеровских спектрах), а также собственно физической природы рассеивателей радиоволн при обрушениях поверхностных гравитационно-капиллярных волн. В настоящей статье представлены результаты лабораторных экспериментов по изучению особенностей обратного рассеяния электромагнитных волн Ка-диапазона сильно нелинейными гравитационно-капиллярными волнами с длинами от нескольких сантиметров до метров в условиях как микрообрушений, так и сильных обрушений.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Лабораторные эксперименты проводились в кольцевом ветроволновом бассейне Института прикладной физики РАН. Бассейн имеет овальную форму с осями, равными 6 и 4 м, ширина бассейна и глубина воды составляют 0,3 м. Схема экспериментальной установки в рабочей части бассейна представлена на рис. 1. Гравитационно-капиллярные волны в бассейне генерировались при помощи механического управляемого волнопродуктора, работающего либо в непрерывном режиме на задаваемой частоте, либо в режиме волновых пакетов с меняющейся частотой.

Длины гравитационно-капиллярных волн измерялись двумя разнесёнными волнографами, а также с помощью фотосъёмки через боковые иллюминаторы бассейна. Величина орбитальной скорости частиц жидкости в гравитационно-капиллярных волнах измерялась лабораторным аку-

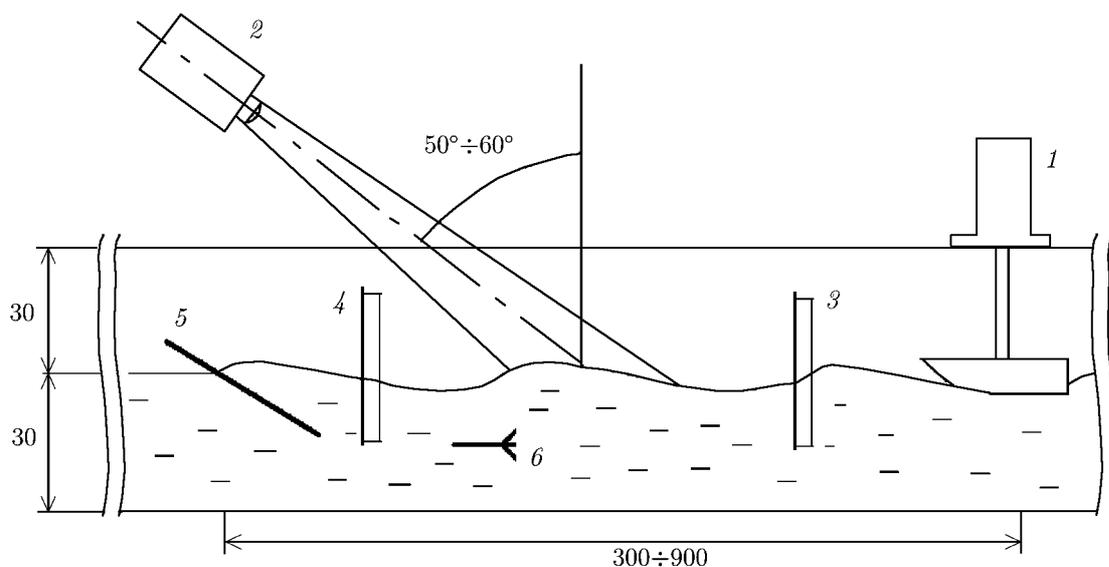


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (все размеры указаны в сантиметрах): 1 — волнопродуктор, 2 — СВЧ скаттерометр, 3, 4 — струнные волнографы, 5 — волногаситель (наклонный пляж), 6 — акустический измеритель скорости (ADV 16 МГц)

стическим измерителем скорости течений SonTek (16-MHz Acoustic Doppler Velocimeter, ADV). Измерительный объём последнего равен  $0,27 \text{ см}^3$  и представляет собой цилиндр с радиусом  $r = 0,3 \text{ см}$  и высотой  $h = 0,9 \text{ см}$ . Рассеяние акустического сигнала происходит на специально помещённых в воду частицах с нейтральной плавучестью, средний диаметр которых равен  $10 \text{ мкм}$ .

Волны сантиметрового и дециметрового диапазонов возбуждались в непрерывном режиме на частотах от  $1,7$  до  $5 \text{ Гц}$  (соответствующие длины волн от  $54$  до  $6,5 \text{ см}$ ) на расстояниях от области измерений около  $7$  и  $3 \text{ м}$  соответственно.

Для возбуждения сильно нелинейных волн большей длины (лежащей в дециметровом или метровом диапазонах) с сильным обрушением гребня использовался эффект дисперсионного сжатия волнового пакета с линейной частотной модуляцией. По мере распространения такого пакета, в силу зависимости скорости спектральных компонент гравитационно-капиллярных волн от частоты, на некотором расстоянии от волнопродуктора происходит дисперсионная фокусировка волны. Выбором диапазона и скорости изменения частоты можно добиться весьма значительного увеличения амплитуды отдельных колебаний в волне с линейной частотной модуляцией в области дисперсионной фокусировки. На рис. 2 показаны примеры записей профилей волны с линейной частотной модуляцией, полученные по данным измерений струнными волнографами, как в области её генерации, так и вблизи области её максимальной дисперсионной фокусировки. Максимальная амплитуда волны в пакете в области фокусировки возрастает более чем в два раза, что позволяет достичь значений крутизны гравитационно-капиллярных волн, при которых происходит её сильное обрушение (см. также [8]). В ходе эксперимента за счёт выбора скорости изменения частоты в пакете с линейной частотной модуляцией достигалось регулярное обрушение волны на заданном расстоянии от точки его генерации (в эксперименте это расстояние составило  $9 \text{ м}$ ), а именно в области облучённого радиолокатором пятна на поверхности воды. В силу особенностей экспериментальной установки, связанных с ограничениями на длительность возбуждаемого пакета с линейной частотной модуляцией и на скорость модуляции его частоты, волновой пучок в области фокусировки содержал два колебания достаточно большой амплитуды и,

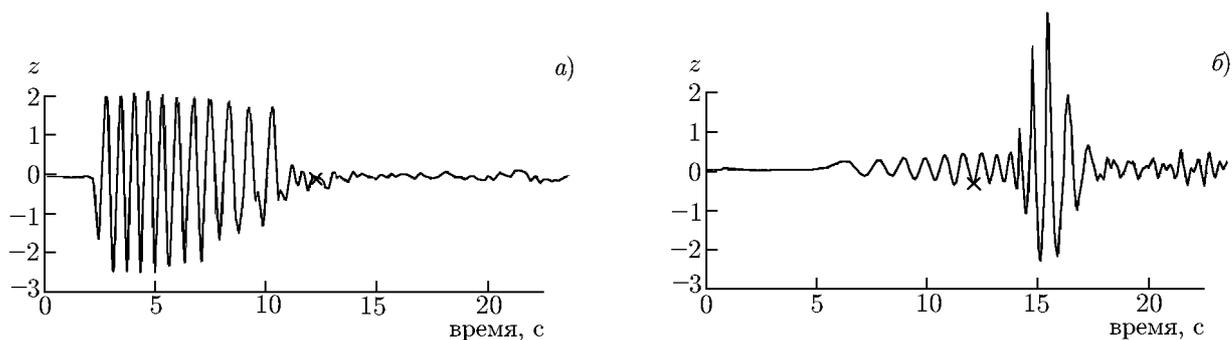


Рис. 2. Профили  $z(t)$  волны с линейной частотной модуляцией вблизи волнопродуктора (а) и в области максимальной фокусировки (б)

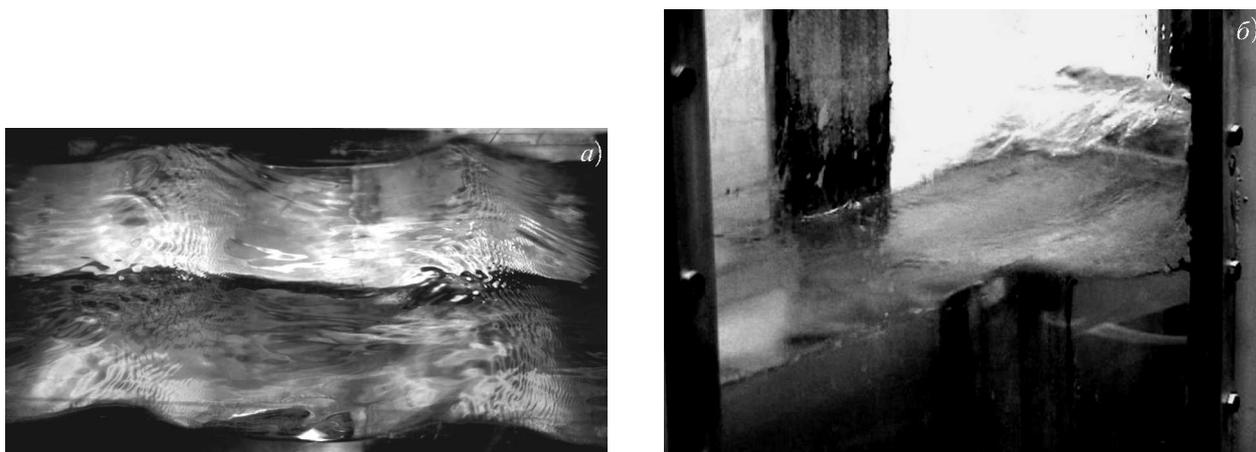


Рис. 3. Фотографии сильно нелинейных поверхностных гравитационно-капиллярных волн: (а) — волны сантиметрового и дециметрового диапазонов с паразитной рябью; (б) — волна метрового диапазона длин с обрушением гребня

соответственно, два следующих друг за другом обрушения.

Оценка крутизны обрушающихся волн по данным экспериментов дала величину, близкую к 0,25, что по классификации [8] соответствует случаю обрушению типа «spilling».

Типичные примеры обрушений гравитационно-капиллярных волн: микрообрушение с образованием паразитной ряби и сильное обрушение («spilling») с опрокидыванием гребня приведены на рис. 3.

Измерения характеристик рассеяния проводились с использованием когерентного СВЧ скатерометра Ка-диапазона (рабочая длина волны 8,7 мм), позволяющего измерять как интенсивность, так и частотный спектр рассеянного сигнала. Измерения проводились при углах падения  $50^\circ \div 60^\circ$ . Напомним, что радиолокационное рассеяние при умеренных (более  $30^\circ \div 40^\circ$ ) углах падения  $\theta$  электромагнитных волн удовлетворительно описывается брэгговским механизмом [17], согласно которому интенсивность радиолокационного сигнала пропорциональна интенсивности гравитационно-капиллярных волн с волновым числом

$$k_b = 2k_e \sin \theta, \quad (1)$$

где  $k_e$  — волновое число падающей электромагнитной волны, а сдвиг частоты обратно рассеянной электромагнитной волны относительно частоты падающей (т. е. доплеровский сдвиг) равен

$$f_D = k_b V / (2\pi), \quad (2)$$

где  $V$  — скорость рассеивающей брэгговской волны. В условиях проведённых экспериментов брэгговская длина волны отвечала значениям, близким к 5 мм. Отметим, что экспериментальное подтверждение справедливости брэгговского механизма рассеяния дано, в частности, в работе [18].

Все эксперименты проводились с использованием водопроводной воды. Во избежание возможного влияния плёнок поверхностно-активных веществ на волнение, поверхность воды в бассейне периодически очищалась: плёнки, образующиеся при всплывании поверхностно-активных веществ из объёма воды на её поверхность, сгонялись ветром к наклонному пляжу в конце рабочей части бассейна и удалялись промокательной бумагой.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Гравитационно-капиллярные волны сантиметрового и дециметрового диапазонов

Рассмотрим вначале результаты экспериментов по радиолокационному рассеянию на периодических крутых гравитационно-капиллярных волнах с частотами в диапазоне  $2,5 \div 5$  Гц (соответствующие длины волн  $25 \div 6,5$  см). Типичный пример доплеровского спектра радиолокационного сигнала при рассеянии на крутых волнах с длинами менее 25 см приведён на рис. 4.

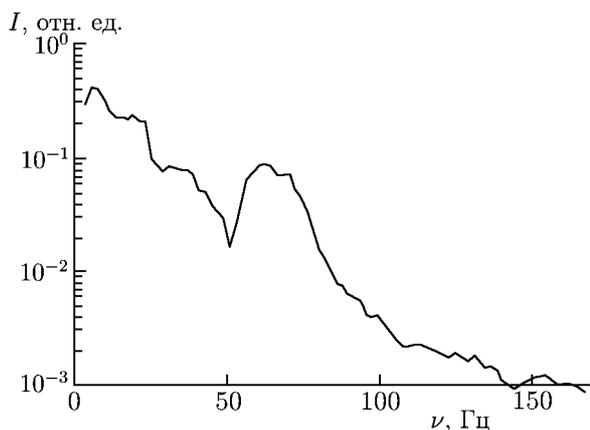


Рис. 4. Доплеровский спектр радиолокационного сигнала для гравитационно-капиллярной волны с частотой 4 Гц ( $I$  — интенсивность рассеянного сигнала,  $\nu$  — частота)

Несложно убедиться, что положение пика в доплеровском спектре отвечает брэгговскому резонансу при рассеянии на паразитной ряби, возбуждаемой крутыми гравитационно-капиллярными волнами. Действительно, брэгговский пик проявляется в доплеровском спектре лишь при значениях крутизны несущих гравитационно-капиллярных волн, превышающих некоторое пороговое значение, в окрестности которого интенсивность радиолокационного сигнала на частотах спектрального пика резко возрастает с крутизной несущих гравитационно-капиллярных волн (см. рис. 5а, а также [3]). Такой пороговый характер зависимости интенсивности рассеяния согласуется с результатами лабораторных измерений характеристик паразитной ряби оптическими волнографами. Как известно (см. [16, 19]), характерные длины волн паразитной ряби равны

$0,5 \div 0,7$  см вблизи гребней крутых гравитационно-капиллярных волн, т. е. соответствуют брэгговской длине в Ка-диапазоне, уменьшаясь вдоль переднего склона гравитационно-капиллярной волны. Крутизна ряби, как и интенсивность радиолокационного рассеяния на рис. 5а, пороговым образом растут с ростом крутизны несущих гравитационно-капиллярных волн, что видно из рис. 5б (см. также [16, 19]). Заметим, что значения крутизны гравитационно-капиллярных волн, отвечающие пороговому росту радиолокационного сигнала (рис. 5а) и генерации паразитной ряби (рис. 5б) близки друг к другу и составляют примерно 0,1. Вторым свидетельством рассеяния на паразитной ряби является то, что фазовая скорость брэгговской волны, рассчитанная по данным измерений доплеровских сдвигов, растёт с увеличением длины несущих гравитационно-капиллярных волн (см. рис. 6а). Если бы брэгговскими рассеивателями были свободные волны, то постоянной брэгговской длине волны отвечал бы постоянный доплеровский сдвиг и, соответственно, постоянная фазовая скорость, не зависящая от частоты несущих гравитационно-капиллярных

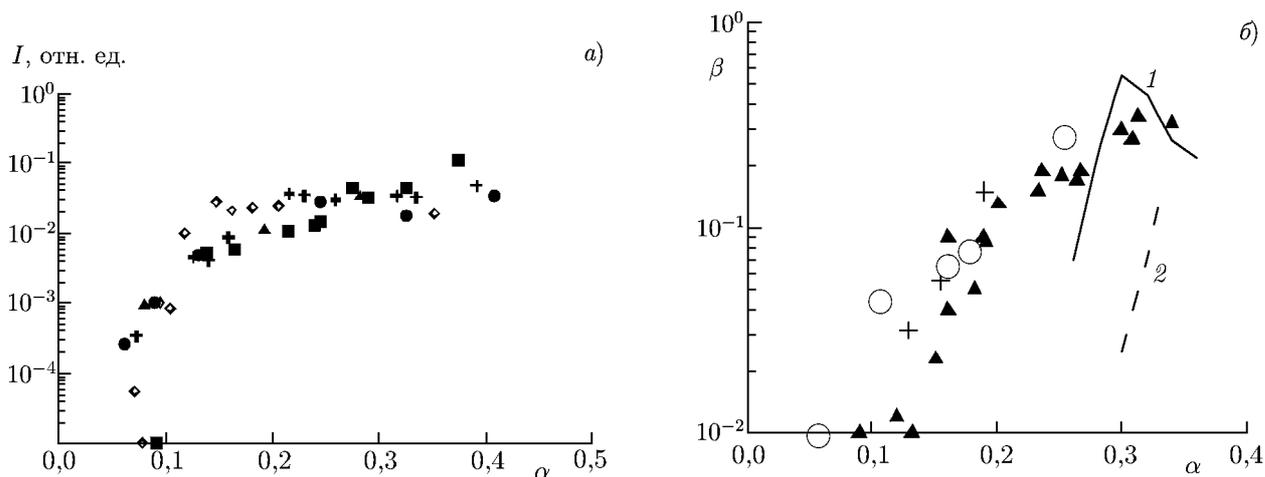


Рис. 5. Панель (а) — интенсивность радиолокационного сигнала  $I$  Ка-диапазона как функция крутизны гравитационно-капиллярных волн  $\alpha$ : символы  $\bullet$  соответствуют 4,5 Гц,  $\blacktriangle$  — 4 Гц,  $\diamond$  — 3,5 Гц,  $+$  — 3 Гц,  $\blacksquare$  — 5 Гц. Панель (б) — крутизна паразитной ряби  $\beta$  вблизи вершин несущих гравитационно-капиллярных волн с частотами 7 Гц ( $+$ ), 5,9 Гц ( $\circ$ ) и 4 Гц ( $\blacktriangle$ ). Кривые — теоретические зависимости для несущих гравитационно-капиллярных волн с длинами 8 см (кривая 1 по данным [19]) и 10 см (кривая 2, по данным [20])

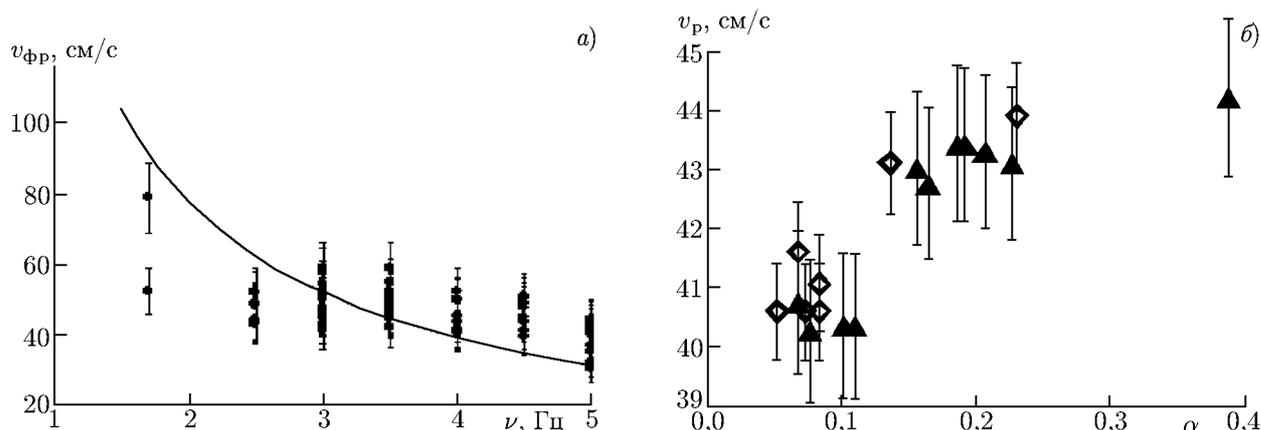


Рис. 6. Панель (а) — зависимость измеренных фазовых скоростей ряби  $v_{фр}$ , от частоты несущей волны при различной крутизне  $\alpha$  последней, изменяющейся в диапазоне примерно от 0,7 до 0,4. Сплошная кривая — дисперсионное соотношение для линейных гравитационно-капиллярных волн. Панель (б) — зависимость скорости ряби  $v_p$  ( $\blacktriangle$ ), измеренной по радиолокационным доплеровским сдвигам, и скорости крутой гравитационно-капиллярной волны с частотой 5 Гц, измеренные по изображениям профиля несущих гравитационно-капиллярных волн ( $\diamond$ ) в зависимости от крутизны  $\alpha$

волн. Эта скорость, при расчёте по линейному дисперсионному соотношению

$$\omega = \sqrt{gk + \sigma k^3 / \rho}, \tag{3}$$

где  $\omega$  — круговая частота гравитационно-капиллярной волны,  $k$  — её волновое число,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  — плотность воды, в условиях эксперимента имеет величину около 31 см/с.

Из экспериментальных данных следует, однако, что доплеровские сдвиги и, соответственно, скорость брэгговской ряби растут с уменьшением частоты крутых гравитационно-капиллярных

волн приблизительно в согласии с дисперсионным соотношением для последних. Это позволяет заключить, что брэгговской волной при наличии крутых гравитационно-капиллярных волн рассматриваемого диапазона длин является паразитная рябь. Следует отметить, что сопоставление скоростей паразитной ряби и скоростей несущих волн с дисперсионным соотношением линейных гравитационно-капиллярных волн является в значительной мере качественным, поскольку фазовая скорость нелинейных гравитационно-капиллярных волн зависит от их амплитуды (крутизны) и, вообще говоря, несколько отличается от линейной. Данное обстоятельство иллюстрирует рис. 6б, где приведены зависимости скорости брэгговских волн и скорости гравитационно-капиллярных волн от крутизны последних. Как и следовало ожидать, скорости ряби и несущих волн увеличиваются из-за нелинейных эффектов и остаются приблизительно равными друг другу, что свидетельствует о том, что профиль волны остаётся стационарным в широком диапазоне изменения амплитуды крутых гравитационно-капиллярных волн.

## 2.2. Гравитационно-капиллярные волны дециметрового диапазона

Обсудим теперь особенности радиолокационного рассеяния крутыми волнами дециметрового диапазона с длинами, превышающими  $25 \div 30$  см. В качестве примера рассмотрим квазипериодические гравитационно-капиллярные волны с длиной волны около 54 см (частота 1,7 Гц). Для волн с такой длиной размер облучённой радиолокатором области на поверхности воды меньше длины гравитационно-капиллярной волны. Поэтому становится возможен анализ не только средних по профилю гравитационно-капиллярных волн спектров радиолокационного сигнала, но и разделение во времени сигналов, соответствующих рассеянию от гребней и впадин гравитационно-капиллярных волн. Пример одновременной записи радиолокационного сигнала и возвышений представлен на рис. 7а. Интенсивность радиолокационного сигнала при рассеянии от впадины дециметровой гравитационно-капиллярной волны, как видно из рис. 7а, оказывается значительно более низкой, чем при рассеянии от гребня, что свидетельствует о существенной неоднородности распределения спектральной интенсивности брэгговских рассеивателей по профилю гравитационно-капиллярных волн. На рис. 7б представлены спектры радиолокационного сигнала, отражённого от гребня, для двух значений крутизны несущих гравитационно-капиллярных волн: 0,27 и 0,22. При меньшей крутизне на гребне волны чаще всего наблюдаются спектры с двумя пиками с частотами порядка 80 и 120 Гц или с одним пиком на частоте около 120 Гц. Для большей крутизны несущей волны преобладают спектры с одним низкочастотным пиком на частоте около 80 Гц. Частота максимума высокочастотного пика соответствует скоростям вынужденных волн, т. е. волн, движущихся со скоростью несущей гравитационно-капиллярной волны. Частота максимума низкочастотного пика отвечает скорости свободной ряби, которая движется с фазовой скоростью квазилинейных волн и переносится полем орбитальной скорости на гребне крутой гравитационно-капиллярной волны. Данный вывод сделан на основе оценки по дисперсионному соотношению скорости брэгговской волны с длиной 0,5 см и по результатам прямых измерений с помощью ADV орбитальной скорости крутой гравитационно-капиллярной волны на заданной глубине с последующим её пересчётом на поверхность.

## 2.3. Гравитационно-капиллярные волны метрового диапазона

Рассмотрим, наконец, результаты исследований радиолокационного рассеяния на обрушающихся волнах метрового диапазона длин. Как уже сказано выше, для получения обрушения достаточно длинных волн использовалась методика дисперсионного сжатия пакета волн с линейной частотной модуляцией. При этом в силу технических ограничений на характеристики возбужда-

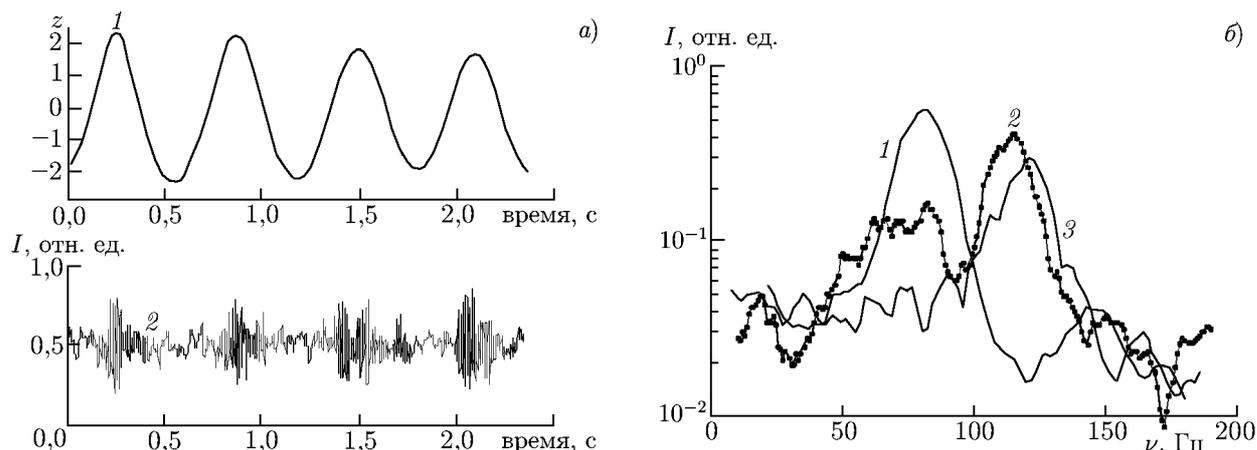


Рис. 7. Панель (а) — одновременная запись радиолокационного сигнала  $I$  и профиля  $z$  волны с частотой 1,7 Гц; 1 — гребень, 2 — впадина. Панель (б) — спектры радиолокационного сигнала при отражении от гребня волны с частотой 1,7 Гц; 1 — крутизна несущей волны равна 0,27; 2 и 3 — крутизна несущей волны близка к 0,22

емого в эксперименте пакета с линейной частотной модуляцией, последний не удавалось сжать до уединённой волны, так что в зоне дисперсионной фокусировки наблюдался пуг, содержащий 2÷3 колебания с большой амплитудой. При этом наблюдалось, как правило, два обрушения с различными интенсивностями. Доплеровские спектры для случая наиболее сильного обрушения волн, отвечающие рассеянию от второго гребня (см. рис. 2) и от впадины представлены на рис. 8.

Используя данные о доплеровских сдвигах и фазовых скоростях гравитационно-капиллярных волн,  $V_{\text{ф}}$ , при сильном обрушении волны с максимальной амплитудой 4,7 см, приведённые в табл. 1, найдём, какому типу рассеивателей соответствуют наблюдающиеся в доплеровском спектре пики на рис. 8. В доплеровском спектре отсутствует пик на частоте, отвечающей фазовой скорости несущих волн. «Центр тяжести» пика в доплеровском спектре лежит на частотах около 100÷120 Гц, что может соответствовать лишь фазовой скорости свободных брэгговских волн  $V_{\text{ф свобод}}$ , сносимых орбитальной скоростью  $V_{\text{орб}}$  несущей волны. Это следует из сравнения оценок доплеровских сдвигов для паразитной и свободной рассеивающей брэгговской ряби с результатами измерений (см. табл. 1). Отметим, что пик в доплеровском спектре является достаточно размытым, что, по-видимому, связано со скоростями турбулентных пульсаций в приповерхностном слое, генерируемых при обрушении волны.

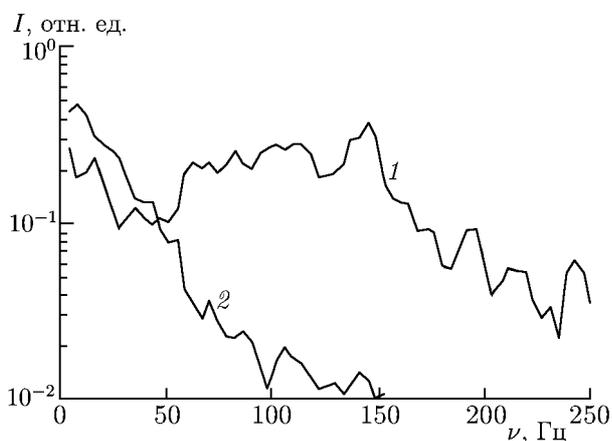


Рис. 8. Доплеровские спектры, измеренные на гребне (кривая 1) и во впадине (2) обрушающейся волны

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко сформулируем основные результаты данной работы.

В условиях лабораторного эксперимента на основе анализа доплеровских спектров радиолокационных сигналов Ка-диапазона при зондировании при умеренных углах падения (брэгговское

Таблица 1. Фазовые скорости поверхностных волн и радиолокационные доплеровские сдвиги при рассеянии на сильно обрушающихся волнах с периодом около 1 с

$V_{\text{ф свобод}}\text{ несущих волн с периодом } T \approx 1 \text{ с}$	$f_{\text{Д}}$ для паразитной ряби на несущих волнах (расчёт)	$V_{\text{греб}}\text{ на гребнях несущих волн (измерения)}$	$V_{\text{ф свобод}}\text{ свободной брэгговской ряби (расчёт)}$	$f_{\text{Д}}$ для брэгговской свободной ряби на гребнях несущих волн (расчёт)	$f_{\text{Д}}$ (измерения)
156 см/с	240 Гц	35 см/с	30 см/с	100 Гц	110÷120 Гц

рассеяние) исследована природа обратного рассеяния электромагнитных волн на гравитационно-капиллярных волнах с длинами от нескольких сантиметров до метров. Установлено, что:

1) рассеяние на периодических гравитационно-капиллярных волнах сантиметрового и частично дециметрового диапазона длин (длины порядка и менее 30 см) связано с их микрообрушением и обусловлено паразитной капиллярной рябью, «вмороженной» в профиль несущих гравитационно-капиллярных волн;

2) рассеивателем при сильном обрушении гравитационно-капиллярных волн метрового диапазона длин является свободная капиллярная рябь, движущаяся в поле орбитальной скорости несущих волн;

3) рассеяние на дециметровых гравитационно-капиллярных волнах промежуточного диапазона длин (от 2÷3 дм до 1 м) обусловлено как паразитной рябью, так и свободными волнами с резонансной (брэгговской) длиной волны.

Отметим, что сформулированные результаты получены при изучении радиолокационного рассеяния в Ка-диапазоне, когда длина брэгговских волн меньше 1 см. При этом, если результат, касающийся радиолокационного рассеяния при микрообрушениях волн с длинами порядка и менее 30 см, является развитием ранее полученных в [3, 10–12] результатов, то вывод о генерации свободной ряби при сильном обрушении более длинных волн в эксперименте получен впервые. Выявление физической природы рассеивателей при радиолокационном зондировании в более длинноволновых диапазонах, например в X- или С-диапазонах, требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 11–05–00295, 10–05–00101, 11–05–97027, 11–05–97029), программы ОФН РАН «Радиофизика», ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (госконтракт 16.515.11.5077), а также грантов Правительства Российской Федерации (договоры 11.G34.31.0048 и 11.G34.31.0078).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
2. Филиппс О. М. Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 320 с.
3. Gade M., Alpers W., Ermakov S. A., et al. // J. Geophys. Res. С. 1998. V. 103, No. 10. P. 21 697.
4. Longuet-Higgins M. // J. Fluid Mech. 1995. V. 301. P. 79.
5. Duncan J. H., Qiao H., Philomin V., Wenz A. // J. Fluid Mech. 1999. V. 379. P. 191.
6. Qiao H., Duncan J. H. // J. Fluid Mech. 2001. V. 439. P. 57.

7. Duncan J. H. // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2001. V. 33. P. 519.
8. Rapp R. J., Melville W. K. // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A.* 1990. V. 311. P. 735.
9. Melville W. K., Veron F., White C. J. // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 454. P. 203.
10. Rozenberg A. D., Ritter M. J., Melville W. K., et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 1999. V. 37, No. 2. P. 1052.
11. Kwoh D. S. W., Lake B. M. // *IEEE J. Oceanic Eng.* 1984. V. 9. P. 291.
12. Plant W. J., Dahl P. H., Keller W. C. // *J. Geophys. Res. C.* 1999. V. 104, No. 11. P. 25 853.
13. Melville W. K., Loewen M. R., Felizardo F. C., et al. // *Nature.* 1988. V. 336. P. 54.
14. Walker D. T., Lyzenga D. R., Ericson E. A., Lund D. E. // *Proc. Roy. Soc. Lond. A.* 1996. V. 452. P. 1953.
15. Kudryavtsev V., Johannessen J. // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. Art. no. L20310.
16. Ермаков С. А. Влияние плёнок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. 165 с.
17. Басс Ф. Г., Фукс И. П. Рассеяние волн на статически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
18. Ермаков С. А., Макаров Е. В., Сергиевская И. А. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43, № 2. С. 1.
19. Ермаков С. А., Рувинский К. Д., Салашин С. Г., Фрейдман Г. И. // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1986. Т. 22, № 10. С. 1072.
20. Charnotskii M., Naugolnikh K., Ostrovsky L., Smirnov A. // *Nonlinear Processes Geophys.* 2002. V. 9. P. 281.

Поступила в редакцию 23 апреля 2012 г.; принята в печать 27 июля 2012 г.

## ON PECULIARITIES OF SCATTERING OR MICROWAVE RADAR SIGNALS FROM BREAKING GRAVITY-CAPILLARY WAVES

*S. A. Ermakov, I. A. Kapustin, and I. A. Sergievskaya*

We performed laboratory experiments to study peculiarities of radar scattering of microwave radiation from strongly nonlinear (breaking) gravity-capillary waves on the water surface. It was shown that the scattering from strongly nonlinear waves within the centimeter and, partially, decimeter wavelength range is due to the effects of their “micro-breaking” and the coupled (spurious) capillary ripples excited on their profile. The phase velocity of the ripples coincides with the phase velocity of the generating waves. The scattering from meter waves which at high amplitudes are characterized by strong breaking with tipping of the crest, is determined mainly by the quasi-linear capillary ripples, whose phase velocity is determined by the dispersion relationship for free surface waves. In the case of the waves within an intermediate range, which have lengths from several decimeters to one meter, both the spurious and free capillary ripples contribute to the scattering.