

УДК 621.396.96

А.В. УЗЛЕНКОВ

*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины*

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СПЕКТРЫ СВЧ И КВЧ СИГНАЛОВ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

*Представлены результаты радиолокационного зондирования взволнованной водной поверхности в СВЧ и КВЧ диапазонах частот в лабораторных и натуральных условиях. Рассмотрено влияние растворимых и нерастворимых поверхностно-активных веществ на частотные и пространственные свойства рассеянных водой сигналов в условиях преобладания резонансного механизма рассеивания электромагнитного поля. Отмечены снижение центральных частот, сужение доплеровских спектров и рост анизотропии спектров сигналов миллиметрового диапазона, реакция спектров сантиметровых сигналов менее выражена или отсутствует. Предполагается, что бимодальный характер спектров сигналов связан с совместным влиянием разных механизмов рассеивания ЭМВ на начальных этапах развития волнения. Обсуждаются условия и границы применимости спектральных признаков для улучшения наблюдаемости загрязнений.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, морское волнение, капиллярные волны (КВ), гравитационные волны (ГКВ), радиолокация, доплеровские спектры, поверхностно-активные вещества (ПАВ), загрязнения, слики.

### Введение

По данным европейских служб экологического надзора прирост загрязнений морских акваторий поверхностно-активными веществами (ПАВ), начиная с 90-х гг., происходит, в основном, за счет мелких и средних разливов. Например, из 395-ти официально зарегистрированных на Балтике в 1998 году разливов, около 90 % содержали менее 1 тонны загрязняющих веществ. Мелкие разливы происходят в 3–4 раза чаще крупных аварийных сбросов и, в основном, недалеко от прибрежной зоны [1, 2]. Поэтому, несмотря на небольшие количества ПАВ в таких пятнах или сликах, они с высокой вероятностью достигают берега, нанося ощутимый вред уязвимой прибрежной экосистеме. Такие разливы случайны по времени и месту возникновения и характерны быстрым растеканием ПАВ. К примеру, 1 м<sup>3</sup> сырой нефти летом в безветренную погоду растекается в пятно площадью 7853 м<sup>2</sup> всего за 1,5 часа [3].

Причины такого положения эксперты усматривают в росте коммерческого, малотоннажного и частного судоходства при отставании развития портовых инфраструктур для сбора судовых отходов, незаконных выбросах судовых отходов нефтепродуктов, именуемых в экологических отчетах «рабочими выбросами» и т.п. [1].

Описанная выше ситуация предъявляет высокие требования к оперативности и непрерывности контроля прибрежных акваторий (гаваней, морских путей, бухт, рейдов, припортовых зон и т.п.), что трудно обеспечить только средствами космического

глобального мониторинга. При всех преимуществах этих средств, они имеют низкую периодичность последовательных обзоров и могут давать существенные погрешности именно в береговой зоне, что связано с синтезом апертуры при переходе луча РЛС через границу суши - море и наоборот [4].

Главным критерием наличия ПАВ на воде является изменение энергетического спектра волнения  $W(\vec{k})$  в присутствии ПАВ, характеризуемого отношением [5]:

$$K_{\Gamma} = W_d(\vec{k})/W_0(\vec{k}),$$

где  $W_0$  и  $W_d$  – спектры волнения в чистой воде и в сликах и сопровождающееся возникновением радиолокационного контраста  $D_E$  [6]:

$$D_E = 10 \lg(\bar{P}_{\Gamma}/\bar{P}_s),$$

где  $\bar{P}_{\Gamma}$  и  $\bar{P}_s$  – средние мощности сигналов, рассеянных загрязненными и чистыми участками морской поверхности, соответственно.

Со временем, после полного растекания ПАВ, активность пленки падает, и контраст снижается до уровня 3,0 дБ и ниже [7].

Присутствие ПАВ является не единственной причиной возникновения сликов на морской поверхности.

Многие слики в прибрежной зоне имеют естественное происхождение и поэтому обнаружение загрязнений только по величине амплитудного контраста  $D_E$  может приводить к ошибочным результатам. Поиск путей повышения контраста антропо-

генных сликов малых и средних размеров предполагает расширение пространства признаков присутствия ПАВ, что включает в себя изучение влияния ПАВ не только на энергетические, но и спектральные свойства сигналов различных диапазонов. При этом очень важен анализ условий и ограничений для их применения.

Данная работа посвящена влиянию пленок ПАВ на спектральные и пространственные характеристики сигналов СВЧ и КВЧ диапазонов, рассеянных взволнованной водной поверхностью в условиях, обеспечивающих преобладание резонансного механизма рассеивания. В работе представлены результаты лабораторных и натурных экспериментов по изучению влияния растворимых и нерастворимых ПАВ на указанные параметры сигналов.

## 1. Экспериментальная часть

### 1.1. Методика и аппаратура экспериментальных исследований

Изучение спектров сигналов, рассеянных взволнованной водной поверхностью в лабораторных и натурных условиях проводилось с помощью многочастотного макета радиолокационного комплекса (РЛК), работающего в режиме непрерывного излучения и гомодинного приема, имеющего технические характеристики, приведенные в табл. 1.

Структурная схема одного из частотных каналов РЛК, включая общую систему регистрации данных, приведена на рис. 1.

Таблица 1

Технические характеристики РЛК

| №  | Параметры   | Значения параметров   |                    |                    |                   |
|----|---|---|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1  | Длина волны $\lambda$ , мм  | 8,9 (5,1)   | 14,6               | 29                 | 100               |
| 2  | Мощность излучения, мВт   | 20(12)  | 150                | 200                | 15                |
| 3  | Поляризация передачи/приема   | V/V   | V/V                | V/V                | 45°/135°          |
| 4  | Ширина ДН ( по уровню -3 дБ)<br>$2\Delta\theta_E$ ( $2\Delta\theta_H$ ), град | 2,1 <sub>E</sub> , 2,6 <sub>H</sub>                                 | 3,1 (4,5)          | 11,9 (12,6)        | 9,7               |
| 5  | Размер элемента разрешения, мхм,<br>(м <sup>2</sup> )                         | ~1×0,5<br>(0,5)   | ~1,3×0,9<br>(1,17) | ~1,7×1,2<br>(2,04) | ~1,5×1,2<br>(1,8) |
| 6  | Наибольший разнос фазовых центров антенн, м                                   | 0, 42   |                    |                    |                   |
| 7  | Отношение сигнал/шум, дБ  | не менее 45   |                    |                    |                   |
| 8  | Динамический диапазон, дБ   | УНЧ-  | Не менее 70        |                    |                   |
|    |   | АЦП-  | Не менее 72        |                    |                   |
| 9  | Усиление УНЧ, дБ  | 97 (в полосе 2-20000 Гц)  |                    |                    |                   |
| 10 | Частота дискретизации, Гц   | 200000 [Гц]/ Nканалов , где $1 \leq N \leq 6$ ( $F_{min}=33000$ Гц) |                    |                    |                   |
| 11 | Полоса частот анализа, Гц   | 2 – 16500   |                    |                    |                   |
| 12 | Частотное разрешение, Гц  | Не хуже 0,488   |                    |                    |                   |

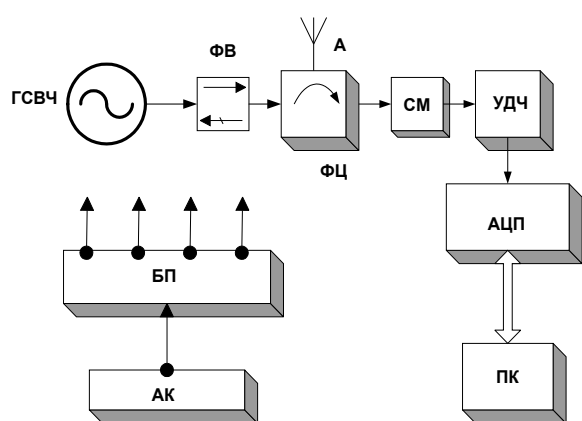


Рис. 1. Структурная схема одного канала РЛК: ГСВЧ – генератор, ФВ – вентиль и ФЦ – циркулятор ферритовые; А – приемно-передающая антенна; СМ – смеситель; УДЧ – усилитель доплеровских частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – компьютер; АК – аккумулятор 12 В; БП – источник вторичных напряжений

В качестве передатчиков ГСВЧ использованы: в каналах 8,9, 14,6, 29 мм – генераторы на диодах Ганна, в канале 5,1 мм – на лавинно-пролетном диоде и в канале 100 мм использован транзисторный передатчик. ГСВЧ включен через развязывающий ферритовый вентиль ФВ. В качестве антенн А в каналах 5,1, 8,9, 14,6 и 29 мм применены пирамидальные рупорные антенны оптимальной геометрии и параболическая антенна с вибраторным облучателем в канале 100 мм. Развязку приемников и передатчиков, работающих на общую антенну, во всех каналах обеспечивают ферритовые циркуляторы ФЦ. В канале 100 мм применена поляризационная развязка трактов. С выхода смесителя СМ напряжение биений доплеровской частоты поступает на вход усилителя УДЧ, имеющего регулируемое усиление от 54 до 96 дБ. Далее усиленный сигнал поступает на вход многоканального аналого-цифрового преобразователя АЦП на борту контроллера семейства MSP430 и затем, посредством пре-

образователя FIFO-USB, в компьютер ПК. Все частотные каналы РЛК смонтированы компактно на единой поворотной-наклонной платформе (см. пункт 6 табл. 1).

Данные обрабатываются прикладным программным пакетом, выполняющим стандартные процедуры спектрального анализа (БПФ, весовую обработку, накопление и усреднение) и обеспечивающим взаимодействие с аппаратными средствами компьютера и визуализацию результатов. Данный РЛК отличается от макета, описанного в [8] несколько иными рабочими частотами, более высокой частотой преобразования АЦП(MSP) – 200 кГц, что при 5-тиканальном приемнике РЛК обеспечивает темп взятия отсчетов 40 кГц, более высокой скоростью обмена с ПК по каналу USB – 1 МБ/с. Комплекс производит непрерывную запись скорости ветра с помощью электронного анемометра.

Выбор длин волн макета, как и в [8], осуществлен с использованием дисперсионного соотношения для воды [9]:

$$V_{\phi}(\lambda) = (g\lambda/2\pi + 2\pi\alpha/\rho\lambda)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $g$  – коэффициент поверхностного натяжения, плотность жидкости и ускорение свободного падения, соответственно;

$\lambda$  – длина поверхностной волны.

График данной зависимости приведен на рис. 2.

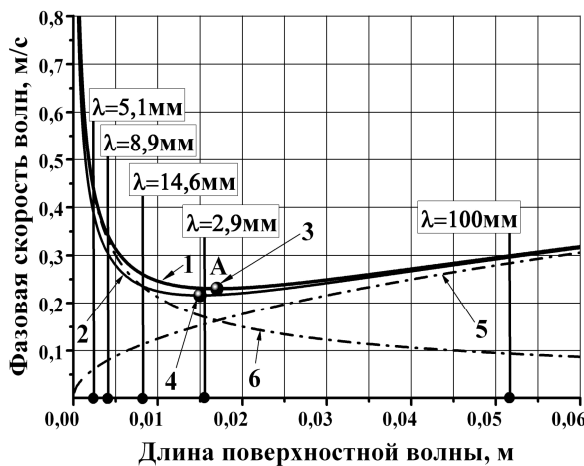


Рис. 2. Графики дисперсионного соотношения при  $\alpha = 0,072$  и  $0,056$  н/м

На рис.2 цифрами обозначены: 1, 2 – кривые зависимости (1) для чистой воды при  $\alpha = 0,072$  и воды с пленкой масла при  $\alpha = 0,056$  н/м; 3, 4 – точки минимума  $V_{\phi\min}$  при данных значениях  $\alpha$ ; 5, 6 – кривые, соответствующие слагаемым подкоренного выражения (1), представляющим собой гравитационную и капиллярную компоненты фазовой скорости. Вертикальными отрезками указаны длины по-

верхностных волн резонансных с выбранными длинами ЭМВ РЛК при  $\psi = 19^\circ$ .

Таким образом, рабочие длины волн охватывают наиболее интересный участок перегиба дисперсионного соотношения (1), включающий диапазоны гравитационно-капиллярного волнения (ГКВ), капиллярного волнения (КВ) и сами точки экстремумов в точках 3 и 4, характерные примерным равенством слагаемых под корнем в (1) и минимумом фазовой скорости волн:  $V_{\phi\min} = 0,23$  м/с – для чистой поверхности воды и  $0,216$  м/с – в присутствии пленки масла. Волна с длиной 29 мм, как видно на рис. 2, взаимодействует с волнением в окрестности точки А, где расположены эти экстремумы. На краях этого диапазона взаимное влияние капиллярных и гравитационных эффектов составляет: для гравитационного волнения ( $\lambda = 100$  мм) менее 9,5 % и для капиллярного ( $\lambda = 5,1$  мм) – менее 5,5 %.

## 1.2. Лабораторный эксперимент

Лабораторный стенд включал описанный выше РЛК и средства его калировки, волновой бассейн размерами  $1,07 \times 1,2$  м на поворотном столе, волногенераторы, приборы волнографического контроля волнения, калибруемые посредством прецизионного лазерного волнографа, компьютер для накопления и обработки сигналов. Глубина жидкости в бассейне составляла не более 30 мм, что исключило длиннопериодное волнение [10]. Угол скольжения был выбран  $\psi = 19^\circ$  для обеспечения преобладания резонансного механизма рассеяния радиоволн и исключения влияния области малых углов, характерных высокой крутизной зависимости ЭПР:

$$\sigma^\circ(\psi) \sim \psi^4$$

и, соответственно, высокой дисперсией отраженных сигналов [11].

Длина записей реализаций составляла  $\sim 110$  с. Записи были преобразованы посредством БПФ с усреднением и весовой обработкой в частотную область и аппроксимированы степенной зависимостью, что упростило получение и сопоставление оценок спектральных параметров в разных частотных каналах.

Возбуждение ряби осуществлялось воздушным потоком со скоростью (на срезе сопла) регулируемой от 0 до 22 м/с и механическим волнопродуктором.

Предварительно проведенный анализ влияния толщины пленки нефтепродукта на энергетику возбуждаемых поверхностных волн показал, что энергетические параметры волн в лотке с маслом могут быть экстраполированы на случай пленки ПАВ с толщиной более 132 мкм. Для чего была оценена зависимость от длин поверхностных волн дополни-

тельного (относительно чистой воды) затухания волн ряби  $\Delta A(\Lambda)$  при разных толщинах пленки  $L$ :

$$\Delta A(\Lambda) = [A_{\text{масло}}L(\Lambda) - A_{\text{вода}}(\Lambda)] \text{ [дБ]}.$$

Дополнительное затухание появляется на длинах волн ряби около 1,5 см и возрастает с увеличением частоты. Отмечено насыщение процесса роста  $\Delta A$  при толщине пленки свыше 132 мкм.

На рис. 3 показаны примеры спектров сигналов, рассеянных маслом при разных азимутах облучения на волнах 5,1 мм, 8,9 мм и 100 мм при скорости воздушного потока 21,3 м/с.

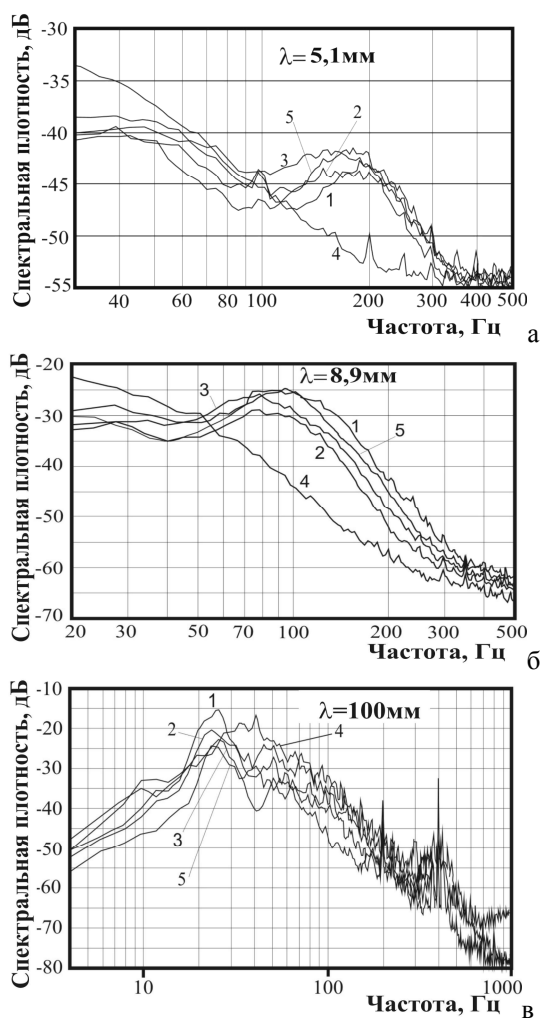


Рис. 3. Спектры сигналов, рассеянные поверхностью масла при разных азимутах:  
а –  $\lambda = 5,1 \text{ мм}$ , б –  $\lambda = 8,9 \text{ мм}$ , в –  $\lambda = 100 \text{ мм}$ ;  
(1 – 0°; 2 – 45°; 3 – 60°; 4 – 90°; 5 – 180°)

Видно, что для миллиметровых волн изменение азимутального угла облучения (относительно направления воздушного потока)  $\theta$  от 0° до 90° приводит к снижению доплеровского смещения рассеянного сигнала почти до нуля. Дальнейшее увеличение  $\theta$  до 180° приводит к возрастанию центрального

смещения примерно до тех же значений, что и при углах около 0°.

Наблюдаемое в эксперименте несовпадение величин относительных амплитуд спектральной плотности при облучении под углами  $\theta \pm 180^\circ$ , т.е. вдоль и против воздушного потока связано с асимметрией пространственного спектра наклонов возбуждаемой ряби [12].

На волне 100 мм изменение азимутального угла не приводит к монотонным изменениям в спектрах сигналов, рассеянных поверхностью масла и поверхностью чистой воды.

При анализе полученные спектры аппроксимированы степенной зависимостью вида:

$$S(F) = S_0 [1 + |2(F_0 - F)/\Delta F|^n]^{-1}, \quad (2)$$

где  $F_0(\theta)$  – центральная частота;

$\Delta F(\theta)$  – полуширина спектра;

$n(\theta)$  – скорость убывания спектра.

Зависимость (2) достаточно часто используется для аппроксимации спектров отражений от морской поверхности [13].

Анализ спектров в двойном логарифмическом масштабе показал, что в высокочастотной области зависимость спектральной плотности от частоты в динамическом диапазоне не менее 25 – 30 дБ можно аппроксимировать линейной зависимостью, т.е. в высокочастотной области спектр описывается зависимостью вида:

$$S \cong F^{-n}.$$

На рис. 4 приведены азимутальные зависимости центральных смещений частот  $F_{cp}(\theta)$ , усредненных по скорости ветра и нормированных на  $F_{cp}(0^\circ)$  для сигналов, рассеянных поверхностью масла.

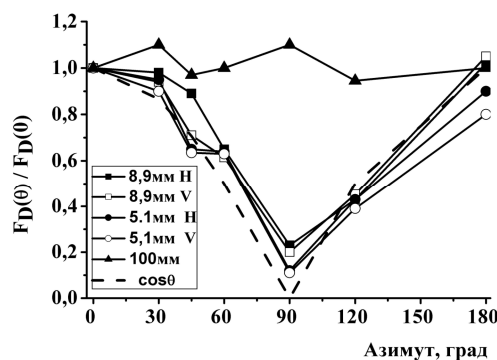


Рис. 4. Зависимость центральной частоты спектральной плотности от азимута

Пунктирной линией на рис. 4 показана зависимость  $|\cos \theta|$ . Изменения центральных доплеровских частот спектров миллиметрового диапазона неплохо согласуется с этой зависимостью. В то же время на

волне 100 мм значимых изменений доплеровского смещения не наблюдалось. Полуширина спектров уменьшается, примерно вдвое для миллиметровых сигналов, при этом, как для миллиметровых, так и для сантиметровых сигналов она слабо зависит от азимута. Усредненные оценки  $n$  – показателя степени в (2), характеризующего скорость убывания спектральной плотности, показали, что на волнах 100 мм и 8,9 мм он практически не зависит от азимута.

На волнах 100 мм и 8,9 мм показатель степени  $n$  имеет значение 3...4. и на волне 5,1 мм – 1,25 – 1,5.

При работе с растворимым ПАВ были использованы длины ЭМВ 5,1 мм, 8,9 мм и 29 мм. Широкополосное волнение возбуждалось слабо турбулизированным воздушным потоком вентилятора с диаметром потока 220 мм и скоростью 7,5 м/с. Для исключения помех от лопастей облучение осуществлялось в направлении воздушного потока.

Амплитуда ГКВ контролировалась оптическим сенсором [14], калиброванным по эталонному лазерному волнографу.

Синтетический детергент вносился в количествах 25, 50 и 75 г, при этом коэффициент поверхностного натяжения принимал значения:  $\alpha = 0,0617$ , 0,0526 и 0,408 н/м, соответственно, при  $t = 18,6^\circ \text{C}$ . Измерение  $\alpha$  осуществлялось капиллярным методом [15]. Поверхностное натяжение чистой воды составляло 0,073 н/м. При общей массе воды в бассейне 32,5 кг, вносимые добавки детергента составляли от 0,077 до 0,23%, что не могло оказать влияния на кинематическую вязкость жидкости.

На рис. 5 представлены графики зависимостей относительных амплитуд спектральных плотностей и центральной доплеровской частоты рассеянных взволнованной поверхностью воды от угла скольжения для минимальной концентрации ПАВ.

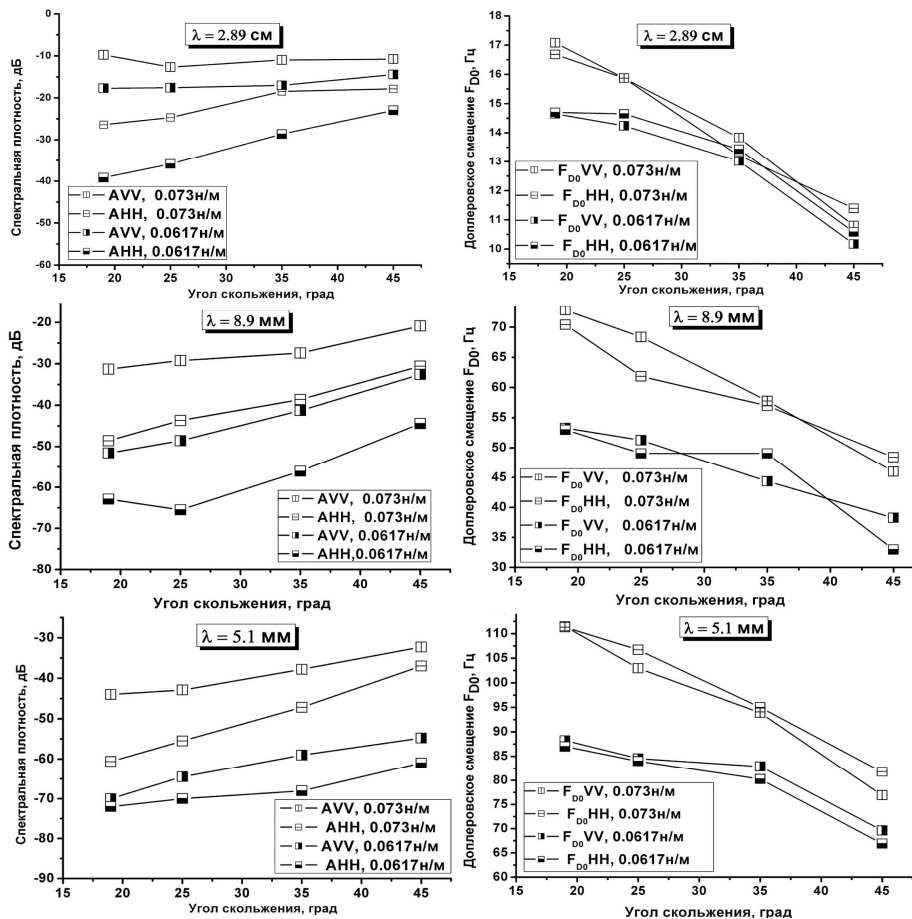


Рис. 5. Влияние растворимого ПАВ на параметры рассеянных сигналов  $\lambda = 29, 8,9$  и  $5,1$  мм

Зависимость убывания мощности рассеянного сигнала от угла скольжения (область плато) имеет практически линейный характер и скорость от 0,46 до 0,88 дБ/град, что совпадает с данными многолетних наблюдений удельной ЭПР морской поверхно-

сти и практически не зависит от поляризации и поверхностного натяжения для всех длин волн.

В присутствии ПАВ наблюдалось уменьшение спектральной плотности рассеянных сигналов на всех длинах волн (5,1 мм, 8,9 мм, 29 мм) от ~12 дБ

для  $\lambda = 29$  мм до максимального  $\sim 21$  дБ для  $\lambda = 5,1$  мм, уменьшение центральной частоты доплеровских спектров на 38, 35 и 15 %, для  $\lambda = 5,1$  мм, 8,9 мм и 29 мм соответственно, и ширины спектров в среднем в 1,5 – 2,1 раза. Уменьшение скорости спадания доплеровских спектров рассеянного сигнала имело место на всех длинах волн.

Отмечено, что процесс снижения амплитуды доплеровских спектров при увеличении концентрации ПАВ имеет область насыщения. В интервале  $\alpha$  от 0,073 до 0,0525 н/м наблюдалось существенное изменение  $A_{vv}$  и  $A_{hh}$ , тогда как в интервале от 0,0525 до 0,0408 н/м отмечены лишь незначительные изменения. Дальнейшее уменьшение  $\alpha$  не приводило к различимым изменениям амплитуд для данного детергента.

Таким образом, с уменьшением  $\alpha$  при равных прочих условиях процесс снижения амплитуд спектров асимптотически сходится к некоторой предельной минимальной величине. Этот эффект иллюстрирует рис. 6.

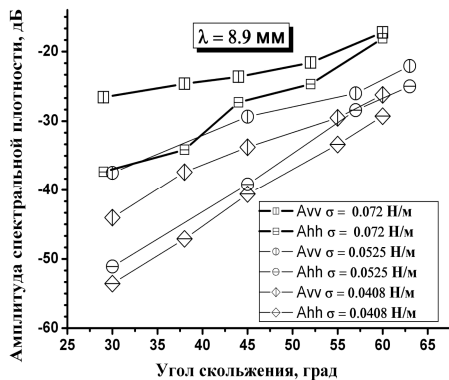


Рис. 6. Зависимость амплитуд спектров от угла скольжения при разных концентрациях ПАВ

Видно, что скорость схождения выше на горизонтальной поляризации. Подобные изменения имели место при  $\lambda = 5,1$  мм и, в меньшей степени,

при  $\lambda = 29$  мм. Это можно объяснить исходя из теории адсорбции на поверхности жидкости [15], откуда следует, что на поверхности раствора, имеющего коэффициент поверхностного натяжения ниже, чем у растворителя, образуется избыточная концентрация растворенного вещества. В результате, при увеличении общей концентрации ПАВ, прежде всего, она растет в поверхностном слое жидкости. В результате на поверхности растворителя формируется мономолекулярная пленка растворенного ПАВ, которая и определяет динамику волн капиллярного масштаба.

После того, как пленка становится насыщенной, дальнейший рост объемной концентрации не приводит к существенным изменениям свойств поверхности при данной скорости ветра.

Результаты цикла лабораторных исследований влияния растворимых ПАВ показали, что уровень контраста в этом случае, на 10 – 14 дБ ниже, чем в присутствии пленок нефтепродуктов, что объясняется большей активностью углеводородных пленок. Изменения в частотной области, вызванные растворимыми ПАВ, в основном соответствуют случаю загрязнений нефтепродуктами. Влияние концентрации ПАВ, по-видимому, имеет экспоненциальный характер.

### 1.3. Натурный эксперимент

Натурные эксперименты проводились в пресноводных водоемах, размеры зеркал которых превышали  $1 \times 1,5$  км. Измерительный комплекс располагался в воде на удалении 4 м от берега при очень пологом гладком дне и на искусственной дамбе, имеющей правильную береговую линию и также пологое дно (см. рис. 7). ДН антенн при малых элементах разрешения на поверхности воды обеспечили достаточную для эксперимента угловую чувствительность системы [16].

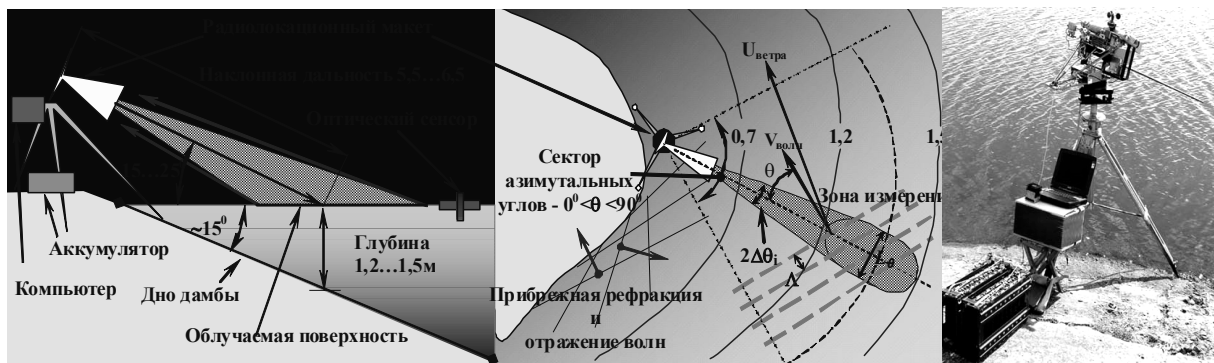


Рис. 7. Схема эксперимента в натуральных условиях и внешний вид радиолокационного макета

Вынесение РЛК в воду на 4 м от берега не обнаружало изменений в тонкой структуре спектров по сравнению со спектрами, наблюдаемыми при работе с берега, отсюда сделан вывод, что в данных метеоусловиях влиянием отраженной волны можно пренебречь.

Как известно, при ограниченном разгоне и времени действия ветра, спектр волнения для данной скорости ветра является развитым только в интервале частот  $\omega_1 < \omega < \infty$ , где  $\omega_1$  – наименьшая частота, называемая частотой пересечения, и равен нулю вне этого интервала. Частота пересечения является функцией величины разгона, скорости ветра и времени его действия. При разгоне ветра около 1 км и его скорости не более 6 м/с можно считать волнение развитым в интервале длин поверхностных волн  $0 < \Lambda$  [м]  $< 0,0551$  при действии ветра в течение не менее 20 минут [17]. Указанный интервал  $\Lambda$  при  $\psi = 19^\circ$  обеспечивал развитие волнения, рассеивающее самые длинноволновые сигналы радиолокационного комплекса. Облучаемый сектор поверхности в диапазоне азимутальных углов  $0 \dots 90^\circ$  был равноудален от береговой линии (см. рис. 7), при соблюдении условия «глубокой воды» для всех длин волн.

Скорость ветра контролировалась электронным анемометром, данные которого непрерывно записывались в ПК по отдельному каналу. Метеорологические условия эксперимента позволяли считать волнение в течение всего эксперимента однородным стационарным процессом.

Пленка ПАВ создавалась по принципу конвейера путем непрерывного впрыскивания дисперсной струи масла, содержащей фиксированное количество вещества, на расстоянии 4–5 м от зоны измерений. Полное растекание происходило в течение 5–6 секунд до толщины в несколько молекулярных слоев и после чего участок пленки под действием ветра попадал в зону измерения. Оценки значений коэффициента поверхностного натяжения проводились в зоне измерения методом капиллярного подъема жидкости [15]. Чистая вода имела  $\alpha_1 = 0,072 \pm 0,00135$  н/м, а после нанесения пленки  $\alpha_2 = 0,056 \pm 0,0019$  н/м. Время измерений заняло около 2,5 часов, в течение которых температура воздуха, воды, а соответственно и поверхностное натяжение, были постоянными.

## 2. Результаты измерений и обсуждение

Полученные в эксперименте временные записи сигналов были преобразованы посредством БПФ и аппроксимированы биэкспоненциальной зависимостью (2). Это облегчило оценку и сопоставление

результатов в разных частотных каналах. Как и ранее оценивались:  $A$ , [дБ] – относительная амплитуда спектральной плотности;  $F_0$ , [Гц] – центральная частота доплеровского смещения;  $\Delta F$ , [Гц] – ширина спектров на уровне -3 дБ;  $n$  – показателей степени в (2). Все параметры рассматривались в виде зависимостей от азимута  $\theta$ .

На рис. 8 приведены доплеровские спектры сигналов, рассеянных водной поверхностью при  $\alpha_1 = 0,072$  Н/м, угле скольжения  $\psi = 19^\circ$ , средней скорости ветра  $\bar{U} = 3,2$  м/с, для азимутальных углов  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ . Здесь прослеживается, помимо амплитудной азимутальной зависимости, частотная азимутальная зависимость, заключающаяся в смещении центральных частот спектров в сторону низких частот при увеличении угла между направлениями облучения и движения поверхностных волн. На длине волны 100 мм эти зависимости практически отсутствуют.

На рис. 9, а представлены зависимости центральных доплеровских частот для чистой и загрязненной маслом воды: теоретические –  $F_0(\theta)$  и экспериментальные –  $\bar{F}_{0\theta}$  усредненные по нескольким реализациям.

Теоретические значения смещения частоты рассчитаны в соответствии с выражением, используемым в [18, 19]:

$$F_0(\theta) = F_{0ф} + F_{0в} = \sqrt{\frac{g \cos \psi}{\pi \lambda} + \frac{16 \pi \alpha \cos^3 \psi}{\rho \lambda^3} + \frac{2 V_{вс}}{\lambda} \cos \theta}, \quad (3)$$

где  $F_{0ф}$  и  $F_{0в}$  – собственная фазовая скорость волн и ветровое приращение скорости, соответственно;

$\bar{U}$ ,  $V_{вс}$  – средняя скорость ветра и скорость ветрового сноса, соответственно;

$\theta$  – азимут облучения – угол между направлениями облучения и движения волн.

Скорости  $V_{вс}$  и  $\bar{U}$  связаны между собой известным в метеорологии соотношением  $V_{вс} = 0,02 \bar{U}$  [13]. Влияние орбитальных скоростей и Стоксова дрейфа в расчете не учитывались, поскольку в условиях данного эксперимента они составляли менее 1 % от  $F_0(\theta)$ . Расчеты были выполнены для двух значений коэффициента поверхностного натяжения 0,072 и 0,056 Н/м при средней по реализациям скорости ветра 3,2 м/с и углах азимута  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$ .

Также на рис. 9, а приведены смешанные расчетно-экспериментальные зависимости для  $\bar{F}_{0ф\theta}$  – смещения частоты, обусловленного собственной фазовой скоростью движения волн без влияния вет-

рового воздействия:

$$\bar{F}_{\text{офэ}} = \bar{F}_{\text{оэ}}(\theta) - \frac{2V_{\text{вс}}}{\lambda} \cos \theta \approx \bar{F}_{\text{оэ}}(\theta) - \frac{0,04\bar{U}}{\lambda} \cos \theta.$$

Из (3) следует, что  $F_{\text{оф}}$  не зависит от  $\theta$ , т.е. ее график должен быть параллелен оси абсцисс.

Можно предположить, что и  $\bar{F}_{\text{офэ}}$  может вести себя аналогично.

Однако, данное предположение выполняется в разной степени для разных длин волн, как видно на рис. 9, а.

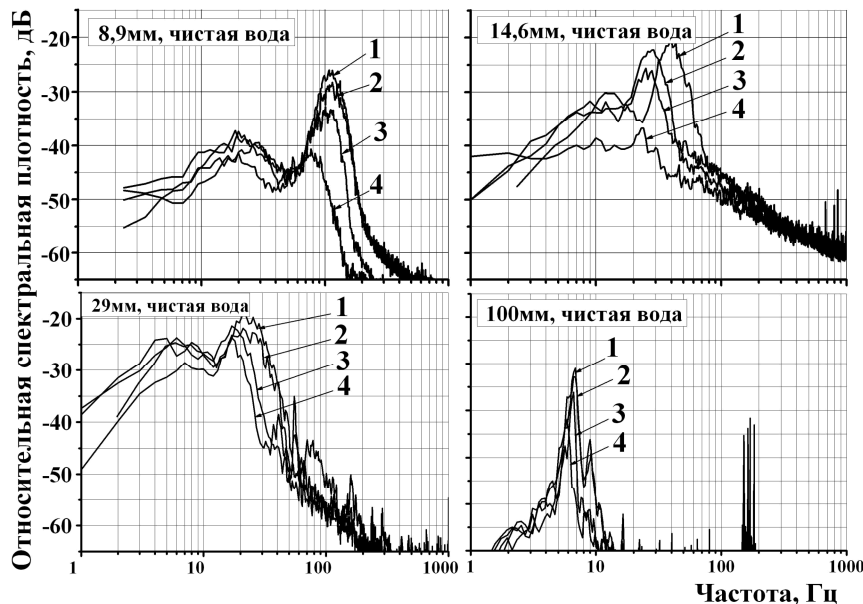


Рис. 8. Спектры сигналов от чистой поверхности воды для разных углов азимута: 1 – азимутальный угол 0°, 2 – 30°, 3 – 60°, 4 – 90°

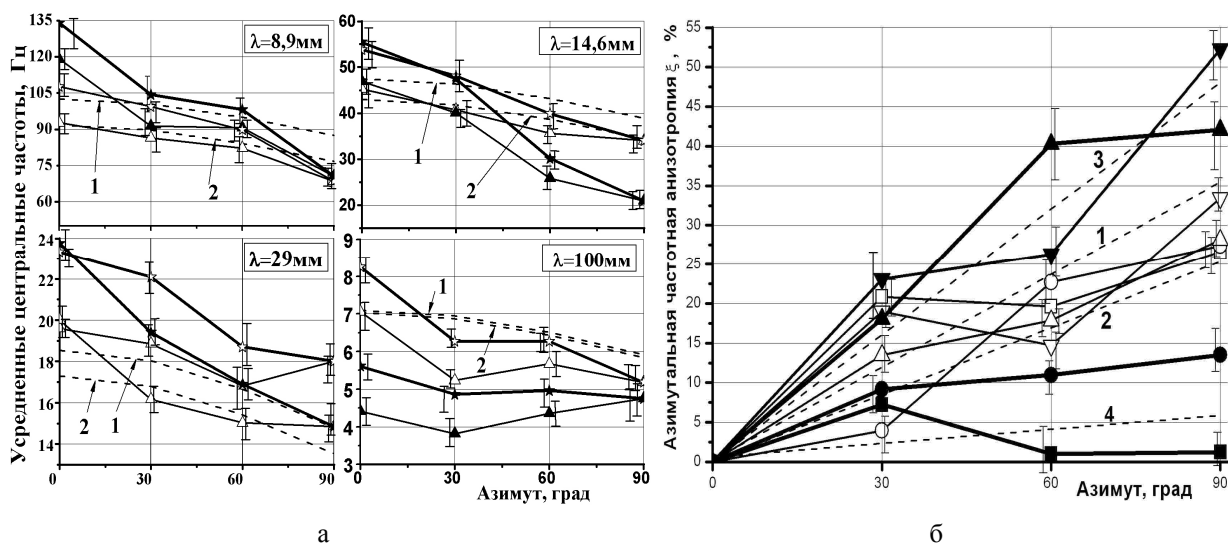


Рис. 9. Зависимости доплеровской частоты (а) и анизотропии (б) от азимута:

а –  $\bar{F}_{\text{оэ}}(\theta)$  – эксперимент ( $\star$  – вода;  $\star$  – пленка масла);  $F_o(\theta)$  – расчет (1 – вода; 2 – пленка масла)

и расчетно-экспериментальные зависимости  $\bar{F}_{\text{офэ}}$  ( $\Delta$  – вода;  $\blacktriangle$  – пленка масла);

б – анизотропия  $\xi(\theta)$  – вода ( $\nabla$  –  $\lambda = 8,9$  мм;  $\triangle$  – 14,6 мм;  $\circ$  – 29 мм;  $\square$  – 100 мм), пленка масла ( $\blacktriangledown$  –  $\lambda = 8,9$  мм;  $\blacktriangle$  – 14,6 мм;  $\bullet$  – 29 мм;  $\blacksquare$  – 100 мм);

1, 2, 3, 4 – прямые  $y = k \cdot x + b$  при  $k = 0,43, 0,57, 0,71, 0,25$

Наибольшее соответствие с  $F_{\text{оф}}$  наблюдается у сигналов с длиной волны  $\lambda = 100$  мм, в меньшей мере оно прослеживается у сигналов с  $\lambda = 29$  мм и практически не наблюдается у сигналами

волн  $\lambda = 14,6$  мм и  $\lambda = 8,9$  мм. Кроме того, на рис. 9, а, видно, что в присутствии пленки масла возрастает крутизна зависимостей  $\bar{F}_{\text{оэ}}(\theta)$  для коротковолновых сигналов. Крутизна зависимости



$\bar{F}_{03}(\theta)$  длинноволновых сигналов слабо чувствительна к присутствию масла.

Следует отметить, что при  $\lambda = 5,1, 8,9$  и  $14,6$  мм в присутствии пленки масла наблюдается хорошее совпадение экспериментальных зависимостей  $\bar{F}_{03}(\theta)$  с эмпирической зависимостью центральной доплеровской частоты, приведенной в [13]:

$$F_0(\theta) = F_{0\max} \cos^{2,5} \theta \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq 30^\circ. \quad (4)$$

Например, на  $\lambda = 8,9$  мм линейная регрессия  $\bar{F}_{03}(\theta)$  и  $F_0(\theta)$  из (4) дает значения близкие к  $-0,73$  и  $-0,697$ , соответственно.

Сравнительный анализ данных в разных частотных каналах был проведен с применением безразмерной величины, именуемой в [20] азимутальной частотной анизотропией:

$$\xi(\theta) = \left[ 1 - \bar{F}_{0фз}(\theta) / \bar{F}_{0фз}(0^\circ) \right] \times 100\%.$$

Зависимости  $\xi(\theta)$  для чистой поверхности воды и воды в присутствии пленки масла приведены на рис. 9, б.

Видно, что в условиях чистой воды зависимо-

сти  $\xi(\theta)$  во всех частотных каналах сосредоточены внутри сектора, ограниченного прямыми 1 и 2 при  $0,43 < k < 0,57$ . В присутствии масляной пленки зависимости  $\xi(\theta)$  на длинах  $14,6$  и  $8,9$  мм располагаются круче прямой 3 ( $k \geq 0,71$ ) и на длинах  $29$  и  $100$  мм становятся более пологими, чем прямая 4 ( $k \leq 0,25$ ). Абсолютные изменения частот при этом невелики – для  $9,3$  и  $35,2$  ГГц они составляют  $-15\%$  и  $+25\%$  соответственно, однако при сопоставлении каналов разность становится более весомой:

$$\Delta\xi = \xi(90^\circ, 8,9\text{мм}) - \xi(90^\circ, 29\text{мм}) \cong 40\%.$$

Анализ влияния ПАВ на азимутальные зависимости ширины спектров и  $\eta(\theta)$ , выявили возрастание скорости сужения полосы частот и скорости спада спектров во всех частотных каналах в присутствии ПАВ. Последнее, однако, справедливо для всех длин волн кроме  $100$  мм.

Сопоставление величин анизотропии, полученных в натуральных и лабораторных условиях, приведено в табл. 2, откуда следует, что величина анизотропии обратно пропорциональна длине ЭМВ и коэффициенту поверхностного натяжения.

Таблица 2

Величины азимутальной анизотропии в лабораторных и натуральных условиях

| Коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м | Усредненная азимутальная анизотропия, % |      |       |      |       |      |       |      |
|--|---|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|  | 10см                                    |      | 2,9см |      | 8,9мм |      | 5,1мм |      |
|  | A*                                      | B*   | A*    | B*   | A*    | B*   | A*    | B*   |
| 0,074  | 30                                      | 25,5 | 41    | 26,5 | 50,1  | 32,7 | 58    | 43,5 |
| 0,056  | 42,5                                    | 23,8 | 37,5  | 14,7 | 52    | 41   | 70,5  | 51   |
| 0,0426   | 29,3                                    | –    | 49,3  | 31,2 | 57,6  | 54,6 | 76    | 54   |
| 0,035  | 35                                      | –    | 71    | –    | 85,5  | –    | 89    | –    |

A\* – данные лабораторных измерений; B\* – данные натуральных измерений.

На рис. 3 и рис. 8 прослеживается бимодальная структура спектров рассеянных сигналов, кроме сигнала длиной  $100$  мм. По-видимому, это вызвано рассеиванием, имеющим нерезонансную природу и приводящим к низкочастотной амплитудной модуляции (АМ) отраженных сигналов и появлению дополнительного подъема в спектре.

Это предположение подтверждает лабораторный эксперимент по изучению рассеивания ЭМВ разных диапазонов на квазимонохроматических ГКВ. Волнение возбуждалось механическим волнопродуктором, питаемым от генератора НЧ (ГНЧ). При облучении возбуждаемой волновой системы наблюдался спектр отраженного сигнала в виде достаточно стабильной по амплитуде компоненты и ее высших гармоник, частоты которых полностью определялись частотой сигнала ГНЧ, что указывает на АМ происхождение спектра. Сигнал модулировался изменением ЭПР ближних к приемопередатчику гребней волн, появляющихся и исчезающих в ДН с

частотой генерации ГНЧ. При перестройке частоты ГНЧ при примерном выполнении условия:

$$\Lambda \approx \lambda / 2 \cos \psi$$

в промежутке между первой и второй гармониками возникала флуктуирующая спектральная компонента на частоте, совпадающей с  $F_{0ф}$  в (3). Зависимость величины частоты этой компоненты от  $\lambda$ , азимута облучения волновой системы и угла скольжения  $\psi$  указывали на то, что она представляла собой доплеровский спектр отраженного сигнала. Спектральная плотность данной компоненты на  $30 - 35$  дБ ниже АМ компоненты, что, обусловлено сравнительно малым количеством периодов волн ( $10 - 15$  периодов), попадающих в «освещенную» антенной область и участвующих в резонансном рассеивании сигнала. Соотношения между частотами стабильной АМ компоненты спектра и доплеровской компоненты примерно соответствовали соотношениям максимумов в спектрах на рис. 8 для соответствующих длин волн.

Из экспериментальных данных следует, что присутствие достаточно малых количеств нерастворимых ПАВ, создающих пленки толщиной в несколько молекулярных слоев, и растворимых, в концентрации не выше 0,3 %, вызывают устойчивые изменения в спектрах отраженных сигналов СВЧ и КВЧ диапазонов. Эти изменения заключаются: в уменьшении спектральных плотностей сигналов на 25-40 дБ, соответственно; уменьшении доплеровских частот на величину от 15 до 30 %; сужении доплеровских спектров, в 2 – 2,5 раза; росте крутизны спада спектральной плотности в высокочастотной области и росте частотной пространственной анизотропии сигналов. Величины данных изменений обратно пропорциональны длине волны облучающего поля. При этом пленка ПАВ оказывает слабое влияние на состояние ГКВ и, как следствие, на резонансно рассеиваемые ими ЭМВ.

Анализ источников не выявил бесспорных механизмов, объясняющих зависимость пространственных спектров сигналов миллиметрового диапазона от присутствия ПАВ в воде. Касаясь данного вопроса, Айткен указывал в свое время, что действие масла в основном сводится к упорядочению движения поверхностных слоев, вызванного ветром. Чистая поверхность, не имеющая поверхностной плёнки, движется под действием порывистого ветра в разных направлениях и с переменной скоростью, что создаёт беспорядочную, интерферирующую рябь [15]. Масляная плёнка выравнивает это движение на значительных площадях, затрудняя возбуждение ряби и приводя к появлению анизотропии пространственного спектра ряби.

С точки зрения энергетики волнового движения и его развития, перенос энергии происходит за счет межволнового взаимодействия в весьма узком интервале волновых чисел  $d\bar{\chi}$  и значительно медленнее поступления энергии от воздушного потока [12]. Происходит насыщение компонент волнения, приводящее не только к заострению и обрушиванию гребней, ни и пространственному «выдавливанию» и расширению углового спектра. Повышение вязкости поверхностного слоя повышает диссипацию избыточной энергии и, тем самым, сужает угловой спектр волн. Происходит то, что Айткен называет упорядочиванием движения ряби.

С возникновением двухмасштабного волнения, происходит пространственная модуляция свойств пленки, приводящая к специфическим изменениям рассеиваемых сигналов [21, 22]. Это может приводить к пространственным изменениям фазовой скорости резонансных рассеивателей и к росту частотной анизотропии в присутствии ПАВ.

Следует отметить, что при больших количествах разлитых ПАВ образуются пленки, которые

практически полностью гасят капиллярное волнение, что делает применение спектральных методов также проблематичным.

Метеорологические ограничения использования частотных признаков ПАВ связанные, прежде всего, с развивающимся крупномасштабным волнением оказывают маскирующее действие. Происходит расширение доплеровских и амплитудных спектральных компонент, приводящее к их полному слиянию под общей огибающей. Например, гладкие усредненные спектры сигналов СВЧ диапазона, рассеянных развитым морским волнением, представленные в [23], исходя из описанных там условий экспериментов, претерпели такое слияние. Кроме того, само существование сликов, как целостных образований, также имеет свой физический предел. При уровнях волнения свыше 2-3 баллов слики фрагментируются, теряют свою активность и разрушаются [24]. Это относится также и к естественным неоднородностям водной поверхности, которые при развитии волнения теряют контраст и исчезают.

## Заключение

Полученные в натуральных и лабораторных экспериментах результаты позволяют сделать непротиворечивые выводы о наличии устойчивых закономерностей в изменении основных частотных и пространственных параметров доплеровских спектров КВЧ и коротких СВЧ сигналов. Наиболее выпукло эти закономерности проявляются при сопоставлении миллиметровых волн и длинных сантиметровых волн, основными рассеивателями которых являются, соответственно, КВ и ГКВ.

Представленные результаты получены в условиях преобладания резонансного механизма рассеивания и могут быть использованы для формирования комплексных многочастотных признаков присутствия ПАВ на воде в подобных условиях. Таким образом, при уровнях волнения от 1 до 3 баллов, изменения спектральных параметров могут служить дополнительными информативными признаками присутствия антропогенных сликов. Это может найти самостоятельное применение, а также в комплексе с другими методами дистанционного зондирования или же точечного контактного контроля акваторий.

Эксперименты обнаружили высокую чувствительность частотных эффектов к пленкам толщиной в несколько молекулярных слоев, что может быть полезно при обнаружении малоконтрастных сликов, возникающих при разливах небольших объемов ПАВ.

## Литература

1. Коровин Л.К. Балтийская стратегия / Л.К. Коровин // МОРСКАЯ РОССИЯ. – 2000. – Т.6, № 5. – С. 43-44.
2. Hugh Rossi Coastal zone protection and planning. Report and Minutes of Proceedings House of Commons Environment Committee (Second Report) [Электронный ресурс] / Hugh Rossi, Robert B. Jones. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.jstor.org/stable/40113604>.
3. Иванов А. Применение средств космической радиолокации для мониторинга морской добычи и транспортировки нефти / А. Иванов, А. Островский // Технологии ТЭК. – 2003. – №6. – С. 58-64.
4. Hamilton L.J. Bibliography of Wind-Wave Data and Publication for the Coastal Regions of Australia [Электронный ресурс] / L.J. Hamilton. – Режим доступа к ресурсу: [www.dsto.defence.gov.au/publications/1885/DSTO-GD-0116.pdf](http://www.dsto.defence.gov.au/publications/1885/DSTO-GD-0116.pdf).
5. Караев В.Ю. Исследование проявления сликов на морской поверхности в доплеровском спектре отраженного радиолокационного СВЧ-сигнала / В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Е.М. Мешков // Препринт ИПФ РАН. – №741. – Нижний Новгород, 2007. – С. 20.
6. Боев А.Г. К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества / А.Г. Боев, Г.Э. Карвицкий // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т.2, №3. – С. 281-287.
7. Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования / А.Г. Боев, Г.Э. Карвицкий, А.Я. Матвеев, В.Н. Цымбал // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – Т.3, № 1. – С. 43-48.
8. Узленков А.В. Влияние поверхностно-активного вещества на угловые свойства спектров сигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов, рассеянных водной поверхностью / А.В. Узленков, В.И. Луценко, В.Ф. Павленко // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. Ин-та радиофизики и электрон. НАН Украины. – Т.10, №3. – Х., 2005. – С. 413-421.
9. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.
10. Лайтхилл Дж. Волны в жидкости: пер с англ. / Дж. Лайтхилл. – М.: Мир, 1981. – 598 с.
11. Обратное рассеяние сантиметровых радиоволн взволнованной поверхностью моря при малых углах скольжения / А.И. Калмыков, И.Е. Островский, А.Д. Розенберг, И.М. Фукс // Изв. вузов. Радиофизика. – 1966. – Т.9, №6. – С. 1095-1099.
12. Филипс О.М. Динамика верхнего слоя океана: пер с англ. / О.М. Филипс. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 319 с.
13. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К.: Наук. думка, 1987. – 285 с.
14. Узленков А.В. Использование широкоугольной оптической системы для анализа капиллярного волнения в жидкости / А.В. Узленков // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. Ин-та радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – Т.11, №3. – С. 456-466.
15. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей / Н.К. Адам. – М.: ОГИЗ, 1947. – 552 с.
16. Басс Ф.Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
17. Ветровые волны / Под ред. Ю.М. Крылова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 441 с.
18. Розенберг А.И. Сдвиг частоты при рассеянии радиоизлучения взволнованной поверхностью моря / А.И. Розенберг, И.Е. Островский, А.И. Калмыков // Изв. вузов. Радиофизика. – 1966. – Т.9, №2. – С. 234-240.
19. Кулемин Г.П. Модель помехи, создаваемой обратным рассеянием от моря в диапазоне частот 1-100ГГц / Г.П. Кулемин, Е.А. Горошко // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. Ин-та радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2001. – Т.6, №2. – С. 226-234.
20. Lutsenko V.I. Experimental research of the spectral, polarizing and azimuthal features of S-, Ka- and V-band backscattering by the water and petroleum surfaces / V.I. Lutsenko, A.V. Uzlenkov // MSMW'2001: International Symposium Proceedings. – Kharkov, 2001. – Vol. 2. – P. 408-410.
21. Ермаков С.А. Лабораторное исследование сильной модуляции радиолокационных сигналов при наличии длинных волн на воде с поверхностно-активной пленкой / С.А. Ермаков, И.А. Сергиевская, Ю.Б. Щегольков // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2002. – Т.XLV, № 12. – С. 1025-1042.
22. Ермаков С.А. Динамика гравитационно-капиллярных волн в присутствии пленок поверхностно-активных веществ: автореф. дис. ... док. физ.-мат. наук: 25.00.29 / Ермаков Станислав Александрович; Н.-Новгород. ИПФ РАН. – СПб., 2008. – 39 с.
23. Экспериментальные исследования радиолокационных сигналов, рассеянных морской поверхностью в диапазоне СВЧ / И.Д. Гонтарь, Ф.В. Кивва, В.Ю. Рязанцев и др. // Радиофизические исследования Мирового океана: сб. научн. тр. Ин-та радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 1992. – С. 51-79.
24. Радиолокационные исследования неоднородностей поверхности океана / А.М. Волков, В.Б. Ефимов, А.С. Курекин, А.П. Пичугин, А.А. Прозоровский // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – №10. – С. 41-53.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов» В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

### **ВПЛИВИ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА СПЕКТРИ НВЧ І КВЧ СИГНАЛІВ ПРИ ЗОНДУВАННІ СХВИЛЬОВАНОЇ ПОВЕРХНІ ВОДИ**

*О.В. Узленков*

Представлені результати лабораторних і натурних експериментів, присвячених вивченню зондування радіолокації схвильованої водної поверхні в сантиметровому і міліметровому діапазонах довжин хвиль. Розглянутий вплив плівок поверхнево-активних речовин на частотні і просторові властивості розсіяних водою сигналів в умовах переважання резонансного механізму розсіювання електромагнітного поля. Обговорюється можливість використання цих ефектів для підвищення контрасту антропогенних забруднень.

**Ключові слова:** дистанційне зондування, морське хвилювання, капілярні хвилі, гравітаційні хвилі, радіолокація, доплерівські спектри, поверхнево-активні речовини, забруднення, сліки.

### **INFLUENCE OF SUPERFICIALLY-ACTIVE SUBSTANCES ON SPECTRA OF SIGNALS BACK SCATTERED BY THE DISTURBED SURFACE OF WATER**

*A.V. Uzlenkov*

The results of laboratory and models experiments of the study of the remote sensing of the disturbed water surface in SHF and EHF ranges of signals are represented. Influence of superficially-active matters slicks on frequency and spatial areas of the signals in the conditions of predominance of resonance mechanism of back scattering is considered. Possibility of use of these effects for the increase of the slick's contrast and its detection is discussed.

**Key words:** remote sensing, marine disturbance, capillary waves, gravity waves, radio location, Doppler spectra, superficially-active matters, contaminations, slick.

**Узленков Александр Валентинович** – ведущий инженер отдела №31 «Физические основы радиолокации» Института радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина, e-mail: uzlenkov31@ire.kharkov.ua.