# Развитие радиационной модели взволнованной морской поверхности на основе данных эксперимента по измерению рассеянного СВЧ радиоизлучения Солнца

#### М.В. Данилычев, Б.Г. Кутуза, А.Г. Николаев

Институт радиотехники и электроники РАН, 101000 Москва, ул. Моховая, 8/12 E-mail: <u>dan@mail.cplire.ru, kutuza@mail.cplire.ru</u>

В статье рассматривается вопрос расчета радиационных характеристик системы "океан-атмосфера" по методу Кирхгофа. В качестве важного примера исследуется влияние "подсвета" солнечного радиоизлучения на характеристики восходящего микроволнового излучения системы "океан-атмосфера". Обсуждаются различные аспекты этой проблемы. Описываются результаты комплексных натурных экспериментов по исследованию характеристик СВЧ- излучения Солнца, рассеянного на шероховатостях взволнованной поверхности моря (сила ветра от практически 0 до 15 м/с). На основании полученных результатов предлагается уточненная методика использования статистики ветровых зависимостей уклонов крупных волн при расчетах рассеяния (излучения) взволнованной морской поверхностью радиоволн СВЧ- диапазона (частоты от 3 до 50 ГГц).

#### Введение

При традиционном подходе к дистанционному зондированию системы "океан-атмосфера" (САО) практически не учитывается возможность вероятного "искажения" исследуемого потока восходящего микроволнового излучения САО за счет появления "подсвета" от внеземных источников радиоизлучения [1, 2]. Этот "подсвет" образуется за счет рассеяния падающего стороннего потока на шероховатостях взволнованной поверхности моря. Нисходящее СВЧ- излучение космического происхождения в этом случае сначала проходит сквозь атмосферу вниз, потом рассеивается на шероховатостях взволнованной поверхности моря и, наконец, после вторичного прохождения толщи атмосферы, попадает в главный лепесток ДНА бортового СВЧ- радиометра. Таким образом, на входе приемных каналов радиометрического комплекса происходит увеличение интенсивности принимаемого потока и, соответственно, измеряемой антенной температуры. В результате искажаются абсолютные и относительные значения всех восстанавливаемых при зондировании параметров САО. Наиболее мощным потоком СВЧ космического излучения, достигающим Земли, является поток радиоволн солнечного происхождения [3]. Однако даже таким существенным фактором на ранних стадиях развития методов ДЗ САО часто просто пренебрегали [1, 2]. В настоящее время это является недопустимым. Для этого есть, по крайней мере, три причины: 1) во-первых, нынешняя технология ДЗ САО сталкивается с постоянно возрастающими требованиями к точности восстановления интегральных и локальных параметров САО вообще; 2) во-вторых, новым предметом исследований часто являются явления и процессы в системе "океан-атмосфера" для которых характерна достаточно малая изменчивость уровня радиояркостной температуры и ее поляризационных характеристик; 3) в-третьих, наконец, область солнечного блика при определенных углах Солнца и приемной антенны может занимать значительные районы Мирового океана при съемке на дневной стороне планеты [4-7].

Итак, необходимо оценить и, по возможности, создать достаточно корректную модель учета фактора солнечного радиоизлучения, попадающего в главный лепесток ДНА радиометрического комплекса после прохождения его по трассе "нисходящее прохождение в атмосфере - рассеяние на поверхности моря – восходящее прохождение в атмосфере". Для этого, представляется разумным сначала рассмотреть основные моменты существующих методик расчета.

В настоящее время существуют разного рода методики для расчета коэффициентов поглощения, излучения и рассеяния СВЧ - электромагнитной энергии при взаимодействии с взволнованной поверхностью моря. В первую очередь эти методики отличаются друг от друга тем, каким образом и

насколько подробно в них учитываются особенности строения поверхностного слоя океана, в том числе поле поверхностного волнения, и структуры приводного слоя атмосферы [1, 2]. Разработка достаточно простой и вместе с тем вполне адекватной процедуры использования в расчетах взаимодействия CBЧизлучения с взволнованной поверхностью моря информации о распределении параметров поля поверхностного волнения представляется чрезвычайно важной. Существуют определенные различия в подходе к такому моделированию между методиками бистатической и моностатической активной локации. В рамках одного метода микроволнового зондирования, например при активной моностатической локации, необходимо по-разному учитывать характеристики поверхностного волнения при наблюдении в надир или при работе под существенно наклонными углами. Вполне естественными представляются существующие различия в методиках расчета для случая активной локации взволнованной поверхности моря и его пассивного аналога, т.е. микроволновой радиометрии.

В наиболее проработанных современных радиометрических моделях использование такого рода информации о состоянии поверхности океана основывается, как правило, на следующих допущениях:

- 1. предполагается, что волнение на поверхности моря состоит главным образом из полностью развитых ветровых волн;
- зависимость дисперсии распределения уклонов крупных морских волн при таком волнении от величины разгонного ветра на стандартной высоте находится в согласии с результатами Кокса-Манка [8, 9];
- переход от спектральной фракции ветровых волн "крупных по Коксу-Манку" к фракции поверхностных волн "достаточно крупных по отношению к используемой в зондировании радиоволне с длиной λ (радиочастоте f)" выполняется по методике, предложенной Холлингером и Вилхайтом [10, 11];
- результатом действия разгонного ветра является также появление пены на поверхности океана. Влияние пенного покрова учитывается на практике за счет использования данных лабораторного моделирования и совокупных статистических данных по данному району Мирового Океана [1, 2, 11-13].

Эти моменты являются принципиальными в нынешнем понимании метода Кирхгофа при его практическом использовании в расчетах взаимодействия микроволнового излучения и взволнованной поверхности моря. Однако, при использовании такого рода подхода, представляется необходимым получить четкие ответы на следующие вопросы:

- Какова же в действительности вероятность реализации на практике той самой ситуации "полностью развитого волнения", которая признается отвечающей требованиям некоторого выбранного критерия?
- 2. В какой мере реальные зависимости уклонов крупных волн при "полностью развитом волнении" совпадают с классическими результатами Кокса-Манка?
- 3. Насколько корректным, для использования в радиодиапазоне, является переход по методике, предложенной Холлингером и Вилхайтом?
- 4. Наконец, существуют ли какие-то географические, сезонные или иного рода зависимости для статистики морского волнения и пенного покрова в целом?

Для того чтобы попытаться ответить на некоторые из этих вопросов в применении к радиометрии морской поверхности (в диапазоне от 3 до 50 ГГц) давайте обратимся в этой статье к некоторым результатам, полученным авторами и другими исследователями ранее.

## Анализ имеющихся данных

Поле уклонов волновых площадок морской поверхности формируется за счет ветрового волнения, остаточной и приходящей зыби, течений и ряда других, иногда весьма существенных факторов. При этом параметры ветрового волнения принципиально зависят от длины разгона и времени действия разгонного

ветра, а также, весьма вероятно, от режима ветроволнового взаимодействия в целом [14-18]. Статистика уклонов крупных волн в модельных расчетах часто принимается гауссовой или квазигауссовой, что позволяет учитывать в той или иной степени поверхностную анизотропию. Это достаточно хорошо согласуется с экспериментом в случае т.н. "развитого волнения ", когда между полем ветрового волнения и полем разгонного ветра практически достигается взаимно однозначное соответствие. Собственно, при решении обратной задачи, т.е. восстановлении различных параметров поверхности моря по данным анализа принимаемого СВЧ- излучения, используются именно эмпирические зависимости, характерные для случая развитого ветрового волнения и полученные различными исследователями в различных условиях и районах Мирового океана. Эти зависимости получаются путем статистической обработки случаев измерения развитого волнения в определенном диапазоне спектра поверхностных волн и существенно зависят от условий съемки и параметров используемой аппаратуры [2, 8-20]. Разброс имеющихся данных при этом достаточно велик. В качестве примера в Таблице 1 приведены три результата линейной аппроксимации экспериментальных данных по зависимости дисперсии уклонов крупных волн вдоль и поперек направления действия разгонного ветра в случае развитого волнения. Эти результаты основаны на обработке данных, которые были получены тремя различными группами исследователей при измерениях в трех существенно различающихся районах Мирового океана (открытое море в центральной части Тихого океана, прибрежные воды вблизи Черноморского побережья и район Каспийского моря с удалением 20 км от береговой черты). Различие полученных результатов кажется, на первый взгляд, легко объяснимым. Возможные причины расхождения результатов должны лежать, в первую очередь, в особенностях аэрологии и гидрологии данных акваторий. Однако существенные расхождения между результатами различных исследователей остаются даже в том случае, когда рассматриваются и сравниваются данные по поверхностному волнению, полученные в пределах одного и того же района Мирового океана. Конечно, помимо линейных функций, для аппроксимации такого рода зависимостей часто используются и логарифмические функции, чей вид более предпочтителен с точки зрения теории и физических соображений [2, 14-16]. К числу часто упоминаемых в литературе зависимостей [4, 17-18], помимо вышеприведенных, следует также отнести результаты Пирсона-Стейси (1973), Бъёркааса-Риделя (1979) и Филлипса (1985).



Рис. 1. Вид на исследовательскую платформу с восточной стороны

Таблица 1. Эмпирические зависимости между дисперсией уклонов морского волнения и скоростью приводного ветра для случаев развитого волнения

Исследовате ли - район Мирового океана	Метод измерения	Время года, время суток, сила ветра	Дисперсия уклонов крупных волн вдоль (σ² <sub>x</sub> ) и поперёк (σ² <sub>y</sub> )направления ветра
Кокс - Манк (1951-55), Тихий океан в районе Гавайских островов	Анализ статистики "солнечных бликов" на поверхности (оптика)	Лето, около полудня, сила ветра от 0.7 до 13.8 м/с.	$\sigma_{x}^{2}(\mathbf{V}) = 0.00316 \cdot \mathbf{V} \pm 0.004$ $\sigma_{y}^{2}(\mathbf{V}) = 0.003 + 0.00192 \cdot \mathbf{V} \pm 0.002$ $\sigma_{x}^{2}(\mathbf{V}) + \sigma_{y}^{2}(\mathbf{V}) = 0.003 + 0.00512 \cdot \mathbf{V} \pm 0.004$ V – сила ветра на высоте h = 13 м. Для высоты h = 19.5 м. $\sigma_{x}^{2}(\mathbf{V}) + \sigma_{y}^{2}(\mathbf{V}) = 0.003 + 0.0048 \cdot \mathbf{V} \pm 0.004$
Бурцев - Пелевин (1975), прибрежный р-н Черного моря	Анализ статистики "солнечных бликов" на поверхности при равномерном искусственном освещении (оптика)	Лето, ночное время, сила ветра от 2 до 7 м/с.	$\sigma_x^2(\mathbf{V}) = (1.74 + 1.57 \cdot \mathbf{V}) \cdot 10^{-3}$ $\sigma_y^2(\mathbf{V}) = (1.34 + 1.20 \cdot \mathbf{V}) \cdot 10^{-3}$ $\sigma_x^2(\mathbf{V}) + \sigma_y^2(\mathbf{V}) = 0.0031 + 0.0028 \cdot \mathbf{V}$ V – сила ветра на высоте h = 19.5 м.
Калинин - Лейкин (1974), Каспийское море	Контактные измерения струнным волнографом с базой от 20 до 40 см	Осень, сила ветра от 6.6 до 14 м/с.	$\sigma_x^2(\mathbf{V}) + \sigma_y^2(\mathbf{V}) = 0.0021 \cdot \mathbf{V}$ $\langle \sigma_y^2(\mathbf{V}) / \sigma_x^2(\mathbf{V}) \rangle = 0.44$ $\mathbf{V}$ – сила ветра на высоте h = 10 м.

Итак, приходится констатировать, что имеющееся расхождение между данными различных исследователей может быть чрезмерно большим даже при очень близких методах измерений. Причем это расхождение не может быть легко объяснено путем пересчета к одинаковой высоте измерения ветра, или, скажем, расчета дополнительного вклада какой-то неучтенной (в одном из сравниваемых методов) части спектра. По-видимому, необходим тщательный анализ использовавшихся методик, свойств аппаратуры и детальный обзор гидрометеорологической обстановки в целом. По понятным причинам осуществить это на данном этапе уже достаточно трудно. Следует также согласиться со словами Китайгородского [16] о том, что немаловажной причиной такого рода серьезных расхождений у разных исследователей на практике, может быть и использование различных количественных и статистических критериев при принятии решения о степени "развитости". В большинстве случаев в публикациях вообще не упоминаются конкретные критерии "развитости", использовавшиеся в данных работах.

Наиболее известными и до сих пор широко используемыми в дистанционном зондировании и смежных областях являются зависимости Кокса-Манка [8, 9]. Эти зависимости были получены при анализе аэрофотоснимков с рассеянным на поверхности океана (район Гавайских островов) видимым излучением Солнца. Следует заметить, что до сих пор не существует единого мнения, о том каково же при этой методике значение волнового числа  $K^{up} = 2\pi / \Lambda_{min}$ , которое должно ограничивать сверху длинноволновую часть спектра уклонов. Известно также, что данные зависимости не следует использовать при достаточно больших значениях силы ветра (скажем, более 15 м/с). Вплоть до настоящего времени, зависимости полученные Коксом и Манком с помощью конкретного оптического оборудования и методов обработки с определенным разрешением использовались в радиодиапазоне в канонически неизменном виде [8, 9]. Однако по мере развития методов дистанционного зондирования было замечено, что прямое использование зависимости СВЧ- радиометрии морской поверхности,

приводит все-таки к заметному отличию от данных эксперимента. Этому можно было предложить, по крайней мере, два логичных объяснения. Во-первых, в действительности очень часто присутствуют эффекты неразвитости и посторонних, не связанных с локальным ветром, возмущений, особенно приходящая зыбь [15-20]. Во- вторых, и это, по- видимому, очень весомая причина – эти зависимости были получены в конкретных условиях аэросъемки для случая вполне конкретной оптической аппаратуры и принципиально не могут учитывать зависимость размера "используемых элементарных площадок" от длины радиоволны λ. В дальнейшем попытки оценить и, по возможности, корректно учесть влияние длины зондирующей радиоволны были предприняты Дж. Холлингером [10]. Целью его работ на борту океанографической платформы было нахождение корреляции между показаниями бортовых СВЧрадиометров с величиной приводного ветра на стандартной высоте. Им было показано, что для удовлетворительного совпадения теоретических расчетов и данных СВЧ радиометрических измерений необходимо брать для использования в расчетах приблизительно 1/3, 1/2 и 2/3 доли от дисперсии уклонов по Коксу-Манку для 1.41, 8.36, и 19.34 ГГц диапазонов, соответственно. Затем, Т.Вилхайт применил идею Холлингера для целей сравнения полученных в реперных областях океана спутниковых радиометрических данных и данных одновременного измерения поля приводного встра при помощи ссти океанографических буев [11]. Эта работа проводилась в рамках подспутниковых экспериментов в полетах спутников Nimbus-6 и Seasat [11] (диапазоны 6.6, 10.7, 18, 21, и 37 ГГц). Предложенный Вилхайтом метод использования зависимостей Кокса- Манка [8, 9] сводится к обобщению идеи Холлингера - введению полуэмпирических поправок, которые позволяют использовать зависимости Кокса-Манка с учетом частотной зависимости [10, 11]:

$$\sigma_r^2(f,V) = (0.3 + 0.2f)\sigma_{cm}^2(V), \text{ for } f \le 35 \text{ GHz}$$
  

$$\sigma_r^2(f,V) = \sigma_{cm}^2(V), \text{ for } f \ge 35 \text{ GHz}$$
(1)

где f - частота зондирующей радиоволны в ГГц,  $\sigma_{cm}^2(V)$  - дисперсия уклонов крупных волн в модели развитого волнения при расчете по зависимостям Кокса- Манка (см. Таб.1),  $\sigma_r^2(f,V)$  - дисперсия уклонов (в той же модели волнения) морских волн, которые являются "достаточно крупными для зондирующей радиоволны с частотой излучения f" [11]. Полученная таким образом дисперсия уклонов волновых площадок далее прямо подставляется в функцию плотности вероятности для последующего интегрирования. Как известно, в своей работе [11] Т.Вилхайт использовал зависимости Кокса- Манка в виде, приведенном к высоте измеряемого ветра 19.5 м над уровнем моря ( $\sigma^2(V) = \sigma_x^2(V) + \sigma_y^2(V) = 0.003 + 0.0048 \cdot V \pm 0.004$ ) и аппроксимацию фактора влияния пены в следующем виде [11]:

$$F = a_0 (1 - \exp(-f_0 / f)) \cdot (V - 7), \qquad V \ge 7m/s$$
  

$$F = 0, \qquad \qquad V < 7m/s$$
(2)

где f - частота (в ГГц),  $f_0 = 7.5$  ГГц, и  $a_0 = 0.006 c / M$ .

Использование вышеописанного способа перехода от фракции волн "крупных по Коксу-Манку" к фракции волн "крупных по отношению к длине зондирующей радиоволны  $\lambda$ " позволило существенно уменьшить разницу между результатами модельных расчетов и данными экспериментов по СВЧ – зондированию поверхности океана. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют считать, что описанная методика удовлетворительно работает в диапазоне частот от приблизительно 3 до 10÷12 ГГц (длины радиоволн от 3 до 10 см). В области более длинных волн данных такого рода практически не имеется, а на частотах более 12÷15 ГГц определенные расхождения все-таки остаются. При этом, содержащееся в (1) предложение считать "практически оптическим случаем" использование частот более 30÷35 ГГц (длины волн около 1см и короче) выглядит, конечно, не вполне корректным. Причины такого рода расхождений между теорией и практикой, возможно, связаны с тем, что исследуемые радиояркостные контрасты достаточно малы по величине. Однако, более принципиальным, по-нашему мнению, является тот факт, что при проведении этих экспериментов, к сожалению, не использовалось никоим образом прямое описание фактического состояния статистического поля шероховатостей морской поверхности. Этого можно было бы достичь за счет сопутствующего применения, уже апробированных в океанологии контактных или неконтактных способов измерений спектров уклонов и возвышений. Напротив, поле поверхностного волнения в этих экспериментах, во всем его многообразии и зависимости от множества существенных факторов, предполагалось однозначно связанным со значением величины приводного ветра на стандартной высоте в момент измерения. Причем заведомо считалось, что распределение уклонов отвечает модели развитого ветрового волнения и описывается зависимостями Кокса-Манка [8, 9]. Тщательный анализ методики вышеописанных экспериментов и имеющийся опыт позволили нам сделать вывод о необходимости использования для совершенствования расчетной модели более достоверных данных по взаимодействию СВЧ- излучения с взволнованной поверхностью моря. Для этой цели могли бы подойти результаты каких-то совместных радиофизических (радиометрических) и гидродинамических (волнографических) исследований.

### Эксперименты на морской платформе. Оборудование и методики

В 1989-90 гг. авторами была выполнена серия экспериментов по исследованию отраженного от поверхности моря радиоизлучения Солнца в СВЧ- диапазоне от 3 до 50 ГГц. Эксперименты проводились в Черного на борту морской исследовательской платформы, акватории моря принадлежащей Экспериментальному Отделению Морского Гидрофизического Института (пос. Кацивели, Крым) в весенний и осенний сезоны 1989г и летний сезон 1990г. В ходе работ, помимо непосредственного измерения параметров рассеянного потока микроволнового солнечного излучения, попутно осуществлялись: 1) контроль спектральных уровней нисходящего потока солнечного излучения в диапазонах измерения, 2) контроль состояния нижнего слоя атмосферы и поверхностного слоя воды, 3) непосредственные контактные измерения поля поверхностных шероховатостей. Некоторые из полученных в тот период результатов уже докладывались на сессиях IGARSS/URSI и были опубликованы в различных изданиях [21-24].

Изначально в экспериментах использовалось различное радиометрическое и волнографическое оборудование, в том числе СВЧ – радиометры обеих поляризаций в диапазонах 5, 13.3, 22.22, 37.5 и 100 ГГц. Затем, по результатам работ 1989 года, было принято решение о разработке специального экспериментального комплекса с конкретным набором аппаратуры и соответствующей методикой Разработанный экспериментальный комплекс состоял из трех измерений. основных частей: радиометрического блока, блока регистрации и первичной обработки поступающей информации и блока контактных измерений. В радиометрический блок входили 3 двухполяризационных микроволновых радиометра прямого усиления на длинах волн 0.8, 2.25 и 6 см (рабочие частоты 37.5, 13.3 и 5.0 ГГц). Антенно-фидерные устройства и высокочастотные части радиометров были размещены на специальном прецизионном поворотном столе (см. рис.2). Этот поворотный стол был установлен на высоте 17.5 м в юговосточном углу исследовательской платформы, что было наиболее выгодно с точки зрения наблюдения рассеяния на поверхности излучения Солнца, которое вставало в довольно узком угловом секторе со стороны открытого моря. Ширина диаграммы направленности каждого радиометра составляла около 10°х10° по уровню половинной мощности. При этом с помощью специальной методики была достигнута соосность главных лепестков диаграмм направленности в пределах 1 углового градуса. Конструкция поворотного стола позволяла осуществлять сканирование области рассеяния на морской поверхности, как по азимутальному, так и по зенитному углам.

Блок регистрации и первичной обработки включал в себя 2 IBM-PC и цифровой магнитофон, с соответствующей программной поддержкой. Блок контактных измерений состоял из набора метеодатчиков для измерения параметров приводного слоя атмосферы и верхнего слоя воды, а также 4-струнного

волнографа с пространственной матрицей 30 или 42 см, предназначенного для измерения дисперсии уклонов крупных морских волн. Выбор такой базы волнографа был обусловлен, в первую очередь, целью последующего максимально удобного сравнения с имеющимся массивом наиболее интересных данных других исследователей, которые использовали как контактные, так и оптические методы [8-20]. Длительность реализаций составляла 10 мин при частоте опроса 5 ÷ 20 Гц, интервал между реализациями - около 20-30 мин.



Рис. 2. Вид сверху на антенно-фидерные устройства и СВЧ блоки радиометров, размещенные на поворотном столе



Рис. 3. Вид с нижней палубы на верхнюю поворотную матрицу 4-хструнного волнографа



Рис. 4. Оптическое изображение зоны рассеяния на морской поверхности при низком положении Солнца – "солнечная дорожка" (вид с берега)

За время экспериментов был выполнен большой объем волнографических и радиометрических исследований, в том числе и не совпадающих по времени. Однако, все-таки наиболее интересными и важными, с точки зрения развития существующих радиационно-ветровых моделей поверхностного волнения, являются как раз результаты комплексных радиофизических и гидрофизических измерений, которые проводились в этом случае практически одновременно. В таких экспериментах одновременно

измерялись: 1) вклад в измеряемую антенную температуру отраженного солнечного СВЧ- радиоизлучения на вертикальной и горизонтальной поляризациях; 2) скорость и направление ветра на стандартной высоте 19.5 м; 3) дисперсии уклонов вдоль и поперек направления разгонного встра (или зыби); 4) температура, влажность и давление приземного слоя атмосферы, а также температура верхнего слоя воды на глубине 1м. Для дальнейшего анализа использовались только те данные, которые были получены в условиях безоблачной атмосферы. В начале и конце каждой серии радиометрических измерений проводилась калибровка всех радиометров с использованием системы тепловых эталонов и угловых атмосферных зависимостей. В начале каждой серии для всех радиометров при прямом прохождении Солнца через соосные диаграммы направленности проводилась запись уровней падающего потока. Для этой же цели использовался и многочастотный контроль уровня потока излучения Солнца на основе данных Службы Солнца с учетом диапазона и времени измерений, а также местных метеоданных. Ближайший из используемых для этой цели радиотелескопов находился на берегу, на расстоянии 1400 метров от борта исследовательской платформы. Измерения проводились в период активного Солнца (1989-90гг) – уровень излучения и частота всплесков были значительными. Если, по сообщению Службы Солнца, во время проведения измерений такой СВЧ- радиовсплеск регистрировался – то полученные данные в дальнейшем подлежали коррекции или полной отбраковке. Таким образом, достигался контроль уровня излучения источника зондирующего сигнала – Солнца.

Анализ физических, геометрических и временных характеристик исследуемого процесса позволил сделать вывод о возможности выделения подсвета от рассеянного солнечного излучения на фоне собственного излучения системы "океан- атмосфера" путем использования режима "солнечная дорожка". В этом режиме при "почти фиксированном" положении Солнца (его зенитном и азимутальном углах) осуществлялось выделение подсвета от Солнца методом азимутального сканирования при пошаговом изменении зенитного угла приемной антенны.

На рис.5 приводится пример такого рода комплексных данных: дата – 08 июля 1990г., зенитный угол Солнца изменяется в пределах 60÷61 угл. град, влажность – 24 г/м<sup>3</sup>, температура воздуха +25°С, температура воды +19.5°С, сила ветра около 1.5 м/с с направлением вдоль "солнечной дорожки". Несмотря на очень слабый ветер, море заметно волнуется – почти вдоль направления дорожки идет крупная зыбь с дисперсией уклонов 0.0142 вдоль ветра и около 0.007 поперек направления сопутствующего ветра. Радиояркостная температура (сквозь атмосферу) Солнца, приведенная к оптическому диску, составляет во время измерений около 9500°К для 37.5 ГГц, 13900°К для 13.3 ГГц и 47300°К для 5.0 ГГц. Таким образом, можно видеть, что величины вклада рассеянного солнечного излучения в измеряемую антенную температуру достаточно велики. В литературе [1] приводятся сведения о регистрации величин вклада в сотни градусов Кельвина на дециметровых волнах.

Немаловажным является также тот факт, что не только абсолютное значение величины вклада в сантиметровом и дециметровом диапазонах достаточно велико, но и то, что чувствительность этой величины к вариациям параметров поля поверхностных шероховатостей тоже достаточно заметна. Иллюстрацией факта такой зависимости, а также зависимостей от плотности потока падающего излучения и углов падения/рассеяния служит рис.6. На нем приведены результаты измерения вдоль трех солнечных дорожек (канал 2.25 см, горизонтальная поляризация):

1) дорожка **R1**: плотность потока солнечного излучения  $SF_{2.25} = 515$  s.f.u., зенитный угол Солнца  $\theta_s = 60 \div 61$  угл. град, влажность в приземном слое  $H_A = 24$  г/м<sup>3</sup>, температура воздуха  $T_A = +25$ °C, температура воды  $T_W = +19.5$ °C, скорость ветра V около 1.5 м/с на высоте 19.5м, направление ветра параллельно оси "Солнечной дорожки", дисперсия уклонов вдоль направления ветра составляет  $\sigma_x^2 = 0.0142$  и поперек  $\sigma_y^2 = 0.007$ ;

2) **R2**:  $SF_{2.25} = 524$  s.f.u.,  $\theta_s = 70 \div 71$  угл. град,  $H_A = 19$  г/м<sup>3</sup>,  $T_A = +23$  °C,  $T_W = +22.5$  °C, V около 1.5 м/с на высоте 19.5м, направление ветра параллельно оси "Солнечной дорожки", дисперсия уклонов вдоль направления ветра составляет  $\sigma_x^2 = 0.0027$  и поперек  $\sigma_y^2 = 0.0023$ ; 3) **R3**:  $SF_{225} = 495$  s.f.u.,  $\theta_s = 71 \div 72$  угл. град,  $H_A = 21.5$  г/м<sup>3</sup>,  $T_A = +24$ °С,  $T_W = +22$ °С, V = 7 m/s, направление встра параллельно оси "Солнечной дорожки",  $\sigma_x^2 = 0.0185$  и  $\sigma_y^2 = 0.0115$ .

После анализа и необходимой отбраковки из массива полученных за период измерений первичных данных было выделено около 60 вариантов "Солнечной дорожки", точнее различных вариантов ее многоканальных "портретов в отраженном солнечном радиоизлучении" (см. рис.5). Было также получено большое количество данных по статистике уклонов крупных морских волн. Следовательно, имеется возможность проверить справедливость некоторых из теоретических допущений, используемых в расчетах (см. Введение), и постараться улучшить существующую методику расчетов на основании полученных в эксперименте данных.



Рис. 5. Вклад отраженного радиоизлучения Солнца в измеряемую антенную температуру (данные от 08 июля 1990г.)



Рис. 6. Вклад отраженного радиоизлучения Солнца на длине волны 2.25см (горизонтальная поляризация) в измеряемую антенную температуру при различных условиях съемки

#### Статистика морского волнения

Стационарная исследовательская платформа, принадлежащая Экспериментальному Отделению Морского Гидрофизического Института, находится вблизи южного побережья Крымского полуострова в районе поселков Кацивели и Симеиз. Удаление от берега в сторону открытого моря составляет приблизительно 800 м. Таким образом приходилось считаться с возможным наличием нетипичного поверхностного волнения при коротких встровых разгонах с берега. В целях приближения к условиям открытого моря в ходе экспериментов рассматривались только ситуации, когда направление встра и приходящей зыби было со стороны открытого моря на берег или параллельно береговой черте. В результате было обнаружено, что наличие одной или нескольких систем зыби наблюдается приблизительно в 60÷65% всех случаев, а ситуация чисто (более или менее) ветрового волнения наблюдается реже – в остающихся 35÷40% случаев наблюдения. Причем это усредненное по всем периодам измерений соотношение остается приблизительно таким же и при усреднении внутри отдельных периодов измерений (март-апрель 1989 г., октябрь-ноябрь 1989 г. и июнь-июль 1990 г.). Сравнение полученных результатов с имеющимся массивом океанологических данных, полученных другими исследователями для случая открытого океана, дает неожиданно хорошее совпадение в части статистики ветрового волнения и приходящей зыби [14-16]. Например, канонические результаты Московитца [16] для открытого океана были получены путем тщательного анализа обширного массива волнографических данных, добытых с кораблей погоды в Атлантике. Они свидетельствуют о том, что доля чисто ветрового волнения в условиях открытого океана не превышает 42-45% во все сезоны. Таким образом, можно считать, что наша экспериментальная модель достаточно хорошо приближает условия открытого моря.

На рис. 7 приводится пример реальной, достаточно простой и вместе с тем очень показательной ситуации. В начальной фазе процесса волновая обстановка постепенно эволюционирует вслед за нарастанием скорости разгонного ветра от 7 м/с до 12.5 м/с. Затем "раскачка" волнения продолжается, несмотря на прекращение роста скорости разгонного ветра и даже его постепенное затухание вплоть до величины в 6 м/с. Заключительная фаза отражает картину последующей постепенной диссипации волновой энергии на фоне затухания силы ветра до 1 м/с и последующего возврата к практически равновесным значениям дисперсии уклонов, соответствующим начальной силе ветра в 7 м/с. Временной интервал между точками на графиках составляет около 50 мин, ветер измеряется на высоте 19.5 м. Видно, что для одного и того же значения скорости разгонного ветра разница между возможными минимальным и максимальным значением дисперсии уклонов в этом "гистерезисе" довольно велика.



Рис. 7. Эволюция волновой обстановки во времени

Следует отметить, что совместно радиометрические (по приему рассеянного солнечного излучения) и волнографические эксперименты проводились, в основном, в первой половине светового дня. Однако за весь экспедиционный период был также собран большой массив независимых волнографических данных, когда данные с волнографов и метеодатчиков снимались круглосуточно с заданной периодичностью. При этом, в частности, наблюдались различные состояния стратификации приземного слоя атмосферы. На рис. 8. приводятся совокупные результаты волнографических измерений за периоды октябрь-ноябрь

1989 г. и июнь-июль 1990 г. Значения дисперсии уклонов крупных волн вдоль и поперек направления разгонного ветра выделены в отдельные группы.



Рис. 8. Совокупные данные одновременного измерения скорости ветра на высоте 19.5м и дисперсии уклонов крупных волн (октябрь- ноябрь 1989, Июнь- Июль 1990)

Итак, доля чисто ветрового волнения может составлять от 35 до 45% всей статистики поверхностного волнения – здесь результаты различных исследователей практически не расходятся. Однако, по мнению того же Московитца [16], лишь около 5% всех рассмотренных случаев достаточно близки к теоретической ситуации полностью развитого волнения. В цитируемой выше работе Калинина и Лейкина [20], полностью развитым было признано волнение всего лишь в 14 случаях за целый месяц измерений в Каспийском море. Таким образом, очевидно, что океанологи использовали какие-то очень жесткие критерии развитости. Может быть, именно в этом кроется причина столь разительного отличия данных Бурцева - Пелевина [19] и Калинина - Лейкина [20] от более ранних результатов Кокса - Манка [8, 9]. Рассмотрим с этой точки зрения также и наши эксперименты.

К ветровому волнению нами было отнесено 35-40% от общего объема реализаций. При этом, в половине случаев (15-20% от общего числа реализаций), волнение находилось в стадии развития или затухания. В зависимости от ветрового режима, величины дисперсии уклонов вдоль и поперек направления ветра могли приобретать значения в довольно широком диапазоне вокруг значений соответствующих квазиравновесному "достаточно развитому". В другой половине случаев (15-20% от общего числа реализаций) ветровое волнение было интерпретировано нами как практически развитое. В качестве критерия развитости было выбрано сочетание следующих условий: 1) скорость и направление приводного ветра должны оставаться практически неизменными в течение 3 и более часов; 2) по прямым и косвенным признакам наличие зыби должно исключаться; 3) величины дисперсии уклонов поверхностных волн вдоль и поперек направления разгонного ветра должны оставаться постоянными и могут незначительно убывать. Подчеркнем, что за все время летних наблюдений (июнь-июль 1990 г.) нам ни разу не удалось наблюдать такого рода состояние поверхности с продолжительностью более 5 часов, в то время, как при работах весной и осенью (март-апрель, октябрь-ноябрь 1989 г.) такого рода примеры периодически наблюдались при постоянно дующих (из открытого моря вдоль береговой черты) умеренных и свежих ветрах.

Рассмотрим зависимость дисперсии уклонов от величины разгонного ветра, полученную для нашего варианта "достаточно развитого" волнения.

Вполне определенно выделяются 2 области:

1) Область I – разгонный ветер имеет значение от практически 0 до 8-9 м/с. Здесь выявляется довольно четкая линейная зависимость (V – скорость ветра на h = 19.5 м) со следующими характеристиками:

$$\sigma_X^2(V) = 0.0016 + 0.0028 \cdot V$$
  

$$\sigma_Y^2(V) = 0.0014 + 0.0014 \cdot V$$
  

$$\sigma^2(V) = \sigma_X^2(V) + \sigma_Y^2(V) = 0.003 + 0.0042 \cdot V \pm 0.004$$
  

$$\langle \sigma_X^2(V) / \sigma_Y^2(V) \rangle \approx 0.53$$
  
(3a)

2) Область II - разгонный ветер имеет значение от 9 до 15 м/с. Здесь становится заметным уменьшение наклона кривой (практически вдвое), так что при линейной аппроксимации в этом диапазоне значений разгонного ветра получаются следующие зависимости:

$$\sigma_X^2(V) = 0.0153 + 0.0014 \cdot V$$
  

$$\sigma_Y^2(V) = 0.0063 + 0.0008 \cdot V$$
  

$$\sigma^2(V) = \sigma_X^2(V) + \sigma_Y^2(V) = 0.0216 + 0.0022 \cdot V \pm 0.004$$
  

$$\langle \sigma_Y^2(V) / \sigma_Y^2(V) \rangle \approx 0.51$$
  
(3b)

На рис. 9а и 9b дается сравнение полученных здесь и упоминавшихся выше результатов Кокса-Манка [8,9], Бурцева – Пелевина [19] и Калинина-Лейкина [20] (все зависимости приведены к высоте 19.5м).



Рис. 9а. Вдоль направления разгонного ветра





Из этого сравнения видно, что неожиданно обнаруживаются некие черты схожести со всеми тремя вышеупомянутыми исследованиями:

1) Например, зависимости "вдоль направления разгонного ветра" и "интегрально по углу", полученные в Области I (3а), достаточно близки к результатам Кокса- Манка, приведенным к высоте измерения 19.5м ( $\sigma$ 2cm(V) = 0.003 + 0.0048·V ± 0.004). Следует при этом также учитывать вероятность того, что "квазиоптический" метод Кокса-Манка все-таки более чувствителен в смысле учета вклада от высокочастотной части спектра волнения и, конечно, о всевозможных погрешностях измерения в обоих случаях.

2) Зависимости "поперек направления разгонного ветра" в Области I (36) также достаточно близки аппроксимации Кокса-Манка, однако, в то же время они гораздо ближе к результатам Бурцева - Пелевина (с учетом погрешностей измерения и усреднения в обоих случаях).

3) И, наконец, посмотрим на величину (σ2у/σ2х), которая характеризует угловое распределение волновой энергии в исследуемом диапазоне частот и волновых чисел и должна уменьшаться с развитием волнения. Эта величина для нашего варианта "достаточно развитого волнения" имеет значение около 0.52 во всем исследованном диапазоне значений силы ветра. Что гораздо ближе к результатам КалининаЛейкина (около 0.44) чем к данным Кокса- Манка и Бурцева- Пелевина (приблизительно 0.76 в обоих случаях). При этом, кстати, и наклон кривой дисперсии, интегральной по углу, в Области II (0.0022) практически совпадает с данными [20] этих исследователей (0.0021), полученными приблизительно в том же диапазоне силы ветра (от 6.6 до 14 м/с).

В связи с вышеизложенным, еще раз вспомним утверждение Китайгородского [16] о необходимости согласования между заинтересованными исследователями единых количественных и статистических критериев при принятии решения о степени "развитости". При этом, с точки зрения специалистов по дистанционному зондированию поверхности океана, важно, чтобы эти критерии отвечали на практике достаточно большой вероятности реализации, а не требовали чрезмерной "идеализации" с вероятностью реализации, стремящейся к нулю.

Обратимся далее к основным аспектам радиофизической части исследований.

# Общий анализ радиометрических и волнографических данных комплексного эксперимента

После первичной обработки результатов комплексных радиометрических измерений (см. выше) было получено около 60 экспериментальных серий. Они представляли собой наборы данных по рассеянию падающего СВЧ- излучения Солнца на взволнованной морской поверхности при относительно невысоком положении светила над горизонтом – т.е. в режиме "солнечная дорожка". Каждый такой набор (каждая "дорожка") включал в себя данные по приему под разными надирными углами приемной антенны (при почти неизменном угле Солнца) на горизонтальной и вертикальной поляризациях и длинах волн 6.0 см (5 Ггц), 2.25 см (13.33 Ггц) и 0.8 см (37.5 Ггц). Высота Солнца над горизонтом составляла от 15 до 42 градусов (зенитный угол Солнца от 48 до 75 градусов). Каждой "дорожке" ставились в соответствие величины радиояркостной температуры (спектрального потока) источника на указанных длинах волн (частотах), метеоданные приводного слоя атмосферы и верхнего слоя воды, а также данные волнографического комплекса о характеристиках спектра уклонов крупных морских волн.

Как было показано на рис.5-6 величины вклада отраженного солнечного радиоизлучения в измеряемую антенную температуру при слабых и умеренных встрах достаточно велики. Достаточно велика, также и чувствительность этих величин к изменению степени шероховатости морской поверхности (существенно больше, чем чувствительность уровня собственного теплового излучения морской поверхности). Это дает основания считать, что можно существенно уточнить методику расчета взаимодействия СВЧ радиоизлучения с полем шероховатости взволнованной морской поверхности. Для этого необходимо скорректировать теоретическую модель путем сравнения с полученными экспериментальными данными. Такая процедура была выполнена. При расчетах использовались стандартная безоблачная модель атмосферы и аппроксимация влияния пены аналогичная (2). На рис. 10 приводится пример такой коррекции теоретической модели для каналов с длиной волны 6.0 см путем "подгонки" под экспериментальные данные за 8 июля 1990 г. Процедура такой "подгонки" заключалась в варьировании величины дисперсии уклонов в расчетной модели с целью достижения максимального соответствия одновременно для обеих поляризаций принимаемого излучения по параметрам величины максимального вклада и угловой ширины "солнечной дорожки". Реализовалась ожидаемая ситуация – хорошее совпадение достигалось в том случае, когда для расчета использовалась лишь определенная доля от величины дисперсии уклонов, измеренной с помощью волнографа (см. для понимания рис. 10). Затем было проведено статистическое усреднение для каждой длины волны (по обеим поляризациям одновременно). В итоге получились усредненные коэффициенты для пересчета дисперсии крупных морских волн, полученной, строго говоря, для волнографа с базой 30см, к фракции волн "крупных для зондирующей СВЧ радиоволны с частотой излучения f". Однако, расчетные оценки и сам факт близости полученных данных по статистике уклонов в Области I к результатам Кокса- Манка позволяют использовать их с достаточно хорошим приближением и для пересчета от фракции волн "крупных для оптической съемки, т.е. по Коксу-Манку, Бурцеву-Пелевину и т.д." к фракции волн "крупных для зондирующей СВЧ радиоволны с частотой излучения f". Что, в общем, не является принципиальным, но, в некотором смысле соответствует устоявшейся в дистанционном зондировании системы "океан - атмосфера" традиции. Тем не менее, не будем забывать, что нашим целям и сформулированному выше практическому критерию "достаточной развитости" лучше все-таки отвечают полученные в данной работе зависимости (За-б).



Рис. 10. Коррекция теоретической расчетной модели на основе полученных экспериментальных данных (длина волны 6см, горизонтальная и вертикальная поляризации)

Итак, пусть поверхностное ветровое волнение является в достаточной степени развитым или предполагается априори таковым, например, при обработке спутниковых данных для последующего решения обратной задачи ДЗ САО. Тогда необходимо взять величину дисперсии уклонов крупных волн, рассчитанной по модели развитого волнения (За-б), и умножить ее на соответствующий коэффициент частотной коррекции. Таким образом, будет получена дисперсия уклонов крупных волн, сформированная только фракцией волн "крупных для зондирующей СВЧ радиоволны с частотой излучения f". При этом диапазонам 6.0 см (5 ГГц), 2.25 см (13.33 ГГц) и 0.8 см (37.5 ГГц) соответствуют следующие значения коэффициентов коррекции: 0.36 ( $\pm$  0.05), 0.47 ( $\pm$  0.07) и 0.62 ( $\pm$  0.08), соответственно. При скорости разгонного ветра менее 9 м/с (на высоте 19.5 м) с достаточной погрешностью вместо модели развитого волнения (За-б) можно использовать также зависимости Кокса- Манка [8, 9]. Далее, вполне естественно, эти коэффициенты методом линейной интерполяции преобразуются в зависящую от частоты зондирования f (в ГГц) поправочную функцию C(f), так что

$$\sigma_r^2(f,V) = \sigma^2(V) \cdot C(f), \tag{4}$$

где  $\sigma^2(V)$  получается из (3а-б), а  $C(f) = 0.34 + 0.0076 \cdot f$ .

На рис. 11 представлены полученный выше результат (4) и частотная аппроксимация Холлингера-Вилхайта. Действие нашего варианта сознательно ограничивается диапазоном от 3 до 50 ГГц. Подчеркнем при этом, что получение экспериментальных данных в диапазонах ниже 3 и выше 50 ГГц чрезвычайно интересно, как с точки зрения теории, так и в связи с усилением практического интереса к этим диапазонам в последнее время. Видно, что полученная нами в исследуемом диапазоне кривая лежит, в целом, существенно ниже, хотя в области малых частот (1÷5 ГГц) эта разница пренебрежимо мала. При этом, если считать, что мы все-таки упускаем некий вклад от более чувствительного, по сравнению с контактным, оптического метода, то как видно из (4), C(f) должно быть еще меньше. О возможных причинах такого различия с результатами Холлингера- Вилхайта уже говорилось ранее, однако существует еще один важный момент. Данные всех исследователей поверхности океана (см. выше) и практических мореплавателей сходятся в том, что случаи развитого ветрового волнения относительно редки – значительно чаще в волнении присутствуют элементы одной или даже нескольких систем зыби. Это значит, что морское волнение, как правило (статистически), "переволновано" по отношению к местному разгонному ветру. И, следовательно, если при проведении экспериментов не использовать сопутствующей волнографической поддержки контактного или бесконтактного типа, а описывать состояние поверхности исходя из заданной модели развитого волнения (как это делали Холлингер и Вилхайт), то, как видно из (4), поправочный коэффициент должен закономерно завышаться по отношению к своему фактическому значению.



Рис. 11. Функция частотной коррекции С(f). Сравнение результатов Холлингера- Вилхайта и авторов статьи

Отметим также, тот очевидный факт, что исходя из простейших физических соображений, можно было бы использовать для аппроксимации экспериментальных данных какую-то иную нелинейную форму – так, чтобы C(f) превращалась в 0 при неком достаточно низком, но ненулевом значении f и гораздо более плавно достигала 1, чем полученная нами прямая (приблизительно  $86\div87$  ГГц). Например, возможен вариант C(f) =  $0.129\cdot\ln(f) + 0.15$ . Однако, в пределах  $3\div50$  ГГц нет существенной разницы в выборе вида такой функции, а вот ниже и выше делать теоретические обобщения, не имея экспериментальных данных, представляется неоправданно рискованным.

### Заключение

Из выполненных исследований следуют вполне определенные выводы.

Во-первых, становится очевидным, что для определения термодинамических и многих других параметров системы "океан- атмосфера" с требуемой в настоящее время точностью, необходимо уметь получать достоверную информацию о текущем состоянии поля поверхностных шероховатостей морского волнения. Иными словами в процессе радиометрических измерений требуется волнографическая поддержка контактного или бесконтактного типа. При этом выбор того или иного метода, а также конкретной аппаратуры и методики измерений должен определяться, прежде всего, параметрами задачи и условиями эксперимента. С точки зрения дистанционного зондирования САО представляется также крайне необходимым целенаправленно работать в направлении дальнейшего развития "волнографических" технологий активной локации и альтиметрии морской поверхности. Такого рода работы в радио и оптическом диапазонах уже проводятся. Весьма вероятно, что уже в самом ближайшем будущем эти

усилия дадут свои плоды и позволят существенно облегчить решение задачи по восстановлению характеристик статистического поля морского волнения при измерениях с борта авиационных и космических носителей.

Во-вторых, вполне естественным выглядит тот факт, что в настоящее время исследователи вынуждены использовать при решении многих задач ДЗ САО простейшую доступную модель статистики морского волнения - модель т.н. "развитого" (или "достаточно развитого") волнения. Однако, при ее применении следует помнить о том, что реально такого рода состояние моря, когда поле поверхностных шероховатостей практически однозначно связано со значением ветра на выбранной "стандартной высоте" реализуется относительно редко – не более чем в 20 % всех (см. выше) случаев. В остальных случаях довольно явно присутствуют элементы неразвитости и приходящая зыбь, которая генетически никоим образом не связана с местным разгонным ветром. Относительная погрешность использования такой упрощенной модели волнения, конечно, различна для разных значений силы ветра. Она относительно минимальна в области квазипостоянных сильных ветров (более 10 м/с и времени действия более 4 часов) и, соответственно, сильного поверхностного волнения (см. рис.8). В области слабых и умеренных ветров (в нашем случае скорость ветра менее 8÷9 м/с), где влияние приходящей зыби и эффектов неразвитости максимально ощутимо, погрешность такой модели закономерно велика даже при значительном времени разгона (см. также рис. 8). Определенный вклад в модель излучения поверхности при сильных ветрах вносит и тот факт, что с ростом значения разгонного встра все большее влияние на величину радиояркостной температуры начинает оказывать растущий по толщине и площади покрытия пенный покров (2). Применимость модели Кокса- Манка к тому, что мы называем "развитым" или "достаточно развитым" волнением, как было показано выше, не вызывает принципиальных возражений вплоть до значений разгонного ветра в 8÷9 м/с (см. рис. 9), при более высоких значениях разгонного ветра эта модель дает очевидно искаженные (завышенные) результаты. В целом, при сформулированном выше практическом критерии "достаточной развитости" в диапазоне значений разгонного ветра от практически нуля до 15÷16 м/с, более адекватными выглядят полученные в работе ветроволновые зависимости (3а-б).

В-третьих, необходимо подчеркнуть, что функция (4) частотной коррекции C(f), предложенная в данной работе для использования в радиодиапазоне 3-50 ГГц, пригодна не только в сочетании с моделью развитого волнения (3а-б) или моделью Кокса-Манка при слабых ветрах. Если пространственное разрешение используемого в работах волнографического комплекса контактного или бесконтактного типа является близким к тому, что дает струнный волнограф с базой матрицы 30-42см, то полученную при таком измерении дисперсию крупных морских волн можно с тем же успехом пересчитывать по формуле (4) для использования в указанном диапазоне микроволнового излучения. Конечно, остаются неясными множество моментов. Например - можно ли и как вывести из полученных таким образом значений дисперсии фракции крупных волн морского волнения предельные (в смысле "допустимой крупности") по отношению к длине волны излучения размеры поверхностной морской волны.

Для ответа на вопрос о возможных колебаниях параметров полуэмпирических моделей развитого и, вообще ветрового волнения, в зависимости от сезонных и географических факторов требуется выполнение по единой методике (на идентичной аппаратуре, с одинаковыми критериями достаточной развитости) значительного объема волнографических исследований в разных районах Мирового океана. В общем, с точки зрения специалиста по дистанционному СВЧ зондированию – пользователя данных и модельных представлений гидродинамики, исчерпывающее решение этой проблемы пока неясно. Представляется совершенно необходимым проведение целого цикла совместных гидро- и радиофизических исследований, подчиненных идее уточнения модели взаимодействия СВЧ- излучения с взволнованной морской поверхностью.

Приведённые в данной статье результаты совместных радио- и гидрофизических измерений являются первой попыткой комплексного подхода к решению проблемы такого рода в СВЧ- радиометрии системы "океан-атмосфера". При выполнении экспериментов по рассеянию шумового радиоизлучения СВЧдиапазона на шероховатостях взволнованной поверхности моря упор делался на установление прямых зависимостей между радиационными характеристиками поверхности и параметрами фактического состояния поля шероховатости. В основу работ были положены экспериментальные данные о величине вклада в измеряемую антенную температуру радиоизлучения Солнца, рассеянного на шероховатостях взволнованной морской поверхности для диапазонов 6.0 см (5 ГГц), 2.25 см (13.33 ГГц) и 0.8 см (37.5 ГГц), на вертикально и горизонтальной поляризациях одновременно. Разработанная на основании этих данных методика позволяет достаточно корректно учесть влияние рассеянного радиоизлучения Солнца на характеристики радиотеплового излучения системы "океан- атмосфера" в зоне солнечного блика во всем диапазоне 3÷50ГГц. Кроме этого, конкретные зависимости, полученные при выполнении данной работы, позволили уточнить в целом радиационно-геофизическую модель морской поверхности в диапазоне частот излучения 3÷50 ГГц. Усовершенствованная модель может быть использована при расчетах различных радиационных характеристик поверхности моря по методу Кирхгофа в процессе решения прямой и обратной задач дистанционного зондирования системы "океан- атмосфера".

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность проф. Коротаеву С.М., проф. Матвееву Д.Т., а также коллегам из МГИ УАН и ИФА РАН за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований. Авторы также благодарны проф. Переслегину С.В. и коллегам из ИРЭ РАН и ИКИ РАН за плодотворное обсуждение полученных результатов.

#### Литература

- Ulaby F., Moore R., Fung A. Microwave remote sensing, active and passive // London: Addison Wesley Publ. Comp., V.1-3, 1983.
- 2. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов // М.: Наука, 1986. 192 с.
- 3. Краус Д.Д. Радиоастрономия // М.: Сов. Радио, 1973. 458 с.
- Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. /Papers of the Specialist meeting in Rome, Italy, 14-17 February, 1994 // D.Solimini. Utrecht: VSP BV, 1995.
- 5. Лаппо С.С., Арманд Н.А., Волков А.М., Переслегин С.В. и др. О концепции развития космической океанологии в России на 1996-2015 гг. // Исследование Земли из космоса, 1997. №2. С.70-80.
- I.L.Thomas, R.W.Saunders, D.L.Croom. Applications of AVHRR Data. /A selection of papers from the Third European AVHRR Data User's Meeting held at the Rutherford Appleton Laboratory and Oxford University, 16-18 December, 1987 // Int. J. of Remote Sensing, 1989. V.10. Nos.4 and 5, April/May.
- 7. Артамонова Ю.В., Келехсаев А.А., Лесив А.Г., Литовченко Д.Ц., Мисник В.П. Методика оценки освещенности на фотоприемнике при регистрации изображений морской поверхности широкопольной фотоаппаратурой // Вопросы радиоэлектроники, 2002. Вып.1. М.: ФГУП ЦНИИ "Комета".
- 8. Cox C., Munk W. Some problems in optical oceanography // J. Marine Res., 1955, V.4.
- 9. Cox C., Munk W.H. Slopes of sea surface ...// Scripps. Inst. of Oceanography. Bull. 1956, V.6, N 9.
- 10. Hollinger J.P. Passive microwave measurements of sea surface roughness // IEEE Trans. Geosci. Electr., 1971, Vol. GE-9.
- 11. *Wilheit T.T.* A Model for the Microwave Emissivity of the Ocean's Surface as a Function of Wind Speed // IEEE Trans. Geosci. Electron., Vol. GE-17, NO.4, October 1979.
- Stogryn A. The emissivity of sea foam at microwave frequencies // J. Geophys. Res., 1972. Vol.77. №9. P. 1658.
- 13. Милицкий Ю.А., Райзер В.Ю., Шарков Е.А., Эткин В.С. О тепловом радиоизлучении пенообразных структур // ЖТФ, 1978. Т.48. №5. С. 1031.
- 14. Wu J. Sea surface slope and equilibrium wind-wave spectrum // Phys. Fluids, 1972, 15, pp.741-747.
- 15. *Hwang P., Shemdin O.* The Dependence of Sea Surface Slope on Atmospheric Stability and Swell Conditions // J. Geophys. Res., 1988. Vol. 93, No. C11, November 15, pp. 13'903 – 13'912.
- 16. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана // Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 284 с.

- Guillou C., Prigent C., English S.J. How to describe the ocean roughened surface in microwave emissivity models? // Papers of the Specialist meeting in Rome, Italy, 14-17 February, 1994. D.Solimini. –Utrecht: VSP BV, pp. 369-377, 1995.
- Schrader M., Liu Q. On the Use of Different Ocean Surface Models in Radiative Transfer Calculation. // Papers of the Specialist meeting in Rome, Italy, 14-17 February, 1994. D.Solimini. Utrecht: VSP BV, pp. 369-377, 1995.
- 19. Пелевин В.Н., Бурцев Ю.Г. Измерение наклонов элементарных площадок поверхности волнующегося моря // Оптические исследования в океане и в атмосфере над океаном. М.: 1975. С. 202-218.
- 20. Калинин С.А., Лейкин И.А. Измерение уклонов ветровых волн в Каспийском море // Изв. АН СССР, ФАО, 1988. Т.24. № 11. С.1210-1217.
- 21. Danilitchev M.V. et al. Investigation of Sun microwave emission intensity, reflected by rough sea surface // IGARSS-93, Tokyo, Japan, August 18-21, 1993. Vol. IV.
- 22. Данилычев М.В., Евтушенко А.В., Кутуза Б.Г., Лотов А.И., Николаев А.Г. Рассеяние СВЧрадиоизлучения Солнца на шероховатостях взволнованной морской поверхности // Радиотехника и электроника, 1993. Т.38. Вып. 2. С.273-278.
- 23. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Николаев А.Г. Применимость эмпирических аппроксимаций распределения уклонов крупных волн в расчетах взаимодействия СВЧ- излучения с взволнованной морской поверхностью // Радиотехника, 2003. № 8. С.88- 97.
- 24. Danilytchev M.V., Kutuza B.G., Nickolaev A.G. The Application of Sea Wave Slope Distribution Empirical Dependencies in Estimation of Interaction between Microwave Radiation and Rough Sea Surface // Proc. 8<sup>th</sup> Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications (MicroRad-2004), IEEE\ESA, S.9, pp.357-361, Rome, Italy, February 2004.