

УДК 551.46.0.:629.78

## **РОЛЬ СОЛНЦА В СВЧ- РАДИОМЕТРИИ СИСТЕМЫ “ОКЕАН-АТМОСФЕРА”**

**М. В. Данилычев, Б. Г. Кутуза, М. Т. Смирнов**

**Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН**

Получена 10 июня 2011 г.

**Аннотация.** Обсуждаются особенности учета вклада от СВЧ- радиоизлучения Солнца, рассеянного на шероховатостях взволнованной поверхности моря, в измеряемую антенную температуру при радиометрических исследованиях системы “океан атмосфера”. Анализируются возможности использования подсвета Солнца в качестве источника зондирующего сигнала при бистатической локации поверхности океана. Описывается модель расчетов для диапазона 3...50 ГГц, развитая по результатам комплексных экспериментов в диапазонах 0,8см (37,5ГГц), 2,25см (13,33ГГц) и 6см (5ГГц). Проводится сравнение новых экспериментальных данных с результатами модельных расчетов в диапазоне 21см (1,42ГГц).

**Ключевые слова:** СВЧ- радиометрия, поверхность океана, поток солнечного радиоизлучения.

**Abstract** - The specific aspects of calculating of the contribution of Sun microwave emission scattered by rough sea surface into antenna temperature at radiometer investigation of the system "ocean - atmosphere" are discussed. The possibility to use Sun illumination as a source signal for the bistatic sensing of the ocean surface is analyzed. The calculation model is described for the frequency range of 3...50GHz, which was developed as a result of complex experiments in 0.8 cm (37.5 GHz), 2.25 cm (13.33 GHz) and 6 cm (5 GHz) wavelength ranges. The comparison of new experimental data with the model calculation results is carried out in the range of 21 cm (1.42 GHz).

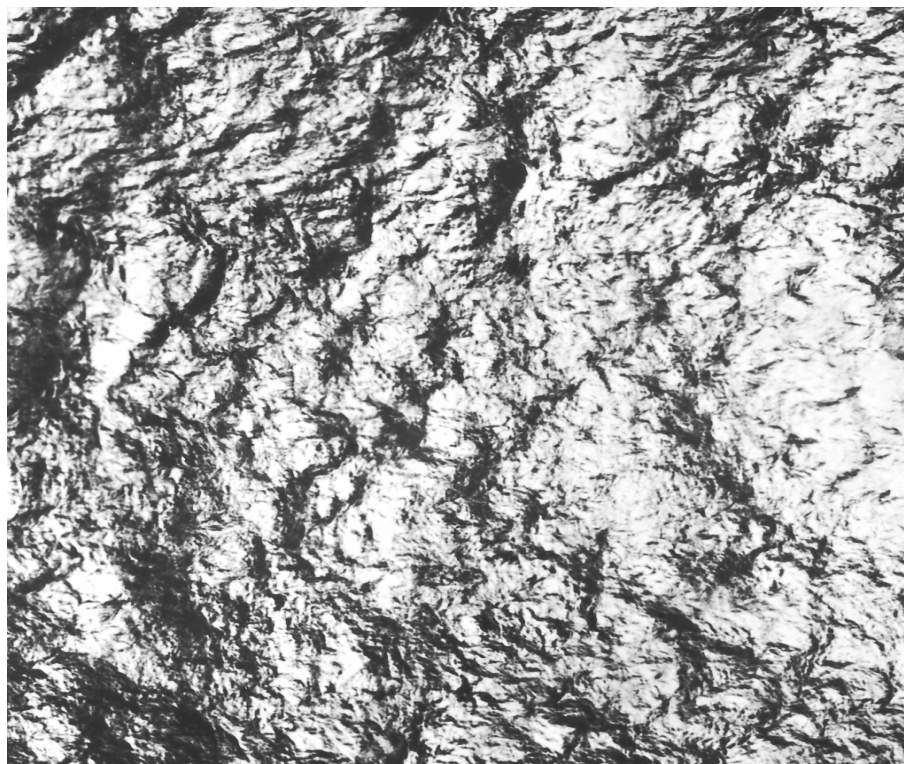
**Keywords:** Microwave radiometry, sea surface, solar microwave radiation.

## **1. Введение.**

Общеизвестно, что методы СВЧ дистанционного зондирования и, в частности, СВЧ- радиометрия позволяют получать информацию о характеристиках атмосферы и поверхности океана с борта летательных аппаратов независимо от погодных условий и условий освещенности [1,2]. Это выгодно отличает их от оптических и инфракрасных аналогов. Кроме того, существует целый класс задач, в решении которых главенствующая роль отводится методам СВЧ- дистанционного зондирования. В частности, СВЧ- радиометрический метод, основанный на измерении общего потока и последующем выделении собственного теплового излучения исследуемой среды (в миллиметровом и сантиметровом диапазоне), позволяет получать конкретные сведения о поверхности океана и состоянии атмосферы, как то – пространственное распределение температуры поверхности океана (ТПО), состояние поверхностного волнения, направление и величина приводного ветра, соленость верхних слоев океана, полное влагосодержание атмосферы, полный водозапас (интегральная водность) облаков, характер и интенсивность осадков и др. Для правильной количественной и качественной интерпретации в соответствующих терминах получаемой информации о распределении восходящего СВЧ- излучения системы “океан-атмосфера” (САО) необходимо корректно учитывать все источники радиоизлучения, формирующие общую наблюдаемую картину. Одним из факторов такого рода является радиоизлучение СВЧ диапазона, создаваемое на орбите Земли потоками от “почти дискретных” или же “существенно распределенных” (в смысле углового размера) источников излучения внеземного происхождения. Величины плотностей некоторых из этих потоков вблизи Земли могут оказаться достаточно значительными для того, чтобы заметным образом влиять на точность результатов получаемых при выполнении процедуры восстановления параметров системы “океан-атмосфера”. Влияние такого рода сторонних потоков может проявляться в увеличении погрешностей измерения основного исследуемого потока за счет неконтролируемого неравномерного

радиационного нагрева различных частей приемного тракта или в результате прямого попадания неконтролируемых потоков стороннего космического излучения в боковые лепестки диаграммы направленности антенны (ДНА). Однако существует и третья возможность влияния такого рода – за счет появления “подсвета” при рассеянии падающего потока на шероховатостях взволнованной поверхности моря. Таким образом, в зависимости от используемого диапазона и желаемой точности восстановления параметров САО, может потребоваться учет радиояркости галактического излучения в определенных секторах звездного неба, реликтового фона и, может быть, даже его неоднородностей.

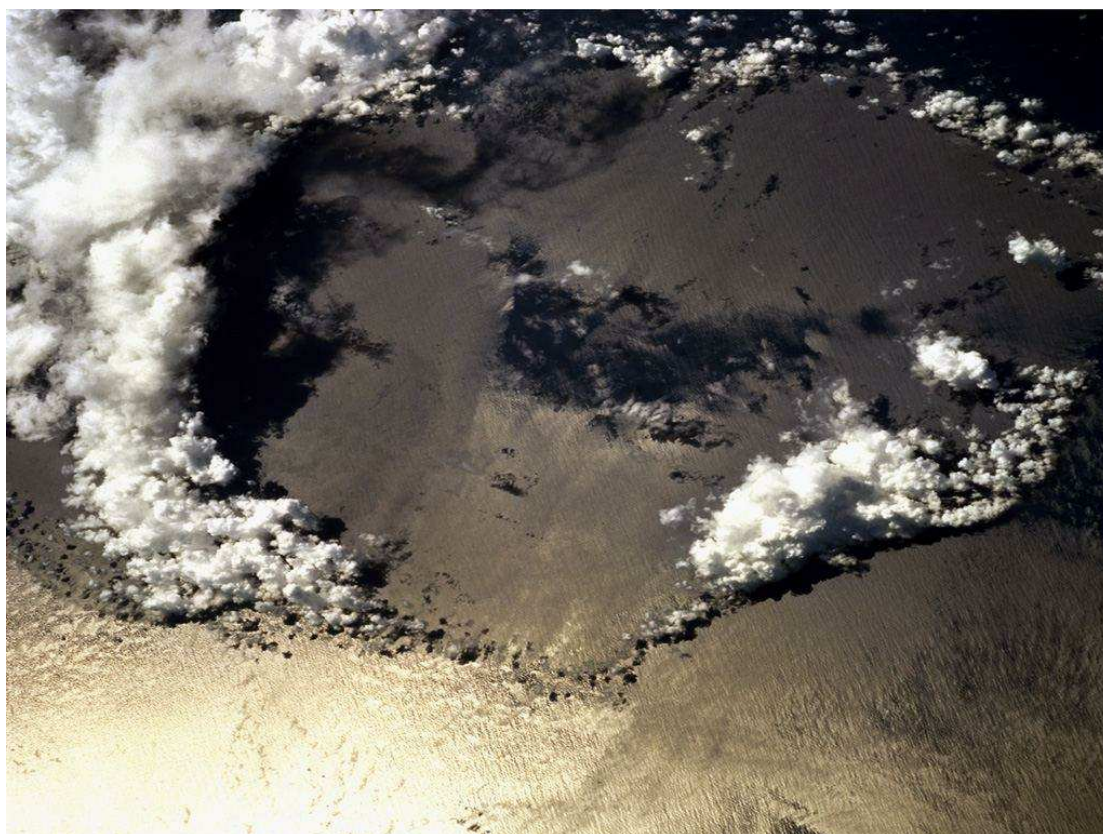
Очевидным источником самого мощного потока электромагнитного излучения космического происхождения во всех частотных диапазонах вблизи Земли является наша звезда по имени Солнце. При этом, благодаря значительной величине потока и малому (приблизительно от 31’30” до 32’36” в видимом диапазоне) угловому размеру, Солнце, в отличие от иных источников внеземного космического излучения, может рассматриваться не только как источник помех, но и как генератор электромагнитного излучения вполне пригодного для дистанционного зондирования поверхности и прилежащего слоя океана в режиме бистатической локации. Разумеется, такой подход, в целом, является привычным и уже вполне традиционным для оптического диапазона ДЗ САО как при прямом зрительном восприятии, так и при использовании специальной оптической аппаратуры. Это касается работы, и при рассеянном солнечном освещении, и в области т.н. “солнечных бликов” (области квазизеркального отражения от поверхностной структуры поля морского волнения) [3-7]. Например, при определенных углах Солнца, углах зрения бортовой аппаратуры и отсутствии поверхностного морского волнения в сине-зеленой части спектра удастся получать информацию вплоть до глубин моря в 60-70 метров!



**Рис.1** Съемка в оптическом диапазоне (с высоким разрешением) поверхности океана в зоне “солнечного блика”. Ориентация “в надир”, безоблачно, высокое положение Солнца.

В зоне же оптического солнечного блика вся информация о “естественном цветовом портрете” поверхностных и подповерхностных вод серьезно искажается вплоть до полной ее потери [3]. Однако, с другой стороны, известно, что при этом возникают и своеобразные новые возможности, например, по определению степени шероховатости морской поверхности и характеристик поля приводного ветра или выделению областей покрытия пленками ПАВ [3-7]. Как следствие этого, рассеяние солнечного излучения оптического диапазона на шероховатостях морской поверхности издавна является предметом серьезных научных исследований. Необходимо отметить заслуги и фундаментальные труды в этой области нашего бывшего соотечественника Мулаамаа [7] и американских ученых Кокса и Манка [4,6]. Разумеется, приходится учитывать, что в практических исследованиях такого рода характеристики поля восходящего рассеянного солнечного света зависят не только от параметров поля поверхностных шероховатостей, но и от характеристик облачного покрытия в данном районе. Так, на рис.1 (см. выше)

приведен пример оптического черно-белого снимка высокого разрешения, сделанного в условиях безоблачной атмосферы и при высоком положении светила. На этом снимке “в надир” изображен участок поверхности океана в зоне солнечных бликов. На рис.2 приводится вариант обзорного снимка морской поверхности, на котором, поле солнечных бликов “накладывается” на несколько смежных районов с существенно отличным характером поверхностного волнения и облачного покрытия [3,4].



**Рис.2** Оптический снимок района Мирового океана в зоне “солнечного блика” со смежными участками различного волнения и облачного покрытия.

В СВЧ диапазоне ДЗ САО такого рода теоретические оценки и экспериментальные исследования до недавнего времени носили отрывочный и часто случайный характер. Можно, например, упомянуть классическую работу [2], в которой была сделана теоретическая оценка для диапазона  $\lambda = 21,3\text{см}$  (1,41 ГГц). Было показано, что вклад в антенную температуру при отражении от гладкой водной поверхности может измеряться несколькими сотнями градусов Кельвина для узких (до 10 угл.град по уровню половинной мощности) ДНА и,

таким образом, в несколько раз превышать уровень собственного излучения моря (вплоть до достижения состояния насыщения или зависания приемных цепей радиометра). Экспериментальные данные (Swift, 1974 и Wentz, 1978), приведенные там же, в общем, подтверждали этот вывод и одновременно свидетельствовали о том, что при появлении волнения величина вклада существенно падает. Например, данные Свифта (1974) были получены для фиксированного положения приемных антенн в диапазонах 1,41 ГГц (21,3 см), 4 ГГц (7,5 см), 7,5 ГГц (4 см) довольно узких ДНА. Они представляли собой 2-х часовые записи прохождения отражения Солнца на фоне шумовой дорожки от собственного излучения морской поверхности при скорости разгонного ветра порядка 20 узлов, т.е. около 10 м/с. Методология и результаты Вентца (1978) были аналогичными. К сожалению, как и многие другие эксперименты по радиометрии океана того времени, они не сопровождались данными о развитости волнения и фактическом характере поля поверхностных шероховатостей, а также его временной изменчивости.

В 1989-90 гг., в рамках подготовки программы подспутниковых экспериментов по проектам “Природа” и “Океан”, экспедицией ИРЭ АН СССР на полигоне Кацивели (ЧО МГИ АН УССР) были выполнены эксперименты по бистатической локации взволнованной поверхности моря [8,9]. При этом в качестве источника зондирующего шумового СВЧ- радиоизлучения выступало Солнце, а основной объем данных по рассеянию в квазизеркальной области был собран на длинах волн 0,8 см (37,5 ГГц), 2,25 см (13,33 ГГц) и 6,0 см (5,0 ГГц) обеих поляризации. Вклад от солнечного “подсвета” выделялся путем сканирования по азимутальному и зенитному углам вдоль и поперек оси “солнечной дорожки” (см. рис.3).





**Рис.3** Вид области квазизеркального рассеяния типа “солнечная дорожка” (при низких и средних углах Солнца над горизонтом) в оптическом диапазоне.

В результате статистической обработки совокупной информации о параметрах солнечного потока, состоянии атмосферы и верхнего слоя воды, параметрах поля поверхностного волнения была разработана технология радиозондирования морской поверхности в режиме “солнечная дорожка” (при углах Солнца над горизонтом до  $\sim 50^\circ$ ) с использованием расчета по методу Кирхгофа для модели “крупномасштабного” (по отношению к  $\lambda$  радиоволны) поверхностного волнения [10,11]. Для правильного применения этой технологии необходимо адекватное представление о спектральных и временных характеристиках потока СВЧ-излучения Солнца, статистике морского волнения и связи ее параметров с величиной и временем действия разгонного ветра. Кроме этого необходимо также уметь переходить от функции распределения уклонов поверхностных волн, “крупных согласно опорной гидродинамической модели и используемой волнографической аппаратуре”, к функции распределения уклонов поверхностных волн, “крупных по отношению к длине радиоволны  $\lambda$ ”. Рассмотрим эти моменты подробнее.

## 2. Солнце как источник радиоизлучения СВЧ-диапазона.

Как известно, угловой диаметр, телесный угол и яркостная температура Солнца в радиодиапазоне, наблюдаемые с Земли (с учетом фактора атмосферного ослабления) или радиотелескопами ИСЗ, зависят не только от взаимного положения светила и нашей планеты в течении года (годового эксцентриситета) и степени активности Солнца, но также от выбора наблюдаемого частотного диапазона, и, даже, от самой формулировки этих понятий. Чтобы избежать возможных неточностей и разночтений, в солнечной радиоастрономии (и вообще в радиоастрономии), в отличие от ДЗ САО, принято оперировать понятием полного потока излучения  $S(\lambda)$ , которое не зависит от такого рода субъективных факторов и в известном смысле, вообще, более “первично” и “эталонно”. Однако, как важное теоретическое и иллюстративное понятие, понятие “радиояркостная температура” используется также достаточно широко. В радиодиапазоне (при  $hf \ll k_b T$ ) связь между этими понятиями дается в форме закона Рэлея – Джинса [1,2,12-16]:

$$S(\lambda) = \frac{2k_b \cdot T_s}{\lambda^2} \Omega_s, \quad (1)$$

где  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{сек}$  - постоянная Планка,  $k_b = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{K}^{-1}$  - постоянная Больцмана, видимый угол Солнца  $\Omega_s$  измеряется в *стерад*,  $\lambda$  - в *метрах*, а  $S(\lambda)$  - в единицах потока ( $\text{вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ ). Из приведенной формулы видна обсуждаемая взаимозависимость величин  $T_s$  и  $\Omega_s$  при измеряемом потоке. Очень часто в различных работах и справочниках [2,12-16] используется приведение радиояркостной температуры к оптическому диску, т.е. среднему видимому телесному углу  $\Omega_{\square}$  равному  $0.223 \text{ град}^2$  или  $6.8 \cdot 10^{-5} \text{ стер}$  и одновременно дается размер среднего относительного (к радиусу фотосферы  $r_{\square}$ ) радиорadiusа  $r$ . Во внесолнечной радиоастрономии [12-16], при наблюдении удаленных радиоисточников, работают с плотностями потока порядка  $10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ . Для практического применения при этом используется



единица янский (ян), названная в честь основоположника радиоастрономии Карла Янского:

$$1\text{ян} = 10^{-26} \text{вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}. \quad (2)$$

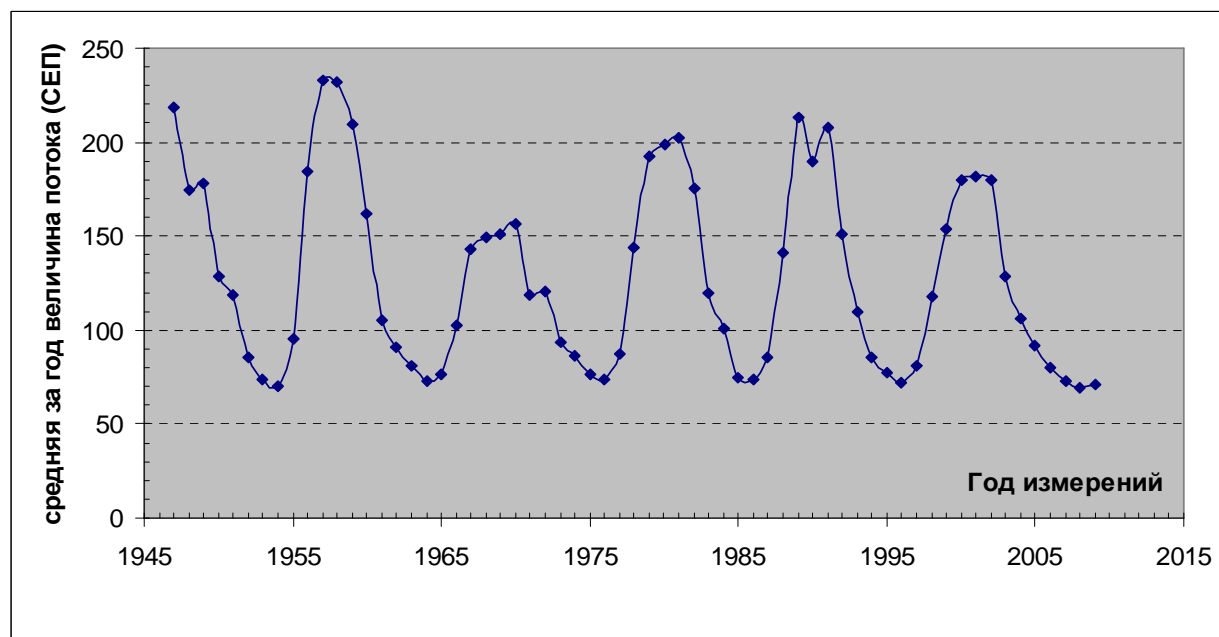
В свою очередь, в практических разделах солнечной радиоастрономии применяется солнечная единица потока (СЕП или s.u., иногда s.f.u.):

$$1\text{СЕП} = 1\text{s.f.u.} = 10^{-22} \text{вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}. \quad (3)$$

Эксперименты показывают, что, несмотря на возможную круговую поляризацию от отдельных локальных источников, интегральный поток (от всего Солнца) солнечного радиоизлучения в СВЧ диапазоне практически неполяризован и образуется как за счет механизмов теплового излучения, так и в значительной мере за счет механизмов нетепловой природы [12-16]. В соответствии с временными характеристиками и источниками генерируемого излучения, принято говорить о следующих компонентах общего потока ЭМ-излучения Солнца в микроволновом радиодиапазоне:

1) **“Спокойное” или “невозмущенное” Солнце** (*background radiation or B-component*). Это понятие эволюционировало вместе с развитием знаний о Солнце. В настоящее время Солнце чаще принято считать “невозмущенным” или “спокойным”, если на его видимом диске отсутствуют какие-либо активные образования (пятна, фолликулы, поры, волокна и т.д.) [13-16]. Тогда под уровнем излучения спокойного Солнца понимают интегральное излучение всей поверхности Солнца за вычетом областей повышенной активности (с характерными временами изменчивости от секунд до месяцев). При таком подходе уровень излучения “спокойного Солнца”, приведенный к расстоянию в 1а.е., становится величиной переменной и квазициклической, правда с очень большим периодом - около 11 лет (а также с учетом смены магнитной полярности между полушариями – около 22, и с модуляцией еще более длительными колебаниями с периодом около 80 лет и т.д.). Часто говорят о едином потоке “спокойного Солнца и основного компонента”, объединяя таким образом “постоянное” и “квазипостоянное” излучение одной природы –

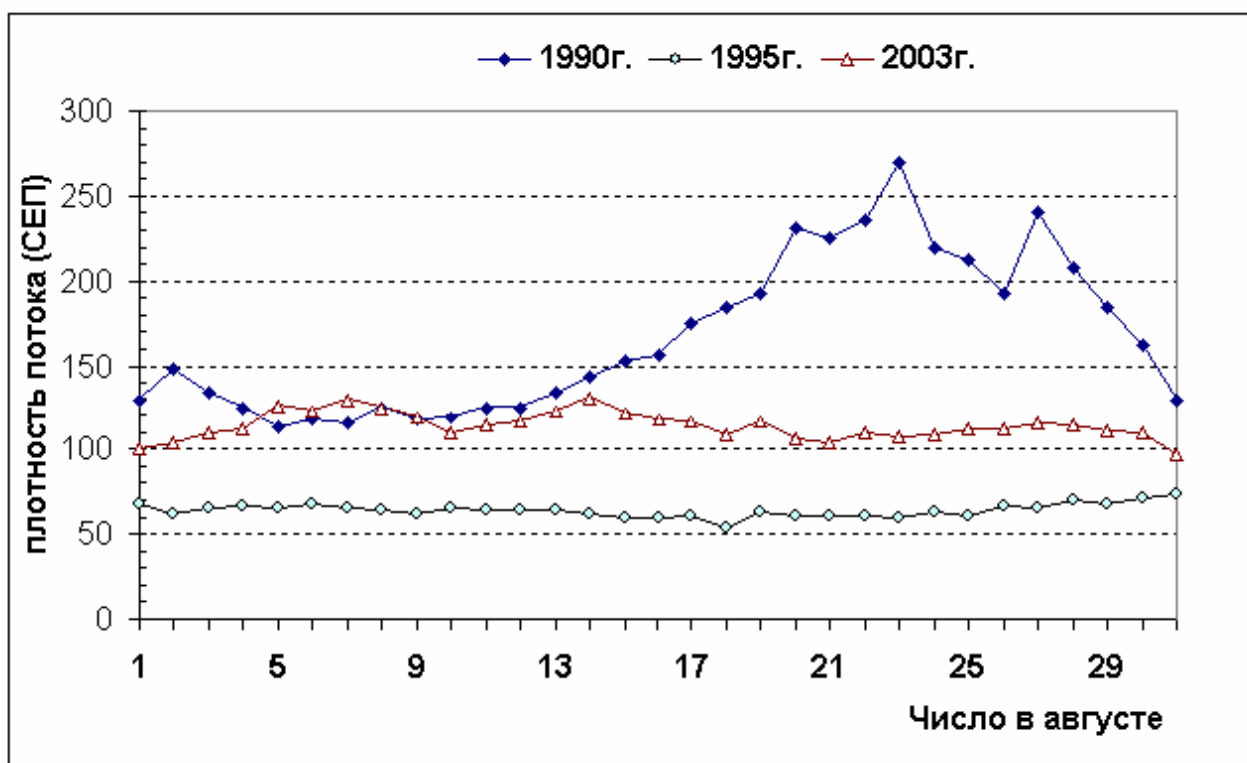
тормозное излучение тепловых электронов от квазиоднородной поверхности диска Солнца вне областей активных образований.



**Рис.4** Колебания среднегодового уровня излучения Солнца (B-компонент+S-компонент) в диапазоне 10,7 см (2800 МГц) по данным международной Службы Солнца [17,18].

2) “Медленно (из)меняющаяся” составляющая солнечного радиопотока (*slowly varying component of radiation or S-component*) представляет собой усиленное тепловое излучение от активных областей. Его интенсивность изменяется сравнительно медленно (дни и месяцы) и сильно коррелирует с числом существующих на солнечном диске пятен – поэтому иногда встречается название **компонент, связанный с пятнами** [13-16]. Изменения потока обусловлены развитием и затуханием активных областей, а также их перемещением от центра к лимбу при вращении Солнца. Амплитуда данного компонента, также как и среднее число пятен на видимом диске (подсчитанное по той или иной методике [12-16]) зависит от нахождения Солнца в той или иной фазе 11-летнего цикла активности. При большом числе солнечных пятен, в годы активного Солнца, его интенсивность сравнима с интенсивностью фонового излучения спокойного Солнца. Период изменения такого компонента часто определяется характером движения по видимому диску наиболее крупной группы (или групп) пятен и поэтому близок к периоду вращения Солнца (около

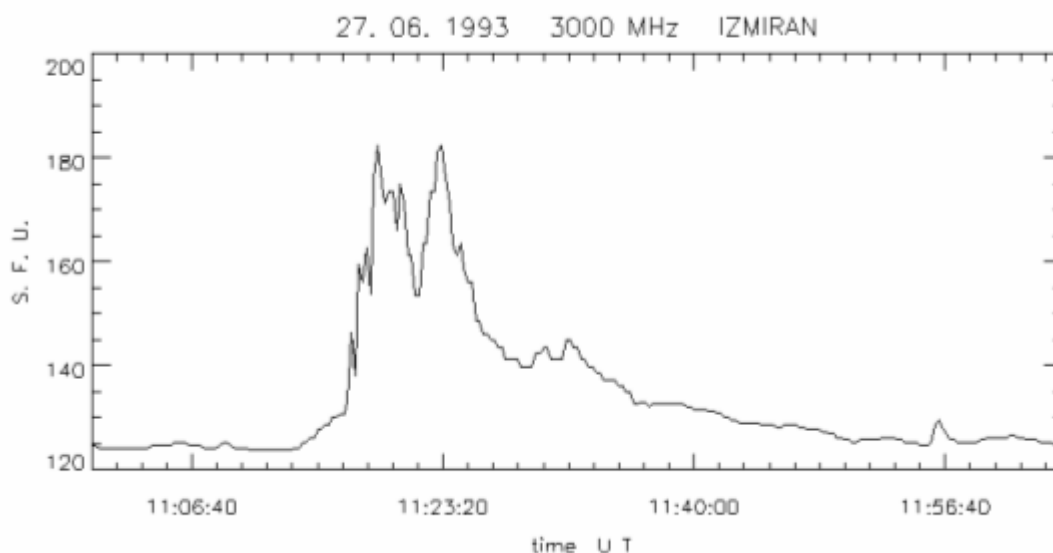
27 дней) или модулируется им. Амплитуда колебаний суммарной плотности ( $V$ -component+ $S$ -component) потока в течении 27-дневного цикла также является величиной в высшей степени зависящей от выбора диапазона измерений и степени активности солнечных процессов.



**Рис. 5** Величина средней за день плотности потока солнечного излучения (в СЕП) на длине волны 10,7 см в годы максимума (1990г.), минимума (1995г.) и на спаде активности (2003г.). Месяц – август.

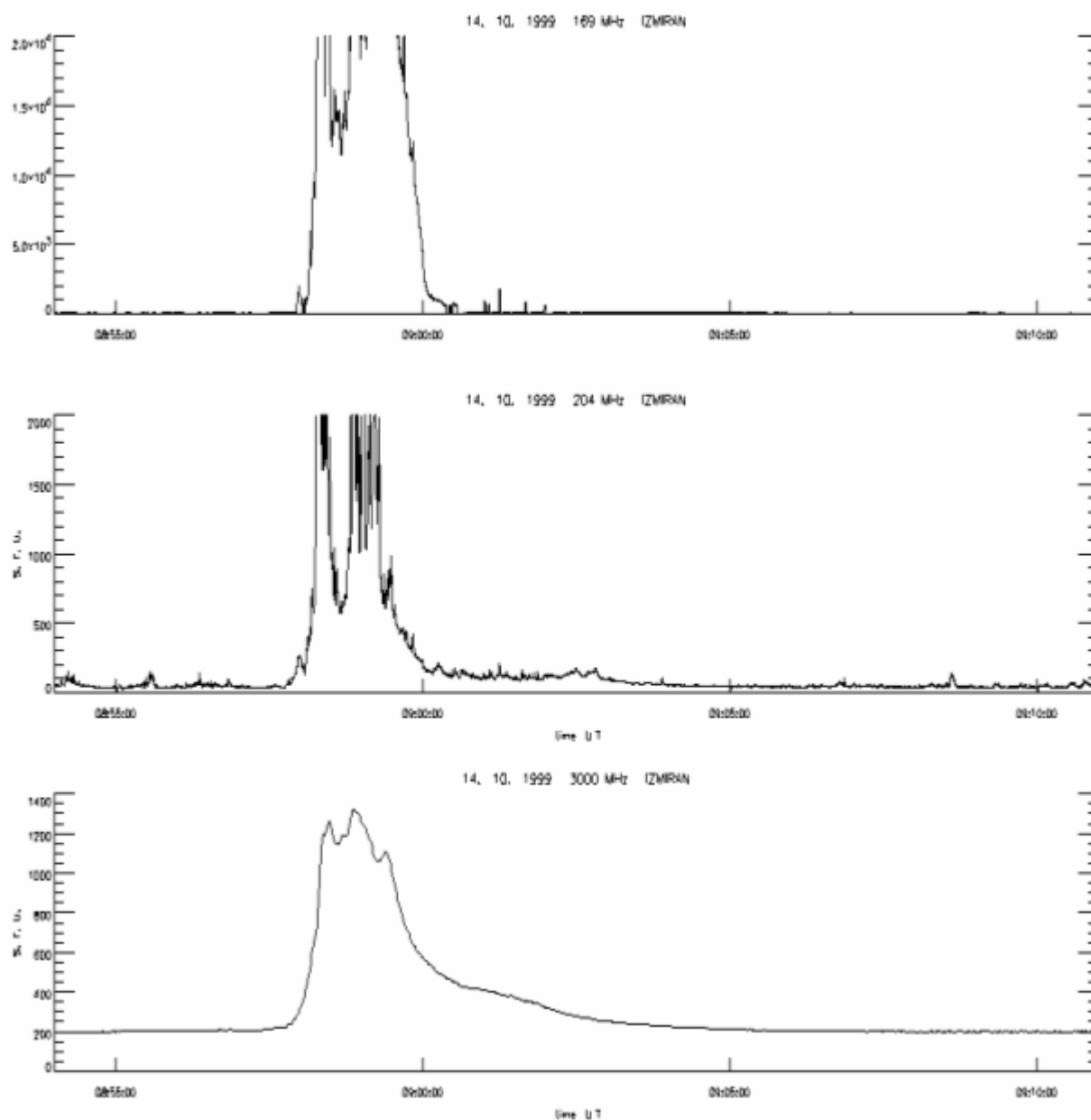
3) “**Радиовсплески**”. Как и поток спокойного Солнца,  $S$ -компонент имеет в основном, тепловую природу и характеризуется медленными непрерывными колебаниями разной периодичности. Его интенсивность обычно не превышает поток излучения спокойного Солнца, за исключением самых активных дней, причем лишь в сантиметровом диапазоне [12-18]. В известном смысле, можно говорить о некой “краткосрочной предсказуемости” (с той или иной вероятностью) уровня  $S$ -компоненты в течении 27-дневного периода. Однако существует чрезвычайно нестационарный и практически непредсказуемый компонент, обусловленный взрывным выделением значительного количества энергии в активных областях солнечной атмосферы. Излучение этого

компонента охватывает весь спектр радиодиапазона и не имеет постоянно выраженного спектрального характера. Интенсивность этих взрывобразных нарастаний радиопотока Солнца может на отдельных длинах волн в разы и даже в порядке превышать уровень излучения спокойного Солнца [12-18] и иметь длительность от доли секунды до нескольких суток. Этот компонент принято называть “радиовсплески”. В радиоастрономической литературе имеются превосходные обзоры наблюдений и теорий солнечных всплесков [12-18]. В них можно найти достаточно полное описание различных видов всплесков, а также достаточно проработанные теоретические модели. Общая идея заключается в том, что в солнечной атмосфере внезапно выделяется большое количество энергии, достаточное, чтобы нагреть плазму, ускорить частицы до высоких энергий, возбудить плазменные и акустические волны; в результате в радиодиапазоне, охватывающем более четырех декад длин волн, становятся возможными многие механизмы излучения. С нашей же точки зрения самая большая проблема, связанная с радиовсплесками, заключается именно в чрезвычайно низкой возможности предсказания их появления и невозможности прогнозировать их характеристики. Можно только отметить, что вероятность их появления заметно возрастает при наличии особо активных областей на солнечном диске. Спектр потока различается от всплеска к всплеску, при этом существенно меняется продолжительность и интенсивность излучения. В настоящее время имеются различные классификации всплесков радиоизлучения и, вообще, проявлений солнечной активности [12-18]. На приведенных ниже рисунках представлены некоторые фактические данные, полученные Лабораторией Радиоизлучения Солнца (ИЗМИРАН, Гнездилов А.А) [18].



**Рис. 6.** Всплеск солнечного излучения (в s.f.u.) на длине волны 10см (3ГГц) 27 июня 1993г (Единое время).

Чтобы правильно оценивать вклад радиовсплесков в солнечный поток, падающий на Землю, необходимо знать не только их интенсивность, частоту появления и продолжительность, но и иметь очень качественную временную привязку. Более мощные всплески, как правило, существуют дольше и обычно связаны с более мощными солнечными вспышками (возможно, балла 1b и выше). Их частоту появления можно оценить из статистики таких мощных вспышек [17,18]. Самые же мощные всплески, подобные знаменитому всплеску 4 августа 1972 г. и всплескам, дающим максимальную огибающую, связаны с высокоэнергичными вспышками, которые производят протоны и излучение в белом свете. Эти протонные вспышки довольно редки; они происходят, по-видимому, всего несколько раз в год в период максимума солнечных пятен и характеризуются широкополосными сантиметровыми всплесками [16]. Однако именно при такого рода вспышках возможно превышение фонового уровня радиоизлучения более чем в 10 раз! Например, мощный (превышение фонового уровня на волне 10 см более чем в 45 раз!) и спектрально необычный характер имели всплески, сопровождавшие мощные вспышки конца октября- начала ноября 2003г. [17,18].



**Рис. 7.** Мощная вспышка солнечного излучения 14 октября 1999г. Регистрация в диапазонах 169 (“зашкал”), 204 (“зашкал”) и 3000 МГц (Единое время).

В целом, надо сказать, что в годы минимума активности заметные радиовсплески могут появляться достаточно редко – может быть всего несколько заметных событий за месяц [12-18], но может быть и достаточно внезапная серия таких событий, особенно на спаде активности (октябрь-ноябрь 2003г.). В годы же максимума активности такого рода события происходят намного чаще (до нескольких раз в день) и могут иметь существенно большую интенсивность [17,18].



Таким образом, мы кратко рассмотрели экспериментальные данные о характере и изменчивости потока радиоизлучения Солнца в микроволновом диапазоне. Для обзора и анализа, помимо литературных источников [12-16], использовались фактические данные международной Службы Солнца, полученные с соответствующих сайтов и регулярных бюллетеней [17,18]. Объем изложенного здесь материала, безусловно, является очень небольшим по сравнению с массивом данных, имеющимся в солнечной радиоастрономии. Однако уже из представленного становится очевидным, что при учете солнечного радиоизлучения на практике, как количественно оцениваемой помехи или, наоборот, источника зондирующего сигнала, необходимо работать с фактически измеряемыми в данный момент времени значениями потока в выбранном диапазоне. Это следует из того факта, что суммарный поток  $V$ - и  $S$ -компонент демонстрирует в измерениях определенную изменчивость, а вероятность предсказания появления и характера микроволновых всплесков остается чрезвычайно низкой.

### 3. Расчеты по методу Кирхгофа в СВЧ- радиометрии морской поверхности.

Наиболее часто в современной СВЧ- радиометрии взволнованной морской поверхности в качестве расчетного используется модифицированный определенным образом метод Кирхгоффа [2,10,11]. В этом методе в расчет принимаются только достаточно крупные поверхностные волны, чьи размеры и кривизна удовлетворяют соотношениям:

$$\Lambda \gg \lambda$$

$$(2\pi/\lambda) \cdot R_c \cdot \cos^3 \theta = k \cdot R_c \cdot \cos^3 \theta \gg 1 \quad (4)$$

где  $\Lambda$  есть длина морской волны,  $\lambda$  – длина волны зондирующего СВЧ излучения,  $R_c$  – радиус кривизны локального волнового элемента,  $k$  – модуль СВЧ волнового вектора и  $\theta$  – надирный угол зондирования. В процессе вычисления эти “большие и гладкие” волны аппроксимируются плоскими площадками с размерами много больше, чем длина радиоволны  $\lambda$ . При таком подходе, конечно, заведомо пренебрегают краевыми эффектами и вкладом тех

поверхностных волн, чей размер меньше или порядка  $\lambda$ . Такие мелкомасштабные волны отвечают за диффузное рассеяние во все стороны, но в целом их вклад пренебрежимо мал по сравнению с вкладом от крупных волн в области квазизеркального рассеяния вблизи направления зеркального отражения. И только вне этой области (приблизительно более  $25\div 30^\circ$  от направления зеркального отражения) вклад мелкомасштабной составляющей начинает превалировать [2]. Для большинства задач радиометрии морской поверхности метод Кирхгофа является вполне адекватным. Принципиальным моментом при его практическом применении является конкретное количественное определение теоретического соотношения (4). Для того чтобы обойти этот критический момент на практике используют эмпирические зависимости распределения уклонов крупных морских волн. Такого рода зависимости известны для случая развитых ветровых волн [5,6,10,11,19]. К числу наиболее известных и цитируемых в литературе [11,19] следует отнести результаты Кокса-Манка (1951-55), Пирсона-Стейси (1973), Калинина-Лейкина (1974), Бурцева-Пелевина (1975), Бьёркаса-Риделя (1979) и Филлипса (1985). Из них самыми популярными до сих пор остаются канонические зависимости Кокса-Манка [5,6]. И в наше время, многие теоретики используют их в практически неизменном виде. В наиболее же проработанных современных моделях использование информации о состоянии морского волнения, до недавнего времени, базировалось на следующих допущениях:

- 1) Морское волнение в основном сформировано за счет развитых ветровых волн;
- 2) Зависимость дисперсии уклонов крупных поверхностных волн (для развитого волнения) от величины скорости приводного ветра на стандартной высоте находится в согласии с каноническими результатами Кокса и Манка [5,6];
- 3) Переход от спектральной фракции поверхностных волн, “крупных согласно Коксу и Манку”, к фракции волн, “крупных по отношению к

длине радиоволны  $\lambda$  (с радиочастотой  $f$ )” осуществляется по методике Холлингера- Вилхайта [20];

- 4) Влияние пенного покрова учитывается на основе данных лабораторного моделирования и статистики, собранной в этом районе Мирового океана [19,20].

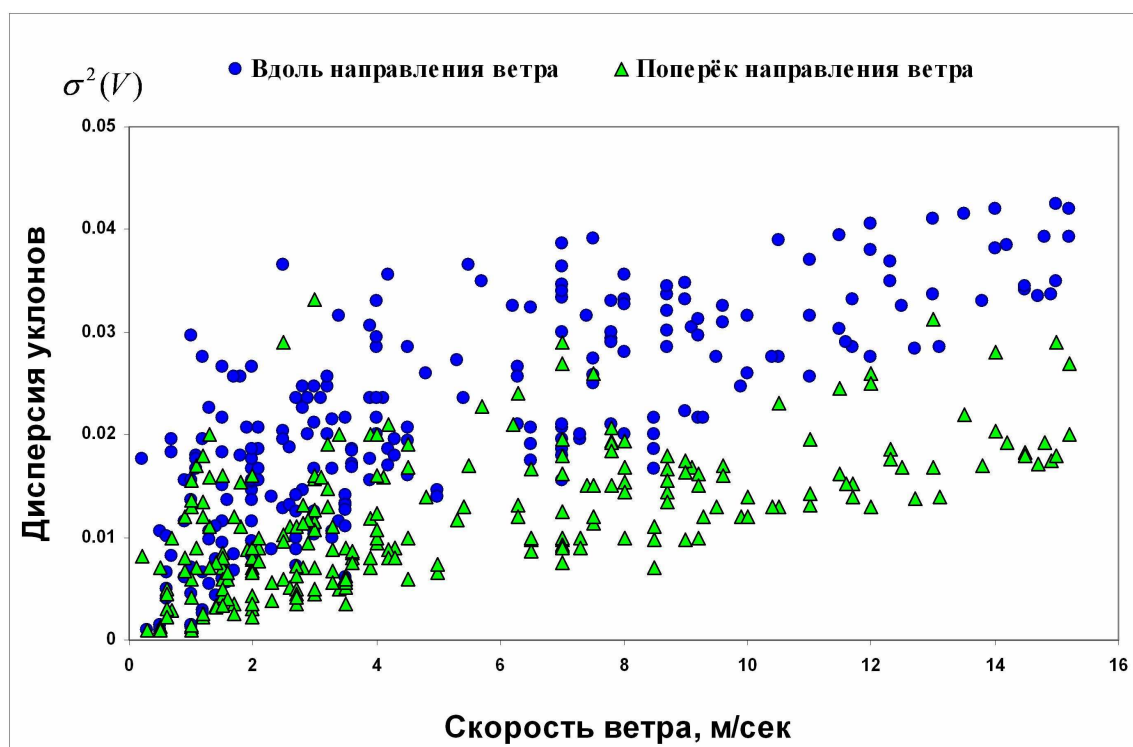
В отличие от ранних экспериментов Холлингера (1970-72гг.) и Вилхайта (1978-79гг.), в настоящее время нами уже получены данные одновременных измерений радиационных характеристик взволнованной морской поверхности и параметров поля шероховатости, во всяком случае, для диапазона радиочастот от 3 до 50 ГГц. Как уже говорилось выше (см. Введение), эксперименты по бистатической локации взволнованной поверхности моря были выполнены в 1989-90 гг. в рамках подготовки программы подспутниковых экспериментов по проектам “Природа” и “Океан” [8,9]. При этом в качестве источника зондирующего шумового СВЧ- радиоизлучения выступало Солнце, а основной объем данных по рассеянию солнечного излучения в квазизеркальной области был собран на длинах волн 0,8 см (37,5 ГГц), 2,25 см (13,33 ГГц) и 6,0 см (5,0 ГГц) обеих поляризаций. За время экспедиции было также получено большое количество данных по статистике морского волнения, и в том числе, уклонов крупных морских волн [8,9]. По результатам обработки и последующего анализа собранной статистики волнения были сделаны следующие выводы [8,9]:

- 1) Независимо от сезона наличие одной или нескольких систем зыби наблюдается не менее, чем в 60÷65% всех случаев, а ситуация собственно ветрового (более или менее) волнения наблюдается существенно реже – в остающихся 35÷40% случаев.

- 2) Из наблюдаемых ветровых волн не более половины (т.е. не более 15÷20% от общего числа случаев), соответствуют критерию “достаточной развитости”. При этом был использован довольно “мягкий” вариант критерия развитости - так, по мнению Московитца [10,11], в реальности лишь около 5% всех

наблюдаемых случаев достаточно близки к теоретической ситуации полностью развитого волнения.

3) Из вышесказанного следует, что на практике модель развитого волнения реализуется относительно редко - не более 20% от всех наблюдаемых за время экспериментов случаев. В остальных случаях присутствуют элементы неразвитости (около 15÷20% всех случаев) и посторонняя зыбь (в 60÷65%), которая генетически никак не связана с местным разгонным ветром. Влияние этих искажающих факторов на поле шероховатостей морского волнения и на характер “однозначной” зависимости параметров волнения от величины и направления приводного ветра тем сильнее, чем меньше величина и время действия местного разгонного ветра. На рис.8 приведены совокупные результаты волнографических измерений за периоды октябрь- ноябрь 1989г. и июнь-июль 1990г.



**Рис. 8.** Совокупные данные по статистике поверхностного волнения (октябрь-ноябрь 1989г, июнь- июль 1990г).

4) В случае развитого волнения для зависимости дисперсии уклонов крупных волн от величины скорости приводного ветра (на стандартной высоте

19.5 м) характерно наличие двух разных режимов взаимодействия – со скоростью разгонного ветра до 8÷9 м/с (Область I) и от 9 до 15 м/с (Область II):

Область I:

Область II:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x^2(V) &= 0.0016 + 0.0028 \cdot V & \sigma_x^2(V) &= 0.0153 + 0.0014 \cdot V \\
 \sigma_y^2(V) &= 0.0014 + 0.0014 \cdot V & \sigma_y^2(V) &= 0.0063 + 0.0008 \cdot V \\
 \sigma^2(V) &= \sigma_x^2(V) + \sigma_y^2(V) = 0.003 + 0.0042 \cdot V \pm 0.004 & \sigma^2(V) &= 0.0216 + 0.0022 \cdot V \pm 0.004 \\
 \langle \sigma_y^2(V) / \sigma_x^2(V) \rangle &\approx 0.53 & \langle \sigma_y^2(V) / \sigma_x^2(V) \rangle &\approx 0.51
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

5) Для того, чтобы наблюдалось удовлетворительное совпадение теоретических расчетов по методу Кирхгофа величины вклада в антенную температуру и данных эксперимента необходимо использовать в расчетах лишь определенную долю измеренной дисперсии уклонов (волнограф с базой матрицы 30...42 см). При этом измерениям в диапазонах радиоволн 6,0 см (5 ГГц), 2,25 см (13,33 ГГц) и 0,8 см (37,5 ГГц) соответствуют значения коэффициентов коррекции: 0,36 ( $\pm 0,05$ ), 0,47 ( $\pm 0,07$ ) и 0,62 ( $\pm 0,08$ ), соответственно. Далее, эти коэффициенты методом линейной интерполяции преобразуются в зависящую от частоты зондирования  $f$  (в ГГц) поправочную функцию  $C(f)$ , так что в частотном диапазоне радиоволн от 3 до 50 ГГц мы имеем:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^2(f, V) &= C(f) \cdot \sigma^2(V), \\
 \text{где } \sigma^2(V) &\text{ берётся из зависимостей (5), а} \\
 C(f) &= 0.0076 \cdot f + 0.34.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Полученное таким образом значение дисперсии уклонов “крупных для радиоволны с частотой  $f$ ” вдоль и поперек направления разгонного ветра (или среднее по углу) и используется непосредственно при дальнейших расчетах.

#### 4. Экспериментальная оценка качества модели.

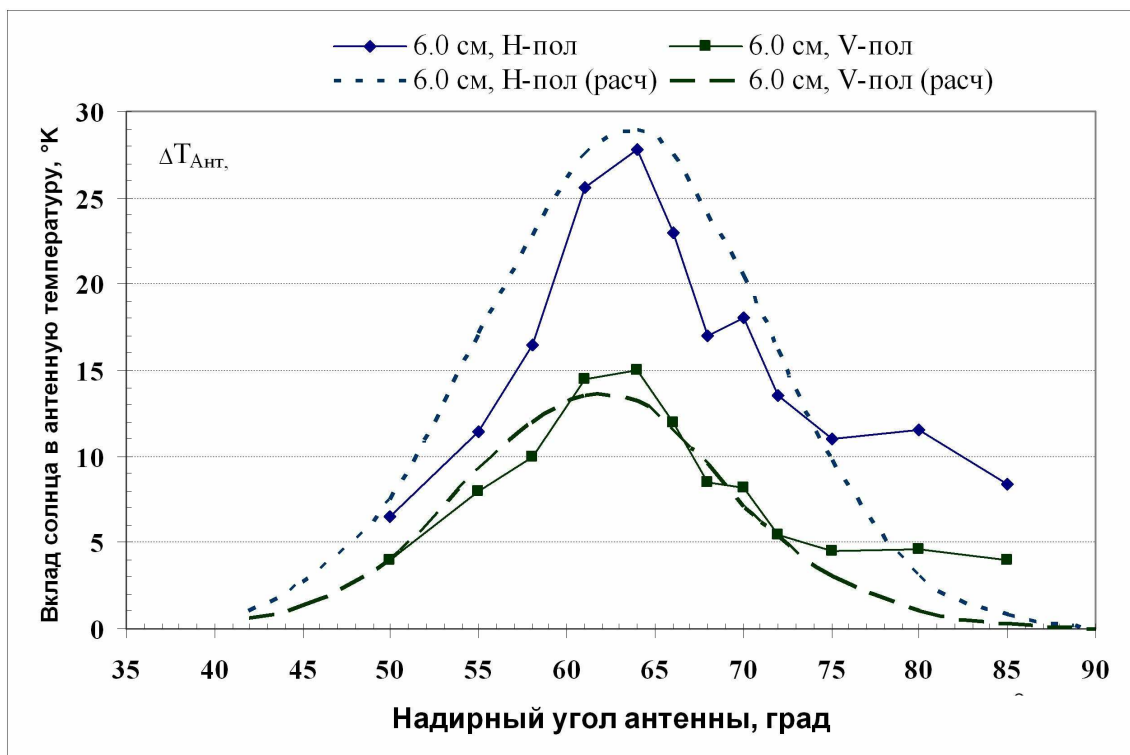
Первоначальная методика радиозондирования с использованием в качестве источника зондирующего шумового СВЧ- радиоизлучения солнечного микроволнового потока была разработана на основе экспериментальных данных по рассеянию в квазизеркальной области на длинах волн 0,8 см (37,5 ГГц), 2,25 см (13,33 ГГц) и 6,0 см (5,0 ГГц) обеих поляризации. Она предполагала работу в диапазоне частот 3...50 ГГц, использование узких (до  $10^\circ$  по уровню половинной мощности) ДНА, и выделение вклада от солнечного “подсвета” путем сканирования по азимутальному и зенитному углам вдоль и поперек оси “солнечной дорожки”. При этом для определения уровня излучения Солнца, прошедшего сквозь атмосферу, до начала и после измерений проводилась экспериментальная оценка уровня его светимости в соответствующих диапазонах при прямом прохождении через ДНА. Для более точной абсолютной привязки и последующего контроля интенсивности СВЧ – излучения Солнца в процессе измерений (отслеживания возможных радиовсплесков) использовались данные Службы Солнца, полученные на радиотелескопах, расположенных в разных точках планеты [17,18]. При работе в июне-июле 1990 года на борту океанографической платформы ЧО МГИ АН УССР (полигон Кацивели) приоритет, с учетом фактического времени измерения, отдавался данным радиоастрономических станций (РАС) в Кацивели (CRIM), Кисловодске (KISV), Троицке (IZMI) и Нижнем Новгороде (GORK). Проводилось сравнение с собственными данными по утренней ( $6^{00} - 7^{00}$  Мск) калибровке и соответствующее уточнение величины потока. При использовании данных удаленных РАС в расчет принималась также разница в уровнях атмосферного ослабления. Это были годы активного Солнца. Уровень совокупного излучения В- и S- компонент, в зависимости от диапазона, менялся за общее время наблюдений (около 1 мес.) в 1,15÷1,8 раза от минимального за время наблюдений значения. При этом относительная амплитуда колебаний интенсивности была минимальна в коротковолновой области (0,8 см) и



возрастала со сдвигом к более длинным (6,0см) волнам. Состояние повышенной активности Солнца, помимо высоких уровней зондирующего фонового излучения, имело и свои минусы – наблюдалось существенное увеличение числа радиовсплесков. А поскольку их спектральные характеристики при стандартной процедуре регистрации, принятой в то время в солнечной радиоастрономии, было очень трудно учесть, данные о заметных всплесках использовались, в основном, для простой выбраковки полученных результатов.

В целом, при выполнении радиометрических измерений по описываемой методике, в июне-июле 1990 года в условиях безоблачной атмосферы и волнения различной степени (скорость ветра менялась во время измерений от значений близких к 0 до 14 м/с) для антенн с диаграммой направленности около  $10^\circ$  в обеих плоскостях (по уровню 0,5 мощности) были получены следующие значения максимальной величины вклада при различных углах антенны и Солнца (вблизи направления зеркального отражения при угле Солнца над горизонтом от  $15^\circ$  до  $45^\circ$ ): 1) длина волны 6,0см, Н-поляризация – от 10 до 70 К, V-поляризация – от 4 до 27 К; 2) длина волны 2,25см, Н-поляризация – от 3 до 21 К, V-поляризация – от 1,5 до 10 К; 3) длина волны 0,8см, Н-поляризация – от 1 до 8 К, V-поляризация – от 0,5 до 5 К.

В качестве примера на рис.9 представлены результаты сравнения в диапазоне 6 см (5 ГГц) теоретических и измеренных значений вклада в антенную температуру при “разрезе” солнечной дорожки по надирному углу антенны  $\theta_{АНТ}$  утром 8 июля 1990г.. Зенитный угол Солнца составлял  $60...61^\circ$ , температура воздуха  $+25^\circ\text{C}$ , влажность –  $24 \text{ г/м}^3$ , температура воды  $+19,5^\circ\text{C}$ , ветер силой 1,5 м/с и направлением вдоль солнечной дорожки, почти вдоль дорожки сильная зыбь с дисперсией уклонов крупномасштабных волн 0,0142, дисперсия уклонов поперек зыби и ветра - 0,007. Яркостная температура Солнца, приведенная к среднему оптическому размеру, составляла в этот день (во время измерений) для данного диапазона  $47'300^\circ\text{K}$  (плотность потока 245 СЕП).



**Рис. 9** Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментальных данных по рассеянию в квазизеркальной области для  $\lambda=6\text{см}$  обеих поляризаций (утром 8 июля 1990г.).

В общем, достаточно очевидно, что структура волнения в этом случае определяется совсем не местным разгонным ветром (около 1,5 м/с), а в основном приходящей зыбью, которой можно сопоставить “эквивалентный” разгонный ветер силой около 5 м/с. Следует также отметить, что, возможно из-за малого пространственного пятна при узкой ДНА и небольшом (высота установки около 18 метров над уровнем моря) расстоянии до поверхности, на экспериментальной кривой хорошо просматриваются случаи локального искажения поверхностного волнения.

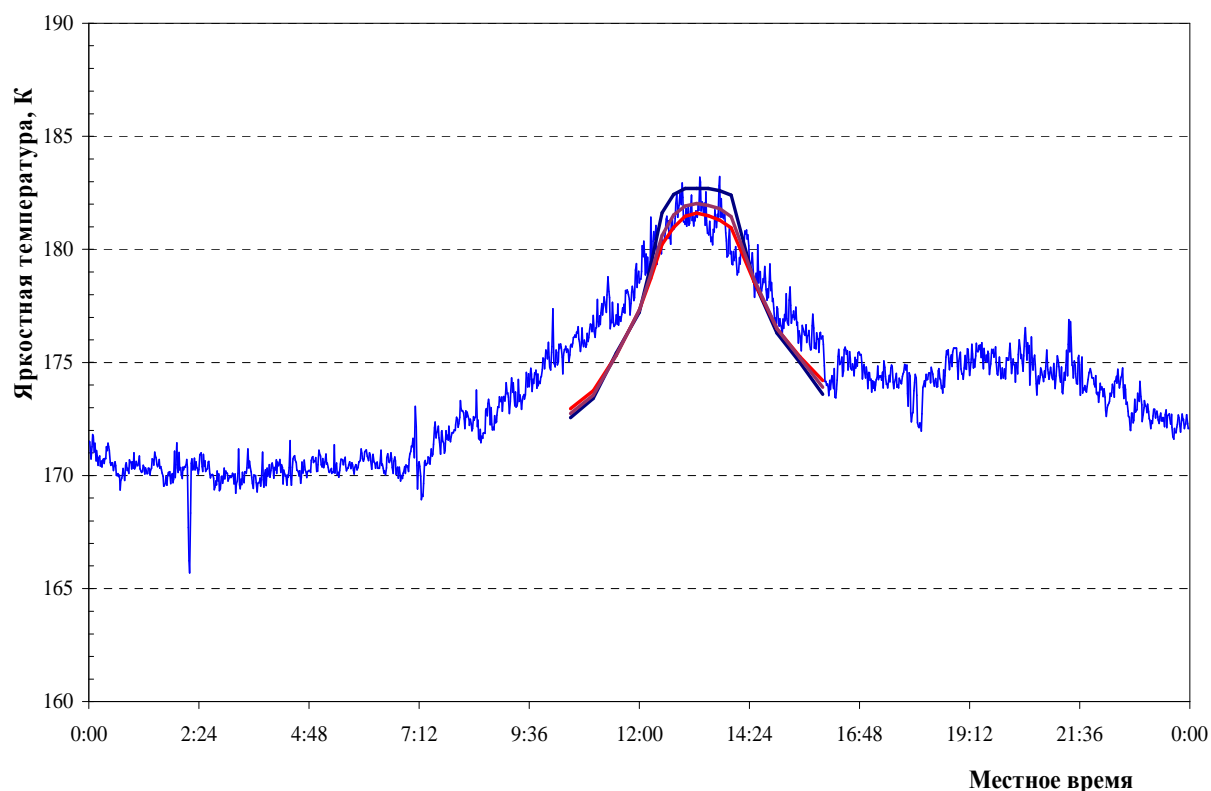
Иная схема зондирования морской поверхности с использованием солнечного микроволнового излучения была реализована в экспериментах на морской платформе ЭО МГИ НАНУ в п. Качивели (Крым) в августе 2007 г. и октябре 2009 г., которые проводились в рамках комплексных экспериментов по дистанционному зондированию морской поверхности «САРМОС’07», «САРМОС’09». Натурные эксперименты проводились в годы спокойного Солнца, были использованы малогабаритные узкополосные супергетеродинные

СВЧ радиометры L диапазона с применением неподвижной рупорно-линзовой антенны. Измерения вариаций радиоярких температур проводились с целью анализа естественной изменчивости принимаемых сигналов, выявления основных факторов определяющих их и оценки вклада помех в зависимости от времени суток. Измерения проводились непрерывно в течение нескольких суток. Антенна была направлена на морскую поверхность под фиксированным углом  $57^\circ$  относительно надира для центрального луча диаграммы. Ширина диаграммы направленности на частоте 1,423 ГГц (длина волны 21,1 см) составляла примерно  $32,5^\circ$  по уровню половинной мощности (очень широкая ДНА!). Максимальные изменения принимаемого сигнала наблюдались в дневное время суток при прохождении через диаграмму приемной антенны радиоизлучения Солнца, рассеянного на шероховатостях взволнованной поверхности моря.

Модельные расчеты вклада Солнца в принимаемое излучение были выполнены вышеописанным вариантом метода Кирхгофа в предположении развитости волнения и с учетом фактической ДНА до уровня 0,1 по мощности. В качестве источника оперативной информации о величине потока солнечного радиоизлучения в данном диапазоне были использованы данные международной Службы Солнца (радиообсерватории Palehua (PALE), Learmonth (LEAR), Sagamore\_Hill (SGMR) и San\_Vito (SVTO)). Среднедневная плотность потока солнечного радиоизлучения колебалась за общее время измерений (6 дней с 22.10 по 27.10.2009) от 53 до 63 СЕП при среднем значении в 58 СЕП. На рис.10 на фоне экспериментальных данных за 23 октября 2009 года приводятся данные расчета величины вклада отраженного солнечного радиоизлучения для трех значений скорости приводного ветра на стандартной высоте равной 19,5 метра: 1)  $V=5$  м/с (темно-синяя кривая); 2)  $V=10$  м/с (коричневая кривая); 3)  $V=15$  м/с (красная кривая). Плотность потока во время измерений составляла около 56 СЕП, температура воды показывала слабый рост от 16 до  $17,5^\circ\text{C}$ , соленость была практически неизменной и равной

17,9 промилле, была также отмечена сильная зашумленность теплового сигнала от нескольких близко расположенных станций мобильной связи (см. рис.10).

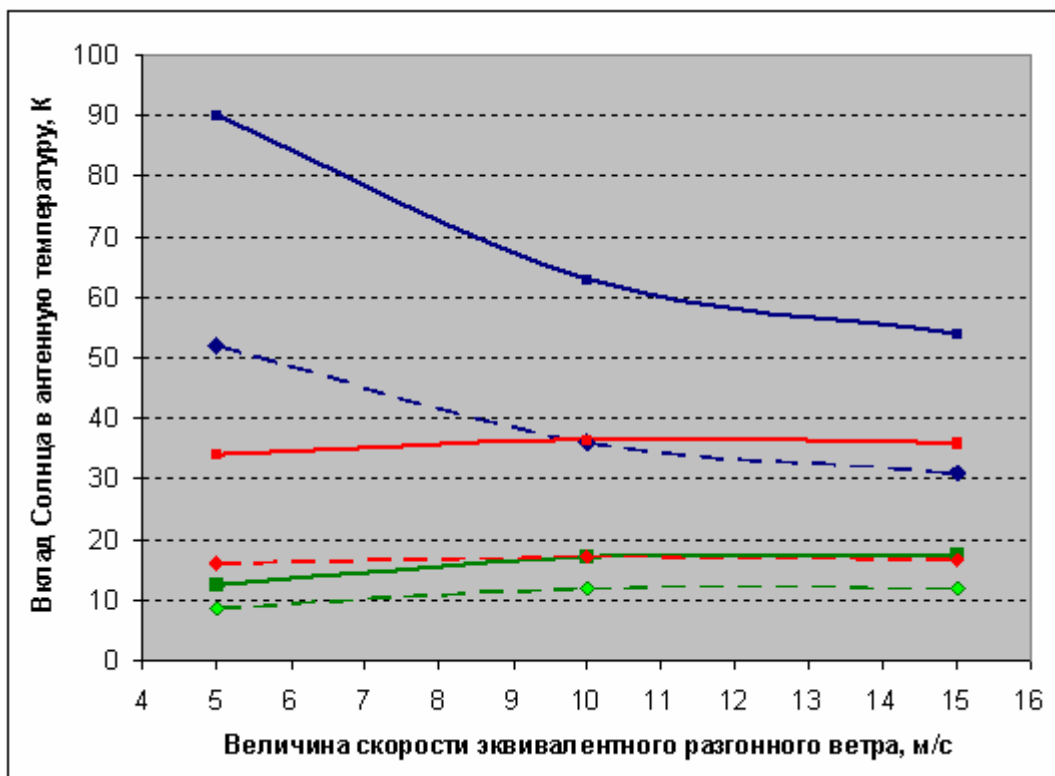
Сравнение последних экспериментальных данных и результатов модельных расчетов показало, что общий характер и максимальное значение вклада излучения Солнца в принимаемое излучение неплохо описываются в рамках принятой модели и для этого диапазона радиоволн (1...3 ГГц). Так, сравнение кривых (рис.10) свидетельствует о том, что состояние поля крупномасштабных шероховатостей по принятой модели развитого волнения соответствует величине разгонного ветра (на стандартной высоте 19,5 м) приблизительно в  $12,5 \pm 1,5$  м/с. Сверка с метеоданными показала, что с 8 часов местного времени до 18-00 сила ветра действительно колебалась от 11 до 14 м/с.



**Рис. 10** Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментальных данных по прохождению отраженного Солнца через диаграмму направленности приемной антенны (23 октября 2009г.,  $\lambda=21,1$  см, вертикальная поляризация).

Однако, вместе с тем, в экспериментальных данных явно наблюдается вклад других внешних источников излучения и возмущающих факторов, что

требует дополнительного анализа. Из рассмотрения геометрии задачи следует, что наиболее вероятной причиной расхождения между результатами расчетов и экспериментом на склонах “солнечного пика” является отражение солнечного излучения от массивных металлических конструкций платформы в поверхностную область рассеяния. Во всяком случае, расчет по методу малых возмущений (ММВ) не позволяет устранить эту разницу – при данной величине потока он дает для диффузного рассеяния величину не более  $0,2-0,3^\circ\text{К}$  во всем диапазоне углов. В принципе, данный эксперимент показал достаточно небольшое расхождение по величине максимального вклада между различными “ветровыми кривыми” – в пределах  $2^\circ\text{К}$  при переходе от 5 к 15 м/с. На размер этой величины влияет значение плотности потока, выбор угла установки антенны и поляризация принимаемого излучения. Главными же факторами, как показывают расчеты и данные экспериментов, являются направленные характеристики антенны, а также взаимная угловая ориентация ДНА и падающего (и/или рассеянного) потока. На рис.11 приведены данные такого же расчета величины вклада отраженного солнечного радиоизлучения в плоскости  $\varphi=0-180^\circ$  для трех значений скорости эквивалентного приводного ветра (5, 10 и 15 м/с) на стандартной высоте 19,5 метра, ширине ДНА около  $10^\circ$  по уровню половинной мощности, надирном угле центрального луча антенны  $\theta_{\text{АНТ}}=57^\circ$  и трех значениях зенитного угла Солнца: 1)  $\theta_c=57^\circ$  (Н-поляризация – синяя сплошная, V-поляризация – синяя пунктирная); 2)  $\theta_c=70^\circ$  (красные кривые); 3)  $\theta_c=40^\circ$  (зеленые кривые). Плотность потока принималась равной 56 СЕП, температура воды -  $18^\circ\text{C}$ , соленость - 18 промилле, все остальные метеопараметры также совпадают с данными предшествующего расчета (см. рис.10).



**Рис. 11** Изменение величины вклада отраженного солнечного радиоизлучения ( $\lambda=21,1\text{см}$ ) в измеряемую антенную температуру приемной антенны для случая “узкой” ДНА (около  $10^\circ$  по уровню мощности 0,5).

Видно, что при уменьшении ширины ДНА до  $10^\circ$  по уровню половинной мощности интересующая нас разница возрастает до  $36^\circ\text{К}$  на горизонтальной и до  $21^\circ\text{К}$  на вертикальной поляризациях, при том же установочном угле антенны и измерении в направлении зеркального отражения. Из сравнения результатов эксперимента 2007-2009 гг. (рис.10) с более ранними (рис.9) и нашими расчетами (рис.11) также следует, что точность определения состояния поля поверхностных шероховатостей возрастает при одновременном использовании обеих основных поляризаций. Однако такой “красивый” и однозначный результат получается только в том случае, когда направление зеркального (к среднеуровневой поверхности площадки) отражения лежит внутри главного лепестка ДНА (синие кривые)! В ином же случае, при “раскачке” волнения возможен даже некоторый незначительный рост исследуемой величины (см. рис.11, красные и зеленые кривые).



### Заключение.

Выполненные исследования наглядно продемонстрировали тот факт, что величина вклада в антенную температуру СВЧ- радиометра от солнечного радиоизлучения, попадающего в область квазизеркального рассеяния, слишком значительна для того, чтобы ею пренебрегать. При прочих равных условиях, величина этой искажающей помехи растет вместе с ростом длины радиоволн. С другой стороны, показано, что описанная в работе методика использования Солнца, в качестве мощного источника неполяризованного шумового радиосигнала естественного происхождения, позволяет не только совершенствовать радиационную модель поверхности океана, но и оценивать состояние поверхностного морского волнения при радиометрической съемке на дневной стороне планеты. При этом наиболее пригодным и эффективным для определения параметров поверхностного волнения является режим работы в области углов близких к направлению зеркального отражения. При надлежащем выборе частотного диапазона, конструктивной схемы, установочных углов, траектории сканирования и, в целом, режима работы радиометра на борту космического или авиационного носителя возможно достижение чувствительности метода на порядок превосходящую чувствительность классических методов, основанных на исследовании изменения уровня собственного теплового излучения системы “океан–атмосфера”. Необходимым условием эффективной работы является также режим согласованной радиоастрономической поддержки со стороны международной Службы Солнца.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Определение геофизических параметров по измерениям теплового радиоизлучения на ИСЗ “Космос - 243”. Докл. АН СССР, 1969, т.188, № 6, с.1273-1276.

2. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Microwave remote sensing, active and passive. L.: Addison Wesley Publ. Comp., V.1-3, 1992.
3. *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”.
4. Результаты исследований АМП в видимом диапазоне спектра с борта космического аппарата. //НТО ЦНИИ “Комета”, 1991.
5. *Cox C., Munk W.* Statistics of the sea surface derived from sun glitter. //J. Marine Res., 1954, V.13, №2, pp. 198-227.
6. *Cox C., Munk W.* Slopes of sea surface deduced from photographs of sun glitter. //Bull. Scripps. Inst. Oceanogr., 1956, V.6, N 9, pp. 401-488.
7. *Мулламаа Ю.-А.Р.* Атлас оптических характеристик взволнованной поверхности моря. //Таллинн: «Октобер», 1964, 496с.
8. *Данилычев М.В., А.В.Евтушенко, Б.Г.Кутуза, А.И.Лотов, А.Г.Николаев* Наземные эксперименты и комплекс аппаратуры для отработки методики дистанционного зондирования проекта “ПРИРОДА” //Вопросы дифракции и распространения волн, М.: МФТИ, 1990, с. 126-132.
9. *Данилычев М.В., А.В.Евтушенко, Б.Г.Кутуза, А.И.Лотов, А.Г.Николаев* Рассеяние СВЧ-радиоизлучения Солнца на шероховатостях взволнованной морской поверхности, *Радиотехника и электроника*, 1993, т. 38, № 2, с. 273-278.
10. *Danilytchev M.V., Kutuza B.G., Nikolaev A.G.* The Application of Sea Wave Slope Distribution Empirical Dependencies in Estimation of Interaction Between Microwave Radiation and Rough Sea Surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, February 2009, V.47, N.2, IGRSD2, ISSN 0196-2892, pp.652-661.*
11. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Николаев А.Г. Использование метода Кирхгофа для практических расчетов в микроволновой радиометрии

- взволнованной морской поверхности, *Радиотехника и Электроника*, М., 2009, т.54, № 8, с. 915-926.
12. *Железняков В.В.* Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964, 560с.
13. *Гельфрейх Г.Б., Зайцев В.В., Илясов Ю.П. и др.* Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца. // М.: Наука, 1990, 212с.
14. *Крюгер А.* Солнечная радиоастрономия и радиофизика. М.: Мир, 1984, 470с.
15. Солнечная и солнечно-земная физика: Пер. с англ./Под ред. Бруцека А., Дюрана Ш. // М.: Мир, 1980, 256с.
16. Поток энергии Солнца и его изменения: Пер. с англ./Под ред. Уайта О.// М.: Мир, 1980, 560с.
17. <http://www.ngdc.noaa.gov> Solar- Geophysical Data reports. //NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC), Boulder, Colorado, USA, 1989-2010.
18. <http://helios.izmiran.rssi.ru/lars> Данные Лаборатории Радиоизлучения Солнца. //ИЗМИРАН, Троицк, 1989-2003.
19. *Шутко А.М.* СВЧ – радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986, 192с.
20. *Wilheit 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, pp.244-249.
21. *Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т* Солнце как источник помех и дополнительных возможностей в СВЧ- радиометрии системы “океан-атмосфера”, в электронном сборнике: *Труды IV Всероссийской конференции “Радиолокация и радиосвязь” – ИРЭ РАН, 29 ноября -3 декабря 2010 г., М., 2010, стр. 896-913.*
22. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т Роль Солнца как источника СВЧ- излучения в дистанционном зондировании системы “океан-атмосфера”, в книге: *Труды XXIII Всероссийской научной конференции “Распространение радиоволн”, 23-26 мая 2011 года, Йошкар-Ола, МарГТУ, 2011, стр.196-200.*